

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

**KARAYOLU PÜRÜZLENDİRMESİNDE CÜRUF LARIN
KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE PÜRÜZLENDİRİLMİŞ
TABAKALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İslam GÖKALP

**Danışman
Prof. Dr. Mehmet SALTAN**

**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2021**



© 2021 [İslam GÖKALP]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	8
2.1. Trafik Kazaları	8
2.2. Kaplama Yüzey Özellikleri	10
2.3. Makro Doku Ölçüm Yöntemleri.....	14
2.3.1. Hacimsel tabanlı ölçüm yöntemleri.....	14
2.3.2. Lazer ve görüntüleme tabanlı yöntemler.....	15
2.3.3. Kaplama yüzey dokusu yöntemleri arasındaki ölçüm modelleri	17
2.3.4. Farklı doku ölçüm yöntemlerine ait güçlü ve zayıf yönler	18
2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler.....	19
2.4. Kayma Direnci Ölçüm Yöntemleri.....	23
2.4.1. Boyuna sürtünme katsayısı ölçüm prensibine sahip cihazlar	25
2.4.2. Yanal kuvvet katsayısı ölçüm prensibine sahip cihazlar.....	27
2.4.3. Sabit veya düşük hızda ölçüm prensibine sahip cihazlar	28
2.4.4. Farklı kayma direnci ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması.....	29
2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler	31
2.5. Kaplama Türleri	37
2.5.1. Bitümlü sıcak karışım	38
2.5.2. Yüzeysel kaplamalar.....	41
2.6. Agregat Türleri ve Karakteristik Özellikleri	46
2.6.1. Doğal agregalar	46
2.6.2. Yapay agregalar.....	49
2.7. Cürufklar ve Cürufkların Karayolu İnşaatında Kullanımı	49
2.8. Pürüzlendirme Uygulamalarının Örnekleri.....	54
3. MATERYAL VE METOT	60
3.1. Agregalar	60
3.1.1. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri	60
3.1.2. Agregaların kimyasal bileşenleri.....	62
3.1.3. Agregaların yüzey özellikleri	64
3.1.4. Agregaların çevresel risk analizi	66
3.2. Deneme Yollarının Belirlenmesi	69
3.3. Pürüzlendirme Parametrelerinin Belirleme Çalışmaları	70
3.3.1. Laboratuvar çalışmaları.....	70
3.3.2. Saha çalışmaları	74
3.4. Pürüzlendirme Uygulaması Parametreleri.....	75
3.5. Deneme Yolları İnşaatı ve Pürüzlendirme Uygulanması.....	77
3.6. Saha Ölçüm Yöntemleri	81
3.6.1. İngiliz pandülü	82
3.6.2. Dinamik sürtünme ölçer	84

3.6.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı.....	85
3.6.4. Kum-yama	87
3.6.5. Akış-zaman ölçer	88
3.6.6. Lazer profilometre	89
3.7. Saha Ölçüm Prensibi ve Planı.....	91
3.7.1. Saha ölçüm prensibi	91
3.7.2. Saha ölçüm planı.....	94
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	97
4.1. TMA Aşınma Tabakası Üzerinde Yapılan Ölçümler.....	97
4.1.1. İngiliz pandülü ile yapılan ölçümler.....	97
4.1.2. Dinamik sürtünme ölçer ile yapılan ölçümler	100
4.1.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ile yapılan ölçümler.....	103
4.1.4. Kum-yama ile yapılan ölçümler	106
4.1.5. Akış-zaman ölçer ile yapılan ölçümler	108
4.1.6. Lazer profilometre ile yapılan ölçümler	111
4.2. AB Aşınma Tabakası Üzerinde Yapılan Ölçümler	113
4.2.1. İngiliz pandülü ile yapılan ölçümler.....	113
4.2.2. Dinamik sürtünme ölçer ile yapılan ölçümler	116
4.2.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ile yapılan ölçümler.....	118
4.2.4. Kum-yama ile yapılan ölçümler	120
4.2.5. Akış-zaman ölçer ile yapılan ölçümler	122
4.2.6. Lazer profilometre ile yapılan ölçümler.....	124
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	127
5.1. Trafik Analizleri.....	127
5.2. TMA Aşınma Tabakası Analizleri.....	133
5.2.1. BPT kayma direnci analizi.....	134
5.2.2. DFT kayma direnci analizi	139
5.2.3. LWSRT kayma direnci analizi	144
5.2.4. SPT yüzey doku derinliği analizi	149
5.2.5. HT yüzey makro doku derinliği analizi.....	153
5.2.6. LP yüzey profil derinliği analizi	156
5.3. AB Aşınma Tabakası Ölçüm Sonuçları Analizleri	160
5.3.1. BPT kayma direnci analizi.....	160
5.3.2. DFT kayma direnci analizi	165
5.3.3. LWSRT kayma direnci analizi	170
5.3.4. SPT yüzey doku derinliği analizi	175
5.3.5. HT yüzey doku derinliği analizi	180
5.3.6. LP yüzey profil derinliği analizi	184
5.4. Değerlendirme ve Karşılaştırma.....	188
5.4.1. TMA ve AB aşınma kayma direnci performans karşılaştırılması	189
5.4.2. TMA ve AB aşınma yüzey doku derinliği karşılaştırılması.....	190
5.5. Özet ve Öneriler.....	192
KAYNAKLAR	195
ÖZGEÇMİŞ.....	211

ÖZET

Doktora Tezi

KARAYOLU PÜRÜZLENDİRMESİNDE CÜRUF LARIN KULLANILABİLİRLİĞİNİN VE PÜRÜZLENDİRİLMİŞ TABAKALARIN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İslam GÖKALP

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

Bir karayolu esnek üstyapısının en önemli fonksiyonlarından biri kaplama yüzeyinde araçların güvenli bir şekilde sürüşü için yüksek bir kayma direnci sağlamaktır. Bu üstyapı inşaatında yüksek cilalanma direncine ve uygun gradasyona sahip agregaların kullanılması ile sağlanabilir. Bölgenin jeolojik yapısına bağlı olarak yükleniciler yüksek kalitede agrega temin etmede zorluklarla karşılaşmakta, kaliteli agrega temin etme noktasında mesafenin artması ile taşıma maliyetleri yükselmektedir. Türkiye en az 50 PSV gibi yüksek cilalanma direnci sahip agregaların temin edilmesinde zorluklarla karşılaşan bir ülkedir. İfade edilen zorlukların üstesinden gelmek ve inşa maliyetinin düşürmek için, Türkiye Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2013 yılından beri Karayolları Teknik Şartnamesinde “Pürüzlendirme” olarak isimlendirilen bir uygulama tanımlamıştır. Bu uygulama ile cilalanma direnci en az 40 PSV olan yerel agregaların aşınma tabakalarının inşaatında kullanımını mümkün kılınmaktadır. Ama bu durumda, kaplama yüzeyin magmatik kökenli cilalanma direnci en az 50 PSV ve 1-3 mm dane boyutlarında agregaların 1,5-2,0 kg/m² miktarınca malzeme ile aşınma tabakası inşası sonrası silindir ile ilk pas yapıldıktan sonra pürüzlendirmesini gerekli kılınmıştır. Ancak, bu metot Taş Mastik Asfalt (TMA) ve Asfalt Betonu (AB) gibi kendileri için tanımlana agrega gradasyonlarına bağlı olarak farklı yüzey özelliklerine sahip iki farklı aşınma tabakası için aynıdır. Böylesi tek tip pürüzlendirme uygulamasının farklı aşınma tabakaları üzerinde aynı performansı beklemek uygun değildir. Bu tez çalışmasının çıkış noktası tanımlanan bu pürüzlendirme uygulamasında eksikler ve bu uygulamanın geliştirilmeye ihtiyaç duyulmasından ileri gelmektedir. Bu tezin amacı önerilen pürüzlendirme uygulamasının agrega türü (cüruf ve doğal), boyut (1-3; 1-5 mm), serim zamanı (silindir ile ilk pas yapıldıktan önce ve sonra) ve miktar (1,5;2;2,5 kg/m²) gibi yapım parametrelerinin gerçek trafik ve çevre koşulları altında hem TMA hem de AB aşınma tabakaları üzerinde uygulanarak, yapılan ölçümler ışığında geliştirmektir. KGM’ ne bağlı 5. Bölge müdürlüğü sınırlar içerisinde yer alan biri otoyol biri de devlet yolu üzerinde olmak üzere TMA (sekiz adet) ve AB aşınma tabakası (dokuz adet) üzerinde birçok pürüzlendirme uygulamasının yapıldığı kesimler inşa edilmiştir. Deneme kesimlerinin kayma direncinin ölçülmesinde İngiliz pandülü, dinamik sürtünme ölçer ve kilitlenen tekerlek

kayma direnci ölçme aracı kullanılmıştır. Diğer taraftan kum-yama, akış-zaman ölçer ve araca monte edilmiş lazer profilometre deneme kesimleri üzerinde yüzey doku/profil derinliği belirlenmesinde kullanılmıştır. Yaklaşık 4 yılı aşkın bir süre içerisinde deneme kesimleri üzerinden elde edilen saha ölçüm verileri çerçevesinde kayma direnci performansı ve yüzey doku/profil derinliği karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Kayma direnci ve yüzey dokusunda meydana gelen değişimler karayolları veri toplama istasyonlarından elde edilen ve KGM tarafından web sitesinden paylaşılan ve KGM 5. Bölge Müdürlüğünden yıllık ortalama günlük taşıt trafiği haritaları üzerinden belirlenen trafik verileri alınarak tüm deneme kesimleri için ortalama günlük eşdeğer standart dingil yükü değerleri ortaya konmuştur. Sonuçlar, hemen hemen bütün alternatif olarak uygulanan pürüzlendirme uygulamalarının KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasında daha iyi performans ortaya koyduğunu göstermiştir. Her iki aşınma tabakasında olmak üzere cüruflar ile inşa edilen deneme kesimlerinin doğal agregalar kullanılarak inşa edilen deneme kesimlerinde göre daha iyi kayma direnci performansı sergilemiştir. Ancak, TMA üzerinde 1-5 mm, AB aşınma üzerinde 1-3 mm boyutlarında yapılan uygulamaların daha performans göstermiştir. Buna ilaveten, 1-3 mm boyutlarında kullanılan agregaların yüzeye uygulamasının silindir ile ilk pas yapıldıktan sonra; 1-5 mm boyutlarında kullanılan agregaların yüzeye uygulamasının silindir ile ilk pas yapıldıktan önce olması pürüzlendirme uygulamalarını daha etkin kılmıştır. Ancak, ortalama yüzey doku/profil derinliği ölçümlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Toparlarsak, cürufların kaplamada pürüzlendirme malzemesi olarak kullanılması daha iyi kayma direnci performansı sağlayacaktır. Cürufların pürüzlendirme malzemesi olarak kullanılması geri kazanım ve doğal kaynakların korunmasından dolayı ekonomik ve çevresel yarar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Pürüzlendirme, kayma direnci, yüzey dokusu, agrega, cüruf.

2021, 215

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION THE USABILITY OF SLAG IN PAVEMENT GRITTING AND SURFACE PROPERTIES OF GRITTED PAVEMENT SURFACE

İslam GÖKALP

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

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet SALTAN

One of the most important function of a pavement is to provide a high skid resistant surface for a safe operation of vehicles. This can be ensured by using high polishing resistant aggregate at an appropriate gradation in pavement construction. Depending on the geological formation of the region, transportation agencies have difficulties in supplying high quality aggregates and expenses for transportation of materials increase as distance to the quality aggregate source increases. Turkey is one of country that has difficulty to obtain high quality aggregate by means of polishing resistance, which has at least polished stone value (PSV) of 50. In order to overcome mentioned difficulties and reduce construction costs; General Directorate of Highways (GDH) of Turkey has specified a new method called “*Gritting*” in Highway technical specifications since 2013. With gritting method, it was possible to use local aggregates that has a minimum PSV of at least 40 in construction wearing courses. But, in this case, covering the pavement surface is required with a high polishing resistant magmatic aggregate that has at least 50 PSV and 1-3 mm with 1,5-2,0 kg/m² amount and applying the material on surface after the rollers’ first pass. However, this method is the same for two different wearing course such as stone mastic asphalt (SMA) and asphalt concrete (AC), which have different surface properties due to the aggregate gradation specified for them. It is not feasible to expect the same performance over the courses with such a kind of monotype gritting method for two different wearing course. The motivation of thesis was the deficiencies of this specified gritting method and the need to improve this application. The objective of this thesis was to improve the proposed gritting method by investigating the effect of construction parameters such as aggregate type (slags and natural), size (1-3; 1-5 mm), spreading time (before and after the first pass of roller), and amount (1.5; 2; 2.5 kg/m²) on pavement performance under the real traffic and environmental conditions on SMA and AC layer. Numerous test section that gritting application applied on SMA (eight test section) and AC wear courses (nine test section) were constructed on a highway and state-way in the border of 5th region of GDH. British pendulum test, dynamic friction tester and locked-wheel skid resistant tester were utilized to measure skid resistance of test sections. On the other hand, sand patch test, outflow meter and vehicle-mounted laser profiler were used to determine their surface texture.

The data gather from field measurement for skid resistance performances and surface texture/profile depth throughout about four-year period were used for a comparative analysis. Changes in skid resistance and surface texture with respect to average equivalent single axle load (ESAL) data obtained from highway toll collection station and published by GDH on web site and shared by GDH 5th regional directorate were figured out for all test sections. The results showed that performance of almost all-alternative gritting application methods were better than the proposed method in HTS. The test sections constructed with slags for the two-wear course exhibited higher skid resistance values than the ones formed with natural aggregates. However, the section gritted with 1-5 mm sized aggregates on SMA and 1-3 mm sized aggregates on AC wear course showed better performance. Moreover, applying 1-3 mm materials on surface after first pass of roller and applying 1-5 mm materials before first pass of roller or after finisher make more efficient the gritting applications. However, the changes in mean-texture/profile depths were not significant for all test section formed on both wear courses. Overall, using slag in pavement gritting application provide better skid resistance performance. Using them as gritting material will provide numerous benefits by means of economic gains and environmental protection due to recovering and saving natural aggregate resources.

Keywords: Gritting, skid resistance, surface texture, aggregate, slags

2021, 215 pages

TEŞEKKÜR

Her şeyden evvel bana sağlık, sıhhat, afiyet, huzur, sabır ve ömür bahşeden yüce Allah'a (cc) hamd olsun. Zira O' nun lütfuyla bu tez çalışması tamamlanmıştır.

Akademik camiada yer almaya başladığım ilk zamanlarda kendisini Sn. Doç. Dr. Volkan Emre UZ vasıtasıyla tanımış olmanın verdiği onur ile belirtmek isterim ki; danışmanım Sn. Prof. Dr. Mehmet SALTAN' ın desteğiyle bu tez çalışmasını ulaştırma alanında otorite bir üniversitenin çatısı altında tamamlayabilmek mümkün olmuştur. Danışmanım, en zor zamanlarımda her fırsatta şahsım ile yakından ilgilenmiş, sorunlarımı çözme noktasında hakkını ödemekte yetersiz kalacağım desteklerini sunmuş ve her fırsatta bana umut kaynağı olmuştur. En derin şükran duyguları içerisinde saygılarımı kendilerine arz ediyorum.

Akademik camiaya ilk adımları birlikte attığım ve uzun yıllar birlikte yol yürüdüğüm, yüksek lisans danışmanım ve doktora öğrenimimin büyük bir kısmında danışmanlığımı yürüten, ilim/irfan/etik/ahlak noktasında hayatımda silinmez izler bırakan Sn. Doç. Dr. Volkan Emre UZ' a teşekkür ediyor en derin saygılarımı arz ediyorum. Kendisinin danışmanlığında bu doktora tezinin ilk üç yılını ve dört tez izleme komitesi raporunu kendisi Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde (ATÜ) iken tamamladığımı belirtmek isterim.

Ulaştırma alanının uzman isimleri olan tezimin jüri üyelerine (Sn. Prof. Dr. Mustafa KARAŞAHİN' e, Sn. Prof. Dr. Serdal TERZİ' ye, Sn. Prof. Dr. Mesut TIĞDEMİR' e, ve Sn. Doç. Dr. Volkan Emre UZ' a) katkılarından dolayı teşekkür eder, saygılarımı arz ederim. Süleyman Demirel Üniversitesi Rektörü Prof. Dr. İlker Hüseyin ÇARIKÇI' ya, Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü Sn. Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR' a desteklerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışması büyük bir ekibin başarılı çalışmasının sonucu ortaya çıkmıştır. Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ARGE Başmühendisliği' ne bağlı çalışan tüm personele, özellikle Mehtap TEPE hanıma şükranlarımı sunmak isterim. KGM-ARGE/2014-1 numaralı proje ile tezimi destekleyen Karayolları Genel Müdürlüğü' ne ve çalışanlarına teşekkür ediyorum.

Sn. Doç. Dr. Volkan Emre UZ' un ATÜ' de iken yüksek lisans eğitim danışmanlığını yürüttüğü İnş. Yük. Müh. Basri ERGİN başta olmak üzere bu tez çalışmasında emek veren tüm öğrencilerine ve danışmanım Sn. Prof. Dr. Mehmet SALTAN' ın öğrencilerine, özellikle Arş. Gör. Gizem KAÇAROĞLU' na teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerinin yanında dualarıyla her daim bana destek veren babama, anneme ve kardeşlerime çok teşekkür ediyorum. Koşulsuz sevgileriyle hayatımı anlamlı kılan, sabırla sıkıntılı süreçlerde bana katlanan, dualarını hiçbir zaman esirgemeyen, daima destekçim olan sevgili eşime; oğluma ve kızıma en derin duygular ile teşekkür ederim. Son olarak bu tezi "Dâr-ı fenâdan dâr-ı bekâya irtihal eyleyen büyüklerimin aziz hatıralarına" ithaf ettiğimi belirtmek isterim.

İslam GÖKALP
ISPARTA, 2021

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye jeomorfolojik haritası	2
Şekil 2.1. Kaplama yüzey dokusu ve etkileşimde olduğu unsurlar	11
Şekil 2.2. Hacimsel test metotları	15
Şekil 2.3. Lazer tabanlı ölçüm metotları	16
Şekil 3.1. Agregada deneylerinden görseller	62
Şekil 3.2. XRD ile temsili agregaların mineral içerik analizi sonuçları.....	63
Şekil 3.3. Agregaların TEM altındaki yüzey dokusu görüntüleri.....	65
Şekil 3.4. Pürüzlendirme uygulaması yapılan deneme yolları.....	70
Şekil 3.5. Pürüzlendirilmiş harç tipi kaplama numunelerinden örnekler	73
Şekil 3.6. BSK üzerinde pürüzlendirme uygulaması görselleri.....	74
Şekil 3.7. Pürüzlendirme değişkenleri kod açılımı	76
Şekil 3.8. TMA (a,b) ve aşınma (c, d) inşaat sahasında istiflenen agregalar	77
Şekil 3.9. TMA (a,b) ve aşınma (c,d) sahasında serici ayarı	78
Şekil 3.10. TMA (a, b) ve aşınma (c, d) tabakası inşaatından resimler	79
Şekil 3.11. TMA (a,b,e) ve aşınma (c,d) üzerine uygulanan pürüzlendirme	80
Şekil 3.12. İngiliz pandülü	83
Şekil 3.13. Dinamik sürtünme ölçer (a) ve saha uygulaması (b).....	85
Şekil 3.14. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı	86
Şekil 3.15. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ölçüm prensibi.....	86
Şekil 3.16. Kum-yama testi şeması (a) ve sahada uygulaması (b).....	87
Şekil 3.17. Akış-zaman ölçer.....	89
Şekil 3.18. Lazer profilometre aracı (a), ölçüm ekranı (b)	90
Şekil 3.19. TMA aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçüm noktaları şeması	92
Şekil 3.20. AB aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçüm noktaları şeması.....	93
Şekil 4.1. TMA aşınma tabakası BPT ölçüm sonuçları	99
Şekil 4.2. Eşik değer altında toplu BPT ölçüm sonuçları	100
Şekil 4.3. TMA aşınma tabakası DFT ölçüm sonuçları.....	102
Şekil 4.4. Eşik değer altında toplu DFT ölçüm sonuçları	103
Şekil 4.5. TMA aşınma tabakası LWSRT ölçüm sonuçları	105
Şekil 4.6. Eşik değer altında toplu LWSRT ölçüm sonuçları.....	105
Şekil 4.7. TMA aşınma tabakası SPT ölçüm sonuçları.....	107
Şekil 4.8. Eşik değer altında toplu SPT ölçüm sonuçları.....	108
Şekil 4.9. TMA aşınma tabakası HT ölçüm sonuçları	110
Şekil 4.10. Eşik değer altında toplu HT ölçüm sonuçları.....	110
Şekil 4.11. TMA aşınma tabakası LP ölçüm sonuçları	112
Şekil 4.12. Eşik değer altında toplu LP ölçüm sonuçları.....	113
Şekil 4.13. AB aşınma tabakası BPT ölçüm sonuçları	115
Şekil 4.14. Eşik değer altında toplu BPT ölçüm sonuçları.....	115
Şekil 4.15. AB aşınma tabakası DFT ölçüm sonuçları	117
Şekil 4.16. Eşik değer altında toplu DFT ölçüm sonuçları	118
Şekil 4.17. AB aşınma tabakası LWSRT ölçüm sonuçları	119
Şekil 4.18. Eşik değer altında toplu LWSRT ölçüm sonuçları.....	120
Şekil 4.19. AB aşınma tabakası SPT ölçüm sonuçları.....	121
Şekil 4.20. Eşik değer altında toplu SPT ölçüm sonuçları	122
Şekil 4.21. AB aşınma tabakası HT ölçüm sonuçları	123
Şekil 4.22. Eşik değer altında toplu HT ölçüm sonuçları.....	124

Şekil 4.23. AB aşınma tabakası LP ölçüm sonuçları	125
Şekil 4.24. Eşik değer altında toplu LP ölçüm sonuçları.....	126
Şekil 5.1. TMA aşınma üzerinde BPN ve ESDY arasındaki ilişki	135
Şekil 5.2. İlk ölçüm sonuçlarına göre BPN değişim oranı.....	137
Şekil 5.3. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki BPN fark.....	138
Şekil 5.4. TMA aşınma üzerinde μ ve ESDY arasındaki ilişki	140
Şekil 5.5. İlk ölçüm sonuçlarına göre DFT değişim oranı	142
Şekil 5.6. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki fark.....	143
Şekil 5.7. TMA aşınma üzerinde SN ve ESDY arasındaki ilişki	145
Şekil 5.8. İlk ölçüm sonuçlarına göre SN değişim oranı	147
Şekil 5.9. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki fark.....	148
Şekil 5.10. TMA üzerinde SPT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	150
Şekil 5.11. İlk ölçüm sonuçlarına göre SPT doku derinliği değişim oranı	152
Şekil 5.12. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasında SPT doku derinliği farkı.....	152
Şekil 5.13. TMA aşınma üzerinde HT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	154
Şekil 5.14. İlk ölçüm sonuçlarına göre HT doku derinliği değişim oranı	155
Şekil 5.15. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasında HT doku derinliği farkı.....	156
Şekil 5.16. TMA aşınma üzerinde LP profil derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	157
Şekil 5.17. İlk ölçüm sonuçlarına göre LP yüzey profil derinliği değişim oranı	159
Şekil 5.18. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki LP doku derinliği fark.....	160
Şekil 5.19. AB aşınma üzerinde BPN ve ESDY arasındaki ilişki	162
Şekil 5.20. İlk ölçüm sonuçlarına göre BPN değişim oranı.....	164
Şekil 5.21. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	165
Şekil 5.22. AB aşınma üzerinde μ ve ESDY arasındaki ilişki	167
Şekil 5.23. İlk ölçüm sonuçlarına göre DFT değişim oranı	169
Şekil 5.24. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	170
Şekil 5.25. AB aşınma üzerinde SN ve ESDY arasındaki ilişki	172
Şekil 5.26. İlk ölçüm sonuçlarına göre SN değişim oranı	174
Şekil 5.27. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	175
Şekil 5.28. AB aşınma üzerinde SPT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	177
Şekil 5.29. İlk ölçüm sonuçlarına göre SPT doku derinliği değişim oranı	178
Şekil 5.30. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	179
Şekil 5.31. AB aşınma üzerinde HT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	181
Şekil 5.32. İlk ölçüm sonuçlarına göre HT doku derinliği değişim oranı	182
Şekil 5.33. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	183
Şekil 5.34. AB aşınma üzerinde LP profil derinliği ve ESDY arasındaki ilişki	185
Şekil 5.35. İlk ölçüm sonuçlarına göre LP profil derinliği değişim oranı	187
Şekil 5.36. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark	187
Şekil 5.37. TMA aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları	189
Şekil 5.38. AB aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları.....	190
Şekil 5.39. TMA aşınma ESDY tabanlı HT doku derinliği toplu sonuçları.....	191
Şekil 5.40. AB aşınma ESDY tabanlı HT doku derinliği toplu sonuçları.....	191

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Kaba agregada aranan özellikleri	3
Çizelge 1.2. Kaplama agrega gradasyonu	5
Çizelge 2.1. Doku türleri ve kaplama-arac arasındaki etkileşimler	12
Çizelge 2.2. Makro doku ölçüm yöntemleri arasındaki bazı ölçüm modelleri	17
Çizelge 2.3. Makro doku ölçüm yöntemlerinin zayıf ve güçlü yönleri	18
Çizelge 2.4. Makro doku ortalama profil derinliği (mm) eşik değerleri	20
Çizelge 2.5. Kayma direncinin makro-dokuya göre düşüş düzeyleri	21
Çizelge 2.6. Kaplama bozulma sınıfları ve makro doku eşik değerleri	21
Çizelge 2.7. Araştırmacılar tarafından önerilen makro doku eşik değerleri	22
Çizelge 2.8. LFC prensibine sahip cihazlar ve özellikleri	25
Çizelge 2.9. SFFC prensibine sahip cihazlar ve özellikleri	27
Çizelge 2.10. Farklı kayma direnci ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması	29
Çizelge 2.11. Havaalanı kaplaması için kayma direnci eşik değerleri	33
Çizelge 2.12. Kayma direnci araştırma düzeyi eşik değerleri	34
Çizelge 2.13. Kayma direnci için önerilen müdahale için eşik değerler	35
Çizelge 3.1. Temin edilen agregalar	60
Çizelge 3.2. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri	61
Çizelge 3.3. Agregaların kimyasal içerikleri	63
Çizelge 3.4. Cürufların liç testi analiz sonuçları	68
Çizelge 3.5. Harç tipi kaplama türleri ve agrega boyut dağılımları	71
Çizelge 3.6. CRS-2 türünden katyonik emülsiyon reçetesi	72
Çizelge 3.7. Emülsiyon miktarları	72
Çizelge 3.8. Harç tipi kapmalara uygulanan pürüzlendirme değişkenleri	72
Çizelge 3.9. TMA üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme değişkenleri	75
Çizelge 3.10. AB Aşınma üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme değişkenleri	76
Çizelge 3.11. Ölçüm yöntemi cihazların ve temin edilen kurumlar	94
Çizelge 3.12. TMA aşınma üzerinde yapılan ölçümler ve tarihleri	95
Çizelge 3.13. AB Aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçümler ve tarihleri	96
Çizelge 5.1. 052 otoyolu tek yönlü (Adana-Mersin) YOGT verisi	128
Çizelge 5.2. MEST devlet yolu iki yönlü YOGT verisi	128
Çizelge 5.3. Şerit dağıtma faktörü	128
Çizelge 5.4. Taşıt eşdeğerlik faktörleri	129
Çizelge 5.5. 052 otoyoluna ait yıllık ortalama günlük ESDY verisi	130
Çizelge 5.6. MEST devlet yoluna ait yıllık ortalama günlük ESDY verisi	131
Çizelge 5.7. 052 otoyolu için toplam ESDY değerleri	132
Çizelge 5.8. MEST devlet yolu için toplam ESDY değerleri	133
Çizelge 5.9. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan BPN tabanlı ESDY	136
Çizelge 5.10. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan μ tabanlı ESDY	141
Çizelge 5.11. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SN tabanlı ESDY	146
Çizelge 5.12. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SPT tabanlı ESDY	151
Çizelge 5.13. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan LP tabanlı ESDY	158
Çizelge 5.14. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan BPN tabanlı ESDY	163
Çizelge 5.15. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan μ tabanlı ESDY	168
Çizelge 5.16. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SN tabanlı ESDY	173
Çizelge 5.17. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SPT _{0,8} tabanlı ESDY ..	178
Çizelge 5.18. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan HT _{0,8} tabanlı ESDY	182

Çizelge 5.19. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan $LP_{0,4}$ tabanlı ESDY.....186



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AB	Asfalt Betonu
AÖ	Akış Ölçer
ASTM	American Society for Testing and Materials
BG	Binoküler Görüş
BK	Beton Kaplama
BPN	İngiliz Pandülü Kayma Direnci Sayısı
BPT	İngiliz Pandülü
BSK	Bitümlü Sıcak Karışım
DFT	Dinamik Sürtünme Ölçer
DDÖ	Dairesel Doku Ölçer
FGM	Fotogrametri
EN	Avrupa Normu
ESDY	Eşdeğer Standart Dingil Yüğü
Gİ	Görüntü işleme
HT	Hidrotimer Testi
HTK	Harç Tipi Kaplama
HUD	Hesaplamaya Uygun Değil
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
KTŞ	Karayolları Teknik Şartnamesi
KY	Kum-Yama
LFC	Boyuna Sürtünme Katsayısı
LP	Lazer Profilometre
LWSRT	Kilitlenen Tekerlek Kayma Direnci Aracı
MPD	Ortalama Profil Derinliği
MTA	Maden Tetkik Arama
MTD	Ortalama Doku Derinliği
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
SFC	Yanal Kuvvet Katsayısı
SK	Sathi Kaplama
SMTD	Sensör Tabanlı Makro Doku Derinliği
SN	Kilitlenen Tekerlek Kayma Direnci Aracı Kayma Direnci Sayısı
SPT	Kum Yama testi
SSMM	Sabit veya Düşük Hızda Ölçüm
TEF	Taşıt eşdeğerlik faktörü
TMA	Taş Mastik Asfalt
TS	Türk Standartları
TTD	Tahmin Edilen Doku Derinliği
WHO	Dünya Sağlık Örgütü
XRD	X-Işını Kırınımı
XRF	X-Işını Floresan Spektrometresi
kPa	Kilo Paskal
mm	Milimetre
μ	Dinamik Sürtünme Ölçer Kayma Direnci Kat Sayısı

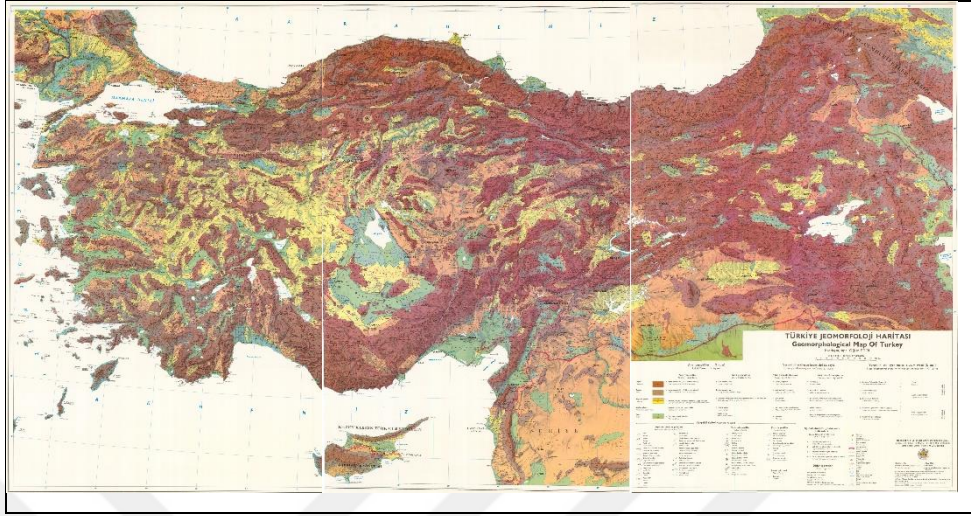
1. GİRİŞ

Yol üstyapısı ömür döngüsü içerisinde kullanıcılara konforlu ve güvenli bir sürüş sağlamalıdır. Yol yüzey özellikleri uygun ve yeterli kayma direnci performansı ve yüzey dokusu yol üstyapısından beklenen sürüş konforunu ve güven sağlayacak iki temel parametredir (Praticò ve Vaiana, 2013). Yol yüzey özellikleri ve sergiledikleri performans birçok faktörden etkilenmektedir. Bunlar, üstyapı inşaatında kullanılan malzememe türü, miktarı ve gradasyonu, inşa, bakım ve onarım teknikleri ve yeterliliği, çevresel koşullar, yolun hizmet vereceği trafik hacmi ve yol üzerinde seyreden araç özellikleri sayılabilir. Ancak, yol kaplamasının büyük bir kısmını (%90-95 kütlece, %70-80 hacimce) iskeletini oluşturan agrega yol yüzey özellikleri üzerinde ve kaplamanın yapısal ve fonksiyonel performansı üzerinde en etkili parametredir (Gökalp vd., 2016).

Agregalar, doğal olarak kırılmış kayalardan, endüstriyel üretim sonucunda oluşan yan ürünlerden, yıkım atıklarından veya geri dönüştürülmüş bir dizi farklı malzemelerden oluşabilmektedir. Agrega kökeni ve tabii tutuldukları üretim işlemine bağlı olarak farklı fiziksel ve mekanik ve kimyasal içeriği sahip olabilmektedir (MIRO, 2018). Yol üstyapılarında dayanıklı, sert, kübik agregalar kullanılmaktadır. Yol üstyapı tabakasına bağlı olarak agregalardan anılan özelilerinin yanı sıra aşınmaya/cilalanmaya karşı direncinin yüksek olması beklenen bir durumdur. Zira yol yüzeyinde yüksek kayma direnci sağlanmasında cilalanma direnci yüksek agregalar rol almaktadır (Bessa vd., 2014; Krutilová ve Přikryl, 2017; Ortiz ve Mahmoud, 2014).

Ülkelerin veya bölgelerin jeomorfolojik yapısı agrega kaynaklarının çeşitliliği gösteren bir ölçüdür. Doğal agrega kaynaklarının dayanıklı olması ilgili bölgenin jeomorfolojik yapısı ile direkt ilişkilidir. Volkanik, sedimenter ve başkalaşım kökenli agregalar doğal agrega türleri olarak sıralamak mümkündür. Ülkemiz, Türkiye, Maden Tetkik Arama (MTA) genel müdürlüğü tarafından hazırlanan ve Şekil 1.1' de verilen 1/1.000.000 ölçekli Türkiye jeomorfoloji haritası (MTA, 2019) incelendiğinde sedimenter kökenli agrega kaynaklarının ülkenin genelini

kapsadığını ifade etmek gerekir. Ancak, sedimenter kayalar diğer kayalara nazaran daha dayanıksız ve aşınmaya (cilalanmaya) karşı dirençli daha düşüktür.



Şekil 1.1. Türkiye jeomorfolojik haritası

Bu tez çalışmasında, ülkemizin, özellikle bazı bölgelerde, jeomorfolojik yapısı cilalanma direnci yüksek agregaların temin edilmesinde bir zorluk oluşturmaktadır. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ülke/bölge jeolojik yapısı gereği mevcut kaynaklar ile konfor ve güvenlik esaslı yolların inşa edilmesini sağlamak amacıyla yol üstyapısının kayma direncinin artırılması noktasında 2013 yılında Karayolu Teknik Şartnamesinde (KTŞ) tanımlanan **Pürüzlendirme Uygulaması** tanımlanmıştır. Bu uygulama ile yol üstyapısının düşük cilalanma direncine sahip agrega kaynakları ile inşa edilmesine imkân verilmiş, yol üstyapısının kayma direnci performansında mevcut koşullar altında artırılması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması, ülkemizde henüz bir uygulanması olmayan bu yöntemin yapılan saha uygulamaları üzerinden elde edilecek veriler yardımıyla farklı parametreler ışığında önerilen pürüzlendirme uygulamasının etkinliği araştırılmışını, agregatabanlı parametreler ekseninde alternatif uygulamalar yapılarak pürüzlendirme uygulamasını geliştirmeye yönelik çalışmaları kapsamaktadır. KTŞ' de iki farklı bölümde (Kısım 407- Kısım 408) tanımlanan bu uygulamanın detayları aşağıda verilmiştir.

KTŞ Kısım 407'de Asfalt Betonu (AB) aşınma tabakasında kullanılacak kaba agreganın sağlaması gereken fiziksel ve mekanik özellikler tanımlanmıştır. Bu tabakada kullanılacak agreganın cilalanma değerinin 50 veya üstü olması gerektiği belirtilmiştir. Zorunlu nedenlerden dolayı (tanımlanan özellikleri sağlayan agregaların bulunamaması veya temininde ekonomik koşulların sağlanamaması vb.) cilalanma değeri 50'den daha düşük olan agregaların kullanılabileceği belirtilmiştir. KTŞ' de üstyapı tabakasının inşasında kullanılacak agregaların cilalanma değerinin en az 40 olması gerekliliği net bir şekilde ortaya konulmuştur. Benzer bir şekilde KTŞ Kısım 408'de Taş Mastik Asfalt (TMA) aşınma tabakasında da bu durum görülmektedir. TMA aşınma Tip-1-B karışımlarında, magmatik kökenli agrega temin edilememesi veya yol inşaatına mesafesinin magmatik kökenli ocaktan en çok 100 km daha az olması koşuluyla, Karayolları 11. ve 13. Bölge Müdürlükleri (Van ve Antalya) içerisinde pürüzlendirme uygulamasının yapılabileceği belirtilmiştir. Ancak agregaların Çizelge 1.1' de verilen teknik özelliklerin sağlanması şartı ve idarenin onayı ile yüzeyin magmatik bir agrega ile pürüzlendirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Gökalp ve Uz, 2017c; KGM, 2013a; Uz vd., 2014).

Çizelge 1.1. Kaba agregada aranan özellikleri

Deney	Birim	Deney Standardı	Şartname Limitleri	
			Kısım 407 AB Aşınma	Kısım 408 TMA
Parçalanma Direnci Los Angeles	%	TS EN 1097-2 AASHTO T 96	≤ 27	≤ 25
Aşınma Direnci Micro Deval	%	TS EN 1097-1	≤ 20	≤ 20
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık (MgSO4 Solüsyonu)	%	TS EN 1367-2	16	14
Kırılmışlık, Ağırlıkça (Tüm yüzeyi kırılmış- yuvarlak)	%	TS EN 933-5	≥ 95 - ≤ 0	≥ 100 - ≤ 0
Yassılık İndeksi	%	TS EN 933-3	≤ 20	≤ 20
Cilalanma Değeri	PSV	TS EN 1097-8	≥ 50	≥ 50
Su Emme	%	TS EN 1097-6	≤ 2,0	≤ 2,0
Soyulma Direnci	%	TS EN 10697-11 (Kısım 403 Ek-A)	≥ 60	≥ 60
Kil Topakları ve Ufalabilir Daneler	%	ASTM C 142 AASHTO T 112	≤ 0,3	0

KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulaması belli miktarlarda ve boyutlarda yüksek cilalanma direncine sahip belli kökenden agregaların kullanılması zorunlu tutulmuş, aynı zamanda imalat sırasında uygulamanın ne zaman yapılacağı da tanımlanmıştır. Tanımlanan bu parametreler şu şekildedir.

1. Cilalanma değeri: 50 ve üstü agrega
2. Agrega dane boyutu: 1-3 mm,
3. Agrega serim miktarı: 1,5-2,0 kg/m²
4. Kayaç kökeni: magmatik,
5. Agrega uygulama zamanı: silindirle ilk pas yapıldıktan sonra.

Yukarıdaki kıstasların yanı sıra homojen bir serme işleminin gerçekleştirilebilmesi ve eş zamanlı sıkıştırma işleminin yapılabilmesi açısından pürüzlendirme uygulaması silindire monte edilmiş bir serici ile yapılması önerilmektedir.

KTŞ' de AB aşınma ve TMA tabakalarında kullanılacak kaba agreganın cilalanma değerinin en az 50 olması, dayanıklı ve cilalanma direnci yüksek olmasından magmatik kökenli agregaların kullanılması şartı aranmaktadır. Yukarıda ifade edildiği üzere ülkemizin jeolojik yapısından dolayı en yaygın olarak karşılaşılan kayaç türünün kireçtaşı olduğu bir gerçektir. Birçok bilimsel çalışmada (Akacem vd., 2016; Behiry, 2013; Nitta vd., 1990; Yılmaz vd., 2012) ifade edildiği gibi kireç taşlarının cilalanmaya karşı dirençleri diğer doğal agregalara kıyasla daha düşüktür. Zira KGM bünyesinde aktif olarak hizmet veren kireçtaşı ocaklarından alınan numunelere yapılan cilalanma deneylerinden de bu durum net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, ülkemiz özellikle dağlık ve karmaşık bir arazi yapısına sahip olması (Ates vd., 1999; Moore vd., 1991) cilalanma direnci yüksek agreganın temin edilmesinde engel teşkil etmektedir. Bu durum, agregaların sahaya ulaştırılmasında 100 km'den daha fazla bir erişim mesafe gerektireceğinden hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygunsuzluk çıkarmaktadır.

AB ve TMA farklı yapısal özelliklere sahip olan aşınma tabakalarıdır. Nitekim KTŞ' de ilgili tabakaları inşasında kullanılacak agrega gradasyonunda da farklılık görülmektedir (Çizelge 1.2). Ancak, tek tip olarak önerilen pürüzlendirme uygulamasının her iki tabaka için önerildiği görülmemektedir.

Çizelge 1.2. Kaplama agrega gradasyonu

Elek Boyutu (mm)	Kısım 407 AB Aşınma % Geçen			Kısım 408 TMA Aşınma			
				Tip-1 % Geçen		Tip 2 % Geçen	Tolerans Limitleri
	Tip-1	Tip-2	Tip-3	A	B	-	-
19,00	100	-	-	100	100	-	-
12,50	88-100	100	100	90-100	90-100	100	±4
9,50	72-90	80-100	90-100	50-75	50-67	90-100	±4
6,00	-	-	25-33	-	-	-	-
4,75	42-52	55-72	23-31	25-40	25-35	25-45	±3
2,00	25-35	36-53	20-27	20-30	20-30	20-30	±3
0,425	10-20	16-28	12-18	12-22	12-22	12-22	±3
0,180	7-14	8-16	-	9-17	9-17	9-17	±3
0,075	3-8	4-8	7-11	8-12	8-12	8-12	±2

Çizelge 1.2 incelendiğinde, AB aşınma ve TMA tabakalarının için tanımlanan farklı gradasyonlar, inşa sonrasında tabakaların yüzey dokularında farklılığa neden olacaktır (Gatchalian vd., 2006; Kim ve Lee, 2005; Rezaei vd., 2011; Rezaei vd., 2009; Shen vd., 2005). Netice itibari ile her iki tür kaplama için aynı pürüzlendirme uygulamasını uygulamak doğru bir yaklaşım olmayacaktır.

Ülkemizin farklı bölgelerinde, Kısım 407 ve Kısım 408'de aranılan özelliklerdeki agrega temininde yaşanan zorluklar inşa edilecek kaplamanın maliyetini yüksek olmasına neden olacaktır. Bu durum, KGM idarecilerini kaplamanın kayma direnci üzerinde önemli etkisi olan agregaların cilalanma değerini aşağıya çekmeye ve kaymaya karşı direncin tekrar geri kazanılması içinde çözüm arayışına zorlamıştır. Ekonomikliğin yanı sıra çevreci bir çözüm arayışı neticesinde, idareden onay alınmak suretiyle bu tür kaplama tabakaların inşaatında, cilalanma değerinin en az 40 olan kaba agreganın kullanılabileceği şartlı olarak önerilmiştir. Bu arayışlar sonucunda, söz konusu imalat sırasında

kaplamanın yüzeyinin cilalanma direnci yüksek (50 ve üzeri) bir agregaya ile pürüzlendirilmesi yönündeki bir uygulama KTŞ' de kendisine yer bulmuştur. Yapılacak bu pürüzlendirme uygulamasında, kaplamanın kendisinden beklenen diğer yapısal ve fonksiyonel özellikleri yerine getirmesi koşulu aranmaktadır. Bu şekilde, KGM idaresi tüm tabaka derinliği boyunca cilalanma değeri yüksek agregaya (temini zor veya bazen imkânsız,) kullanmak yerine yalnızca trafiğin aşındırıcı etkisine direkt olarak maruz kalan kaplama yüzeyinde aşınma/cilalanma bakımından daha kaliteli veya dirençli malzeme kullanılması ve bu sayede yüksek kaliteli agregaya ihtiyacını en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

Ülkemizde KTŞ' sinde kendisine uygulamada henüz yer bulmamış bir uygulama olmasına rağmen, sınırlı da olsa dünyada bu uygulamaya benzer uygulamaların olduğu bilinmektedir. Bu uygulamalarda KTŞ' de belirtilen tek tip agregaya, tür, boyut ve miktar kullanımından farklı olarak; farklı tür agregaların farklı boyutlarda, farklı miktarlarda ve farklı uygulama koşullarında yapıldığı görülecektir. Örnek verilen bu uygulamalarda, sadece magmatik kayalar değil, benzer yüksek cilalanma direnci değeri gösteren diğer doğal (kuvars, granit vb.) agregalar ve alternatif olarak endüstriyel yan ürünlerden olan demir/çelik çürüfları gibi yüksek cilalanma direncine ve özelde doğal agregaya nazaran daha iyi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip atıklar da kullanılmıştır.

KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasındaki belirsizlikler/ eksiklikler/ yetersizlikler bu tez konusunun çıkış noktasını oluşturmuştur ve agregaya eksenli farklı parametreler kullanılarak kapsam oluşturulmuştur. Tez kapsamında doğrultusunda elektrik ark fırın çürufu, Ferrochrom çürufu, bazalt, dere malzemesi ve kireçtaşı kökenli olmak üzere alternatif olabilecek agregalar tedarik edilmiştir. Laboratuvar tabanlı ve saha çalışmaları yapılarak önceki çalışmalar, KGM idari ve teknik personellerin bilgi paylaşımları ışığında pürüzlendirme uygulaması parametreleri belirlenmiştir. Biri devlet yolu diğeri otoyol olmak üzere iki farklı yol kesiminde toplam da 8 kilometreyi bulan AB aşınma ve TMA kaplamaları inşa edilmiş ve bunların üzerinde yaklaşık 20 adet tanımlanan parametreler doğrultusunda pürüzlendirme uygulama deneme kesimi imal edilmiştir. Otoyolda inşa edilmiş TMA tabakası üzerine tatbik edilen

pürüzlendirilmiş deneme kesimlerinin yaklaşık 3 yıl, devlet yoluna inşa edilmiş AB aşınma tabakası üzerindeki pürüzlendirilmiş deneme kesimleri de yaklaşık 2 yıl süresince yüzey özelliklerinde meydana gelen değişim ölçülmüştür. Ölçümler, kayma direnci performansı ve yüzey doku/profil derinliği tabanlı olup farklı prensiplere sahip metotlar ölçüm ve analizlerde kullanılmıştır. Kayma direnci ölçümünde (1) İngiliz pandülü, (2) dinamik sürtünme ölçer, (3) kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı; yüzey doku/profil derinliğinin ölçmede ise (1) kum-yama, (2) akış-zaman ölçer, (3) lazer profilometre kullanılmıştır. Anılan yöntemler ile elde edilen bulgular/sonuçlar ışığında çeşitli analizler yapılarak performans değerlendirilmesi yapılmış olup tez kapsamında oluşturulan araştırma sorularına cevap aranmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tezin konusu ile ilişkilendirilen kavramlar ve bilimsel çalışmalar bu kısımda sistematik bir şekilde sunulmuştur.

2.1. Trafik Kazaları

Bugün, ulaştırma endüstrisi insanlara demiryolu, denizyolu ve havayolu gibi birçok seçenek sunmaktadır. Ancak karayolu ulaşımı en çok tercih edilen ulaşım modudur (Msallam vd., 2017). Trafik kazaları, tüm dünyada karayolu ulaşım moduyla ilgili en önemli sorunlardan birisi olarak anılmakta ve sonuçları itibariyle maddi ve manevi büyük kayıplara neden olmaktadır. Maddi kayıp olarak araçların hasar görmesi veya kullanılmaz hale gelmesi, mal kayıpları vb. sayılabilirken, manevi kayıp olarak da ölümler, yaralanmalar ve sakatlanmalar olması şeklinde örneklendirilebilir (Gökalp ve Uz, 2019). Karayolu trafik kazaları ölüm nedenleri içerisinde 9. sıra ile önde gelen ölüm sebeplerinden olmaktadır. Dünya çapındaki tüm ölümlerin % 2,2 si trafik kazaları sonucunda meydana gelmektedir. Dünya çapında trafik kazalarının neden olduğu maddi kaybın karşılığı ise yaklaşık 520 milyon dolar olduğu öngörülmektedir (Sungur vd., 2014). Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından yayımlanan rapor, karayolu kazalarında her yıl yaklaşık 1,3 milyon kişinin ölmekte olduğunu (günlük 3.287 ölüm) ve 20-50 milyon insanın yaralandığını veya sakatlandığını ortaya koymaktadır (WHO, 2018).

Ülkemizde, 2017 yılında yük taşımacılığının %5,6'sı demiryolu, % 4,4 ü denizyolu ve % 0,0' i hava yolu ulaşımı ile sağlanırken karayolu taşımacılığında ise bu oran % 90' ı bulmaktadır. Yolcu taşımacılığında durum ise oransal olarak % 1,0' ı demiryolu, % 9,6' sı havayolu ve % 0,5'i denizyolu ile %88,9 da karayolundan oluşmaktadır. Avrupa birliği ülkeleri için bakıldığında ise yolcu ve yük taşımacılığının % 72'si karayolundan sağlandığı rapor edilmiştir (KGM, 2018). Bu durum, ülkelerin gelişmişlik düzeyine bakılmaksızın yük ve yolcu taşımacılığının yoğun olarak yapıldığı karayolları üzerinde, kaçınılmaz olarak, trafik kazaları meydana gelmektedir.

Trafik kazalarının oluşumuna davranışsal, teknolojik ve çevresel faktörlerin etki ettiği uzun zamandır bilinmektedir (Edwards, 1999). Trafik güvenliği, birbiriyle etkileşim içinde çok boyutlu bir sorun ve çözümü için derin bilgi ve tecrübeye ihtiyaç duyulan bir kavram olarak ortaya çıkmaktadır. Önceki çalışmalar trafik kazalarında üç temel faktörün varlığına işaret etmektedir. Bunlar; sırasıyla insan faktörleri, yol ve yol çevresi faktörleri ve araç faktörleridir. Kaza oluşumuna neden olan faktörler içerisindeki payları ise sırasıyla yaklaşık olarak % 95, % 28 ve % 8'dir (Hayakawa vd., 2000; Hıjar vd., 2000; Ihs, 2005; Pakgohar vd., 2011). Lankarani vd. (2014) tarafından, İran'daki trafik kazalarının % 97,5'inde insan kaynaklı % 70,5'inde çevresel ve % 31,5'inde ise araç kaynaklı faktörlerin payı olduğu belirtilmiştir. 2008-2017 yılları arasında meydana gelen ölümlü-yaralanmalı kazalardaki kusur oranlarına yer verilen bir raporda (KGM, 2019), kusur türü olarak da üç ana başlık belirtilmiştir. Bunlar, insan, taşıt ve yol kaynaklı kusurlardır. İnsan faktörünün toplamda %98,3-99,3 arasında değiştiği belirtilen raporda, insan temelli kusur oranlarını da sürücü için % 88,9-90,3, yaya için % 8,3-9,7 ve yolcu için % 0,4-0,5 arasında olduğu ifade edilmiştir. Diğer iki unsurdan biri olan taşıt için bu oran %0,3-0,9 arasında iken yol kaynaklı için ise %0,4-0,8 olarak belirlenmiştir.

Araştırmalar ışığında, karayolu trafik güvenliğine birçok faktörün etki ettiği açıktır. Bu faktörleri üç ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlar; alkol kullanımı, cep telefonu kullanımı vb. gibi **sürücü kusurları**, hız, araç güvenlik ve konforu, akışkanlık vb. gibi **araç özellikleri** ve yol geometrik ve yüzey özellikleri, kavşaklarda görüş vb. gibi **yol teknik özellikleridir** (Akçay, 2011; Ansari vd., 2000; Hayakawa vd., 2000; Karaoğlu, 2019). Bu tez kapsamında konusunu oluşturan yol teknik özelliklerinin ve bakım/onarım çalışmalarının trafik güvenliği üzerinde büyük bir öneme sahip olduğu bilinmektedir (Sengoz vd., 2012). Karayolu güvenliğini artırmak ile trafik kazalarından kaynaklanan yaralanma ve ölümlerin miktarını azaltmak mümkündür (Aworemi vd., 2010; Dudziak vd., 2014; Hıjar vd., 2000). Örneğin, yol kaplaması kayma direnci performansının trafik kazaları üzerindeki etkisiyle ilgili yapılan çalışmalar yol kayma direncini artırmanın trafik kazalarını önemli miktarda azalttığını

göstermektedir (Mayora ve Piña, 2009; Saplioglu vd., 2013; Wang vd., 2015; Woodward vd., 2016).

Bu tez kapsamında yol yüzey doku özelliklerinin çeşitli pürüzlendirme uygulamaları sonrasındaki değişimi ve pürüzlendirilmiş yol üstyapısının kayma direnci performansı araştırıldığından, bu kavramların detaylıca sunulmasına ihtiyaç duyulmuştur.

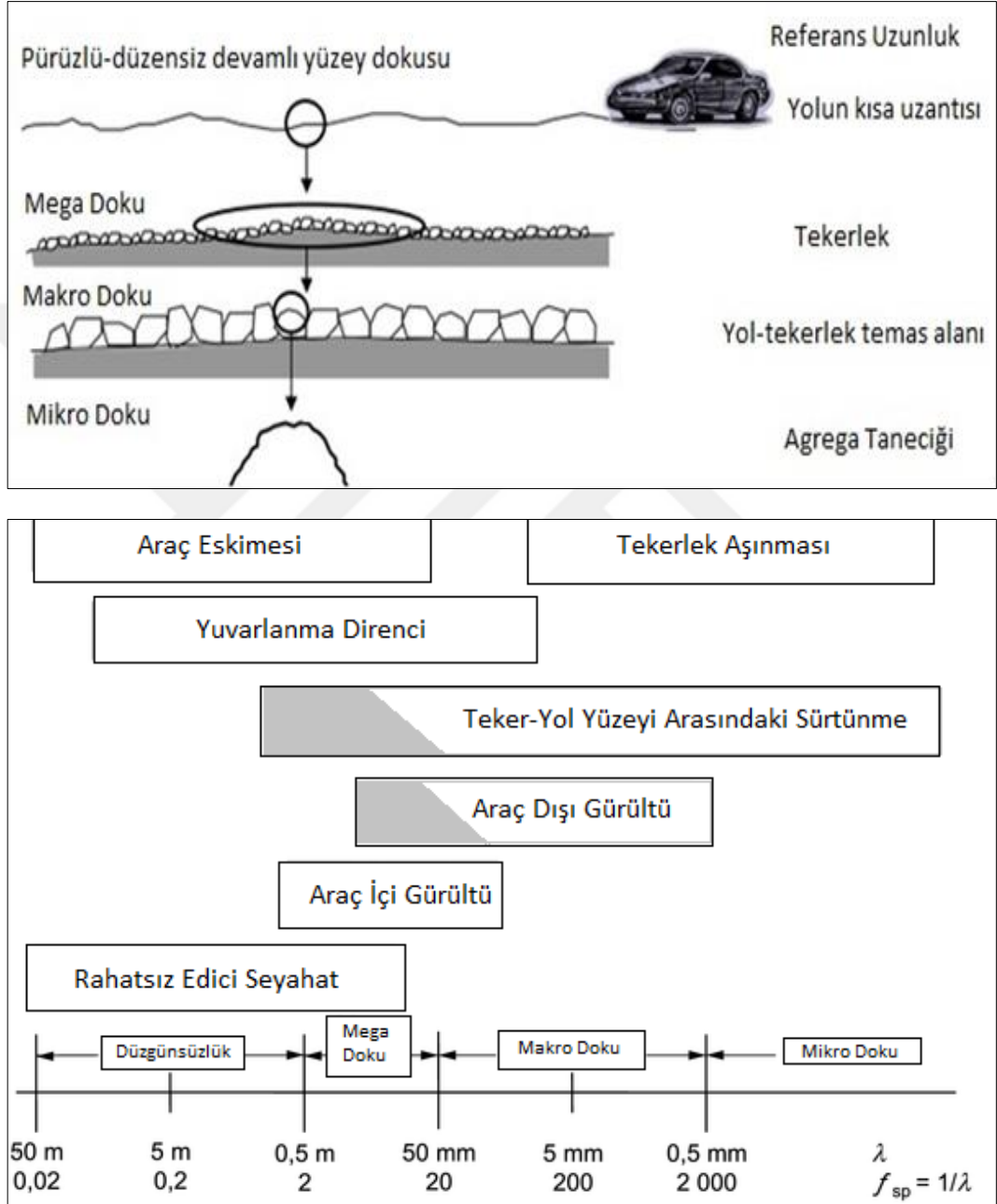
2.2. Kaplama Yüzey Özellikleri

Karayolu yüzey dokusu üstyapının fonksiyonel kalitesi ve trafik güvenliği üzerinde oldukça etkili bir parametredir (Uz ve Gökarp, 2017b), Üstyapı işletim sistemi içinde çalışan mühendisler için karayolu üstyapı performansı ve kalan ömür tahmini açısından yüzey doku özelliklerinin bilinmesi oldukça önemli kavramlardandır.

Kaplama yüzey dokusu, agrega mineralojisi, boyutu ve gradasyonu, yüzey boşlukları, yol kaplaması inşa teknikleri ve yüzey aşınmasına bağlıdır. Kaplama yüzeyinin düz bir yatay düzlemden sapan düzensizlikleri kaplama yüzey dokusu olarak bilinir. Yüzey dokusu, genlik ve dalga boyu olarak tanımlanan boyutlarına bağlı olarak, araç-kaplama etkileşimini birçok açıdan etkiler. Bunlar; kaymaya karşı direnç, lastik-kaplama gürültüsü, su sıçratma ve püskürtme, yuvarlanma direnci ve lastik aşınmasıdır (Praticò vd., 2015; Uz ve Gökarp, 2017a; Zhang vd., 2020).

Kaplama yüzey dokusu, periyodik ve tekrarlanan eğrilerin parçaları arasındaki mesafeye bağlı olarak mikro, makro, mega doku ve düzgünsüzlük olmak üzere dört ana kategoriye ayrılır (Şekil 2.1). Mikro doku, yatay yönde dalga boyu (frekans) 0,5 mm den küçük ve düşey büyüklüğü (şiddet) 0,2 mm den az olan sapmaları ifade eder ve agrega tanelerinin yüzey dokusu tarafından kontrol edilir. Makro doku, frekansı 0,5 mm ile 50 mm ve şiddeti 0,1 mm ile 20 mm arasında değişen dokudur. Bu yüzey dokusu türü agrega boyutları ve aralarındaki boşluklar tarafından kontrol edilir. Mega doku ise 50 mm ile 500 mm frekansa ve

0,1 mm ile 50 mm arasında değişen şiddete sahip sapmalardır. Yol yüzeyindeki büyük ölçekli bozulmaların ve kusurların oluşturduğu doku olarak da bilinmektedir. Düzgünsüzlük ise 500 mm den daha büyük dalga boylarına sahip doku türü için kullanılır (Hall vd., 2009; Kogbara vd., 2016; PIARC, 1987).



Şekil 2.1. Kaplama yüzey dokusu ve etkileşimde olduğu unsurlar

Şekil 2.1' de görüleceği gibi makro ve mikro doku kayma direnci açısından oldukça önemli parametrelerdir ve kaplama yüzeyi ile araç lastiği arasında

sürtünmenin gelişmesi için gereklidir. Yuvarlanma direnci, sürüş kalitesi ve araç aşınma özellikleri büyük oranda mega-doku ve düzgünsüzlüğe bağlıdır. Araç içi ve dış gürültü seviyeleri de ağırlıklı olarak makro ve mega dokudan etkilenmektedir. Ayrıca, yüzeyin düzgün olmayan bir yolun, seyahat konforunu olumsuz yönde etkilemekte ve rahatsız edici düzeyde bir seyahate neden olmaktadır. Kaplamanın sürtünme, drenaj, gürültü ve konfor gibi özellikleri yüzey dokusu tarafından kontrol edildiğinden yüzey dokusunun sürekli takibi oldukça önemlidir.

Kaplama-taşıt etkileşimine üstyapının yüzeysel özelliklerinin yanı sıra maruz kaldıkları çevresel koşulların (yağış, sıcaklık, kirlilik vb.) ve araç özelliklerinin (hız, boyut, kütle ve süspansiyon) de etkisi vardır. Kaplama doku tipleri ve kaplama-arac etkileşimleri arasındaki ilişki birçok araştırmacı ve kurum tarafından tanımlanmıştır (Ech vd., 2009; Loprencipe ve Cantisani, 2013; PIARC, 1987), özet halinde Çizelge 2.1 doku türleri ve kaplama-arac arasındaki etkileşimler verilmiştir.

Çizelge 2.1. Doku türleri ve kaplama-arac arasındaki etkileşimler

Doku Türü	Etki eden Parametreler	Etkilenen Parametreler
Mikro	Agrega yüzeyi, parçacık şekli ve köşelilik, Çimento harcı ve bitüm dokusu, Kaplama yüzey dokusu, Beton döşeme oluklarının kenarları	Her hızda ıslak kaplama üzerindeki kayma direnci Her hızda kuru ancak nemli kaplama üzerindeki kayma direnci Araç içinde ve dışında Yüksek frekansta oluşan gürültü
Makro	Karışım tasarımı: agrega boyutu, şekli, yerleşimi ve düzeni Yüzey bakım ve onarımı sırasında agrega serimi Agrega kaybı, yüzey çatlakları ve geniş bağlantılar Kaplama yüzeysel drenaj özellikleri	Orta ve yüksek hızlarda ıslak kaplama üzerinde kayma direnci Su sıçratma Araç içinde ve dışında yüksek ve düşük frekansta oluşan gürültü Tekerlek yuvarlanma direnci Kaplamaların görünürlük özellikleri
Mega	Malzeme türü özellikleri Serim ve sıkıştırma düzenliliği	Araç kontrol ve dengesi

	Tekerlek izi, ondülasyon malzeme kaybı, oyulma, çatlak noktalarında parçalanma, buzlanma Bölgesel bakım planları ve onarımlar	Yüksek frekanslarda direksiyon ve viteste oluşan mekanik titreşim kaynaklı konfor Su toplanması nedeniyle kaplama ve tekerlek temas kaybı, Yol boyu titreşim Araç dışında yüksek frekansta oluşan gürültü
Düzensizlik (Kısa)	Malzeme serim kalitesi Trafik yüklerinden kaynaklı bozulmalar Don hasarları	Kaplama ve tekerlek temasındaki kayıpların neden olduğu direksiyon hâkimiyet kaybı Yüksek frekanslarda titreşim kaynaklı konfor, Yakıt tüketimi, Araç dışında yüksek frekansta oluşan gürültü Yol boyu titreşim
Düzensizlik (Uzun)	Serim ekipmanlarının sistem ayarlanması Düzleştirme Alt temel deformasyonları	Araç stabilizesi Yüksek frekanslarda titreşim kaynaklı konfor, Yakıt tüketimi Ses ötesi titreşim

Kaplama yüzey doku türlerinden makro doku bu tez kapsamında farklı ölçüm yöntemlerine dayandırılarak araştırılmıştır. Çizelge 2.1’de verildiği üzere kaplama yüzey makro dokusu birçok parametreden etkilenebilmektedir. Bunlar, karışım tasarım parametrelerinden agrega boyutu, şekli, yerleşim ve düzeni olabileceği gibi üzerine uygulanacak yüzeysel bakım veya onarım işlemlerinden kaynaklı da olabilmektedir. Zira bu tez kapsamında farklı kaynaklardan agregalar kullanılmış, kaplama yüzeyinin kayma direnci performansının artırılması amacıyla pürüzlendirme uygulaması yapılmıştır. Bu uygulamanın kaplama yüzey doku ve kayma direnci performans özelliklerini etkileyeceği açıktır. Pürüzlendirme uygulaması neticesinde meydana gelebilecek doku değişimi gözlemleyebilmek için ölçümlere ihtiyaç duyulmuş, bu minvalde çeşitli yöntemlerle doku derinlik ölçümlerinin yapılmasına karar verilmiştir. Farklı yöntemlere sahip çeşitli makro doku ölçüm araçları/test yöntemleri mevcut olduğundan bunlar hakkında detaylı bilgi bu sıradaki alt başlık altında verilmiştir.

2.3. Makro Doku Ölçüm Yöntemleri

Bir kaplamanın makro dokusu, akış-zaman ölçer ve kum yama gibi hacimsel tabanlı metotlar; lazer profilometre, lazer tarayıcı ve dairesel doku ölçer gibi lazer tabanlı metotlar ve X-ray, bilgisayarlı kesityazar, görüntü işleme ve fotogrametri gibi görüntüleme metotları kullanılarak ölçülebilmektedir (Gökalp ve Uz, 2017b). Bu metotlarda ölçüm teknikleri birbirinden farklı olduğundan farklı yöntemler ile elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak verildiği çalışmalar yapılmış ve test metotları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır (Bitelli vd., 2012; Praticò ve Vaiana, 2015; Prowell ve Hanson, 2005; Sengoz vd., 2012; Uz ve Gökalp, 2017a). Çalışmanın bu bölümünde bu test metotlarına yer verilecek ve bunlar arasında önceki çalışmalarda var olan ölçüm modelleri ile ilgili çalışmalara değinilecektir.

2.3.1. Hacimsel tabanlı ölçüm yöntemleri

Her ne kadar son yıllarda makro doku derinliğinin ölçümü için alternatif metotlar geliştirilse de hacimsel ölçüm metotları en yaygın olarak kullanılan ve en çok kabul görmüş metotlardır. Hacimsel metotların tercih edilme sebepleri, portatif, ekonomik, kolay uygulanabilir ve anlaşılabilir oluşlarıdır. Bunun yanında sonuçların yavaş alınması, sahada ölçüm yapılacak şeridin trafiğe kapatılması, tekrarlanabilirliğin diğer metotlara göre düşük oluşu, operatörün güvenlik sorunu, hava ve çevre koşullarına bağlı oluşu gibi nedenler de dezavantajları olarak sayılabilir. ASTM E 965 standardında tanımlanmış kum yama metodu en çok kullanılan ve en çok kabul görmüş makro doku ölçüm metodudur. Bu metotta hacmi bilinen belirli gradasyondaki kum kaplama yüzeyine dairesel bir şekil oluşturacak şekilde yayılır ve oluşan dairesel olarak çapı ölçülür ve ortalama doku derinliği hesaplanır. Yüzey makro doku derinliğinin tayin edilmesinde kullanılan diğer bir hacimsel metot ASTM E 2380 standardında tanımlanmış akış-zaman ölçer metodudur. Testte, belirli bir hacimdeki suyun cihaz tabanı ile kaplama yüzeyi arasından kaçması için gerekli olan zaman ölçülür. Test, kaplama dokusundaki yerel değişimlere karşı son derece hassastır ve tekrarlanabilirliği zayıf ve kuvvetle operatöre bağlıdır (ASTM, 2019; Flintsch vd., 2003; Mahboob

Kanafi vd., 2015; Martino ve Weissmann, 2008; Praticò vd., 2015; Sezen ve Fisco, 2013). Bu test yöntemlerine ilişkin görseller Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2. Hacimsel test metotları

Kaplama doku ölçümlerinde hacimsel test metotlarının (kum yama ve akış-zaman ölçer) uygulanmasına odaklanmış çalışmalar yapılmıştır. Doty (1975)' nin yaptığı bir çalışmada, test yerleri açık ve yoğun gradasyona sahip asfalt betonu, sathi kaplama ve örtü tabakalı (fog-sealed) asfalt betonu ve portland beton kaplama olarak seçilmiştir. Test sonuçları, kum yama testinin tekrarlanabilirliğinin zayıf olduğunu ve akış-zaman ölçer test sonuçlarının ise suyun sıcaklığına bağlı olmadığını göstermiştir. Asfalt kaplamalardan aldıkları örnekler laboratuvarında kayma direnci değerlendirmesinde kullanmışlardır. Kum yama ve akış-zaman ölçer test metotları örneklerin yüzey dokusunu değerlendirmek için kullanılmış ve iki testin doğruluğunu etkileyen değişkenler araştırılmıştır. Çalışmada akış-zaman ölçer testinin kum yama metodundan daha güvenilir sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ayrıca, kum yama sonuçlarında operatörler arası tekrarlanabilirliğin zayıf olduğu raporlanmıştır.

2.3.2. Lazer ve görüntüleme tabanlı yöntemler

Hacimsel tabanlı yöntemlere alternatif olarak geliştirilen lazer veya görüntü tabanlı teknolojik cihazların hızlı fakat daha pahalı olduğu ve kum yama ve akış-zaman ölçer testleri gibi taşınabilir olamayacağı değerlendirilmektedir. Konu ile ilgilenen kurumlar ve araştırmacılar operatör güvenliği ve trafik gecikmelerinin sorun olduğu kum yama metoduna bir alternatif geliştirmenin ve araca monteli

lazer veya görüntü tabanlı metotların yaygınlaşması gerektiğini belirtmişlerdir. Lazer ve görüntüleme tabanlı yöntemler için bazı görseller Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.3. Lazer tabanlı ölçüm metotları

Fisco ve Sezen (2013) taş mastik, asfalt betonu ve sathi kaplama içeren 26 laboratuvar numunesi üzerinde kum yama, lazer profilometre, lazer doku tarayıcı, dairesel doku metre ve X-ray bilgisayarlı kesityazar tarayıcıyı ile yaptıkları yüzey makro doku ölçüm metotlarının sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada, en güçlü ilgileşim kum yama-lazer tarayıcı ve kum yama-lazer profilometre testleri arasında elde edilmiştir. Arazide sathi kaplama makro doku ölçümlerine odaklanmış ve akış-zaman ölçer ile dairesel doku metre arasında iyi bir ölçüm modeli olduğu belirten bir çalışma Martino ve Weissmann (2008) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, akış-zaman ölçerin sathi kaplama kalitesini ölçmek için taşınabilir ve pahalı olmayan bir cihaz olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir. Ancak ortalama doku derinliğinin 0,46 mm'den düşük olduğu (14,5 saniyeden daha fazla akış süresine karşılık gelen) yüzeylerde akış-zaman testinin yanlış sonuçlar verebileceği ve dolayısıyla bu değerin bir sınır değer olarak dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Sengoz vd. (2012) İzmir sınırları içerisindeki taş mastik asfalt ve asfalt betonu içeren farklı yol kaplamalarının doku özelliklerini kum yama ve 3-D lazer tabanlı test metotları ile değerlendirmişler ve alınan sonuçlar iki test metodu arasında iyi bir ölçüm modeli katsayısı olduğunu göstermiştir. Kum yama test metodu ile görüntü işleme tabanlı metot arasında iyi bir ölçüm modeli denklemi olduğunu belirten çalışmalarda mevcuttur (Goodman, 2009). Benzer şekilde, Gransberg vd. (2005)

yaptıkları araştırma çalışmasında görüntü çıktısı ve fiziksel ölçümler arasında düşük ve yüksek ölçüm model katsayıları tespit etmişlerdir. Sarsam ve Al Shareef (2015) yakın mesafeli fotogrametri metodu kullanılarak hesaplanan makro doku derinliklerinin geleneksel kum yama testi ile elde edilen sonuçlar ile güçlü bir ilişkiye sahip olduklarını ortaya koymuştur. Asfalt kaplama ortalama doku derinliklerinin çok hatlı lazer ve binoküler görüş (iki gözle görüş) olmak üzere iki farklı teknik ile tespiti için çalışmada (Cui vd., 2015) gelişmiş metotlarla elde edilen sonuçların kum yama metodu ile tutarlılık gösterdiği belirtilmiştir.

2.3.3. Kaplama yüzey dokusu yöntemleri arasındaki ölçüm modelleri

Konu ile ilgili geçmiş çalışmalar incelendiğinde, aynı amaç için uygulanan farklı test metotları ile birçok araştırmanın yapıldığı görülecektir. Bu çalışma kapsamında yukarıda verildiği üzere özetlenen bazı çalışmalar, araştırmacıların test veya ölçüm metotları geliştirmek veya geliştirilen metotları doğrulamak için hacimsel test metotlarını kullandıkları görülecektir. Geleneksel olarak tanımlanan bu test metotlarının hala kullanışlı ve uygulanabilir test metotları olduğunu ve geliştirilen birçok modelin güvenilirliğini test etmek için kullanılan metotlar olduklarını göstermektedir.

Çizelge 2.2' de çeşitli doku ölçme yöntemleri ile yapılan bazı çalışmalarda bulunan ölçüm modeli katsayıları verilmiştir. Farklı kaplama türleri üzerinde makro doku ölçümünde farklı cihaz ve yöntemlerin kullanılabilirdiği, bunların birbirleri ile ilişkili olduğu ve aralarındaki ölçüm modeli katsayılarının kullanılan cihaz ve yöntemlere göre değiştiği açıkça Çizelge 2.2' de görülmektedir.

Çizelge 2.2. Makro doku ölçüm yöntemleri arasındaki bazı ölçüm modelleri

Referanslar	Kaplama ürü	Metotlar	Korelasyonlar	(R ²)
Fisco ve Sezen, 2013	TMA, BSK, SK	KY, LP, LDT,	LP - KY	0,91
			LDT - KY	0,98
Martino ve Weissmann, 2008	SK	AÖ, DDÖ	AÖ - DDÖ	0,75
Sengoz vd., 2012	TMA, BSK	KY, LDT	KY - LDT	0,97
Goodman, 2009	HTK, TMA, BSK	KY, Gİ	KY- GİT	0,71-0,96

(Gransberg vd., 2005	SK	KY, Gİ	KY- GİT	0,40-0,80
Sarsam ve Ali, 2015	BSK, BK	KY, FGM	KY-FGM	0,98-0,99
Cui vd., 2015.	BSK	KY, LDT, BG	KY- LDT	0,82
			KY- BG	0,86
Flintsch vd., 2003	BSK	DDÖ, KY, LP	CTM-KY	0,94
			KY-LP	0,88
Bitümlü Sıcak Karışım (BSK), Sathi Kaplama (SK), Harç Tipi Kaplama (HTK), Beton Kaplama (BK), Kum Yama (KY), Lazer Profilometre (LP), Akış Ölçer (AÖ), Görüntü İşleme (Gİ), Fotogrametri (FGM), X-Ray : X Işınımı Dairesel Doku Ölçer (DDÖ), Binoküler Görüş (BG)				

2.3.4.Farklı doku ölçüm yöntemlerine ait güçlü ve zayıf yönler

Aynı kaplama üzerinde farklı sonuçlar veren farklı çalışma prensiplerine sahip cihazlar arasında benzer yönler olmakla beraber, her bir cihazın kullanımından, metodundan dolayı güçlü ve zayıf yönlerinin de varlığı kaçınılmaz bir olgudur. Çalışmamızın bu kısmında, yukarıda anılan ölçüm prensiplerine sahip cihazlara ve uygulanma metotlarına ait güçlü ve zayıf yönler önceki bilimsel çalışmalar ışığı altında (Bitelli vd., 2012; Cenek ve Jamieson, 2005; Mataei vd., 2016; Sengoz vd., 2012), araştırılmıştır. Çizelge 2.3’ de makro doku ölçüm prensiplerine yönelik güçlü ve zayıf yönler karşılaştırmalı bir şekilde verilmiştir.

Çizelge 2.3. Makro doku ölçüm yöntemlerinin zayıf ve güçlü yönleri

Ölçüm Prensibi	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
Hacimsel Ölçüm Yöntemleri	Uygulaması kolaydır. Temin maliyeti düşüktür. En yaygın kullanılan yöntemlerdir. Hem laboratuvarında hem de sahada kullanıma uygun ve taşınabilir. KY ile elde edilen sonuçlar, kaplama kayma direnci performansı hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir. AÖ ile elde edilen sonuçlar kaplama yüzeyler yağışlı havalarda hidroplan	Tekrar edilebilirliği oldukça düşüktür. Zaman alıcı olmakla beraber, saha uygulamalarında ölçüm yapılan şeridin trafiğe kapatılması güvenlik ve ölçüm sonuçlarının kalitesi açısından zorunlu tutulmaktadır. Noktasal ölçümler olduğu için, tüm bir kaplama yüzeyinin makro dokusunu temsil eden sonuçlara araştırmacıyı ulaştırmaz.

	oluşumu ve seviyesi hakkında bilgi edinmek için kullanılabilir.	KY yönteminin operatöre bağıllığı yüksek iken, AÖ yönteminin operatöre bağıllığı KY yöntemine oranla daha düşüktür. AÖ test yöntemi Poroz bir yüzeye sahip olmayan ve sınırlı seviyede eğime sahip olan yüzeylerde uygulanır.
Lazer Tabanlı Ölçüm Yöntemleri	Kullanıcı dostudur, uygulaması kolaydır. Hem sahada hem de laboratuvarında kullanıma uygun ve taşınabilir olan cihazlarda mevcuttur. Operatörün yapacağı işlemlere bağıl değildir. Sonuçlar, KY ölçüm sonuçları ile iyi derecede ilgililişim içerisinde olduklarıdır. Kurulum süresi oldukça kısadır.	KY ve AÖ yöntemlerine oranla daha az da olsa zaman alıcıdır. Saha uygulamalarında ölçüm yapılan şeridin trafiğe kapatılması güvenlik ve ölçüm sonuçlarının kalitesi açısından zorunlu tutulmaktadır. KY ve AÖ yöntemleri gibi noktasal ölçümler olduğu için, tüm bir kaplama yüzeyinin makro dokusunu temsil eden sonuçlara araştırmacıyı ulaştırmaz. KY ve AÖ yöntemlerine kıyasla temin maliyeti oldukça yüksektir.
Görüntü İşleme Tabanlı Ölçüm Yöntemleri	Operatörün yapacağı işlemlere bağıl değildir. Ölçüm hızı diğer tüm yöntemlere kıyasla çok yüksektir. Kaplamanın tüm yüzeylerini temsil eden doku sonuçlarını sağlayabilir. Hem sahada hem de laboratuvarında kullanıma uygun ve taşınabilir olan cihazlarda mevcuttur.	Sonuçların alınması, analiz edilmesi oldukça karmaşıktır, daha iyi kalitede görüntü elde etmek ve görüntüleri işlemek, bu işlemler sonunda elde edilen verilerin depolamak için yüksek kalitede bir bilgisayar ve yazılım ihtiyaç duyulmaktadır. Yöntemler oldukça pahalı yöntemlerdir. Verilerin işlenmesi için iyi bir operatöre ve uzmana ihtiyaç duyulmaktadır. Diğer ölçüm yöntemlerindeki gibi ölçüm yapılan şeridin trafiğe kapatılması gerekmeyebilir.

2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler

Trafik kazalarının oluşuna ve şiddetine etki eden en önemli parametrelerden biri olan yol yüzeyinin kayma direnci performansı, yüzey doku özelliklerinden etkilenmektedir (Sarsam ve Al Shareef, 2015). Kayma direncine etki eden en temel doku türü mikro doku olduğu bilinmektedir. Ancak, makro dokunun da

kayma direnci üzerindeki etkisi azımsanmayacak düzeydedir (Gökalp ve Uz, 2019). Bu nedenle, gerek yolun tasarım ve inşa aşamasında gerekse de yolun hizmet ömrü süresince belli bir seviyede kalması istenmektedir. Ancak, kullanılan yöntemler ve test metotlarına göre farklı değerler belirlenmektedir. Bu durum, farklı seviyelerin tanımlanmasını gerekli kılmaktadır. Tezin bu bölümünde, makro doku için tanımlanan veya önerilen kritik yani eşik değerler üzerinde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

Yeni Zelanda ulaşım dairesi tarafından farklı kaplama türleri için ve izin verilen farklı hızlarda araç trafiğine açık olan yollara dayalı bir sınıflandırma gözetilerek makro doku için kritik değerler tanımlanmıştır. Bu kritik değerlerin tespitinde, lazer tabanlı ölçüm yöntemleri kullanılmış olmasına istinaden makro doku değerleri ortalama profil derinliği olarak (MPD) olarak tanımlanmıştır. Bu değerler Çizelge 2.4’ de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Makro doku ortalama profil derinliği (mm) eşik değerleri

Hız Limiti (km/s)	Sathi kaplama		Asfalt kaplama (Kayma direnci katsayısı 0.4’ ten büyük)		Asfalt kaplama (Kayma direnci katsayısı 0.4’ ten küçük)	
	Araştırma	Minimum	Araştırma	Minimum	Araştırma	Minimum
<50	1,0	0,7	0,4	0,3	0,5	0,5
50/ 70	1,0	0,7	0,4	0,3	0,7	0,5
>70	1,0	0,7	0,9	0,7	0,9	0,7

Birçok kurum ve kuruluşun bir araya gelerek hazırladıkları bir standart çalışmasında, kayma sensör tabanlı doku ölçüm yöntemi kullanılarak yapılan ölçüm sonuçları ile kayma direnci arasındaki ilişkiye bakılmış ve doku derinliğinin kayma direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir (DMRB 2004). Çalışmada, tanımlanan sensör tabanlı makro doku değerlerinin kayma direncini ne düzeyde azalttığı düşük ve yüksek hızlarda yapılan ölçümler ile desteklenmiştir (Çizelge 2.5). Buna göre yüksek makro doku derinliği düşük hızlarda % 25 oranında kayma direncinde düşüşe neden olurken, yüksek hızlarda

ise %50' ye kadar düşüş meydana getirmektedir. Bu durum, ayrıca ölçüm hızlarının önemini ortaya koymaktadır.

Çizelge 2.5. Kayma direncinin makro-dokuya göre düşüş düzeyleri

Hız (Km/s)	Sensör tabanlı makro doku derinliği (mm)		
	< 0,5	0,5-0,8	>0,8
50	% 40	% 30	% 25
120	% 70	% 60	% 50

Fernandes ve Neves (2014) tarafından 1000 metre uzunluğundaki farklı yol kısımlarında trafik kazalarının meydana geldiği 254 noktadan alınan veriler üzerinde bir araştırma yapılmış, makro doku derinliği için kritik değerler önerilmiştir. Bunlar, şehir içi yollar ve kavşaklar için 0,4 / 0,5 mm ve kurbalarda 0,5 / 0,6 mm ' dir.

Tanımlanan makro doku eşik değerlerine istinaden kaplamada meydana gelen bozulma seviyelerini sınıflandırmış, her bir bozulma seviyesine karşılık atılması gereken adımlar (Çizelge 2.6) Viner vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada belirtilmiştir.

Çizelge 2.6. Kaplama bozulma sınıfları ve makro doku eşik değerleri

Sınıf	Bozulma Seviyesi	Atılacak Adım	Makro Doku Eşik Değerleri (mm)
1	Görünür bir bozulma yok	-	> 1,1
2	Kısmi bozulmalar mevcut	Detaylı araştırmaya gerek duyulmamaktadır.	0,8-1,1
3	Belirgin bozulmalar oluşmuş	Bozulmanın olduğu kesimlerde detaylı araştırmaya ihtiyaç vardır.	0,4-0,8
4	Bozulma oranı yüksek	Bozulmanın olduğu yolun tümünü kapsayan bir araştırmaya ihtiyaç vardır.	< 0,4

Çizelge 2.6' ya göre makro-doku eşik değerlerinde en alt limit 0,4 mm olarak tanımlanmıştır. Bu durumda ölçümün yapıldığı yolun tümüne dair araştırma yapılması önerilmektedir. Zira bozulma oranının oldukça yüksek olacağı öngörülmüştür. Çeşitli makro doku derinliği veya ortalama profil derinliği eşik değerleri araştırmacılar tarafından da ortaya konulmuştur. Bunlardan bazılarının önerdiği eşik değerler Çizelge 2.7' de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Araştırmacılar tarafından önerilen makro doku eşik değerleri

Referanslar	Eşik Değerler (mm)	
	SMTD	TTD
Roe vd. (1991)	0,7	1,0
Cairney ve Styles (2005)	0,4	0,7
Li vd. (2010)	0,4	0,7
Kuttesch (2004)	0,75	1,09
Chelliah vd. (2002)	0,63	0,97
SMTD: Sensör tabanlı makro doku derinliği TTD: Tahmin edilen doku derinliği		

Çizelge 2.7' de farklı araştırmacıların çalışmaları neticesinde ortaya koydukları makro doku derinliği ölçüm sonuçlarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Araştırmalar incelendiğinde, farklı kaplama dokusu üzerinden yapılan ölçümlerin mevcut olduğu, kullanılan test yöntemlerinin birbirinden farklı olduğu ve her bir ölçüm cihazının çalışma prensibinin farklı olduğu ve farklı hızlarda ölçüm yaptığı görülmektedir. Dolayısıyla, kullanılan yöntemlerin, doku derinliği için eşik değer belirleme noktasında önemli birer parametre olduğu anlaşılmaktadır. Bu tez çalışmasında, bu durum öngörülerek, farklı test yöntemleri kullanılarak makro doku ölçümleri yapılmış ve güncel çalışmaların önerdiği eşik değerler doğrultusunda analizler tamamlanmıştır.

2.4. Kayma Direnci Ölçüm Yöntemleri

Pürüzlendirme, Türkiye’de jeolojik yapısı gereği her bölgede rahatça temin edilen kireçtaşının kullanılarak magmatik kökenli kayalar ile yapılan TMA ve AB aşınma tabakasına alternatif olması amacıyla KTŞ 2013’de tanımlanmıştır. Ancak, düşük cilalanma direncine sahip bir agrega türü olan kireçtaşı ile inşa edilen aşınma tabakalarının yüzey kayma direncini artırmak için magmatik kökene sahip agrega türlerinin belirtilen boyutlarda ve uygulanma zamanında inşa aşamasında yola uygulanması gerekliliği belirtilmiştir (KGM, 2013b). KTŞ’ de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasında var olan eksikliklerden yolla çıkılarak vücut bulan bu tez kapsamında, farklı trafik hacimlerine sahip farklı yol sınıfları üzerinde farklı tür agregaların farklı boyutlarda ve uygulama zamanlarında yüzeye uygulanması suretiyle saha çalışmasına gidilmiştir. Yüzey özelliklerinin farklı pürüzlendirme uygulamaları altında gerek doku anlamda gerekse kayma direnci anlamında birbirleri ile kıyaslanabilmesi gerekliliği ortaya çıkan bu tezde, farklı yöntemler kullanılarak sahada ölçümler yapılmıştır. Tezin bu kısmında, kayma direnci kavramından kısaca bahsedilecek, kayma direncine etki eden ve kayma direncinin etkilediği unsurlar anlatılacak, son olarak da kayma direncinin ölçülmesinde kullanılan yöntemlere yer verilecektir.

Trafik güvenliğini etkileyen ana faktörlerden biri araç lastiği ve yol yüzeyi arasındaki sürtünmedir (Wallman ve Åström, 2001). Kaymaya bağlı kazalar tüm yol kaynaklı kazalar içerisinde en yaygın olanıdır ve araç lastiği ve yol yüzeyi arasındaki yetersiz sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Tekerlek ile kaplama arasındaki sürtünme kuvvetlerine etki eden yüzey pürüzlülüğünün bir göstergesi olarak ortaya çıkan kaplama kayma direnci, trafik güvenliği açısından, kaplamanın en önemli yüzey özelliğidir (Kogbara vd., 2016; Kumar, 2014). Çok uzun yıllardan beri kaplama kayma direnci ile kaza oluşumu arasındaki ilişkiye odaklanmış araştırmalar yürütülmektedir (Lindenmann, 2006). Yapılan çalışmalar kaza oluşumunu azaltmak ve trafik güvenliğinin artırılması için en önemli yol yüzey özelliğinin kaplama kayma direnci olduğunu doğrulamaktadır. Kayma direnci, lastik yükü, basıncı, diş derinliği ve şekli, yol yüzey özellikleri, kaplama üzerinde su veya buzun bulunması ve sürüş hızı gibi faktörlere bağlıdır.

Kayma direncini etkileyen faktörleri araç, yol, sürüş ve çevresel faktörler olarak sınıflandırmak mümkündür (Andriejauskasa vd., 2014).

Tekerlek izi, düzgünsüzlük ve kayma direnci gibi yüzey özellikleri trafik kazalarında payı olan bazı yol kusurlarıdır. En önemli faktör kaplama ve lastik arasındaki sürtünme kuvvetini tanımlayan kayma direncidir. Eğer lastikler ile kaplamanın irtibatı kesilirse veya zayıf temas halinde araç kaymaya başlar. Kayma tipi kazalar, en yaygın olarak karşılaşılan yol kusuruna bağlı kazalardır ve esas etken düşük kayma dirençli yüzeylerdir. Kayma direncinin önemi apaçıktır çünkü kayma direncindeki azalma trafik kazalarında bir artışa neden olur. Kaplamanın kayma direncinde zaman içerisinde azalma meydana gelmesi doğaldır zira trafik ve çevresel koşullar kaplamada zamanla cıllanma, kuma ve sökölme gibi bozulmalara neden olurlar.

Kaplama kayma direnci performansı üzerinde etkili birçok parametre mevcuttur. Bunlar, kaplama türü, agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri, bitüm özellikleri ve miktarı, trafik seviyesi, karayolu sınıfı, kaplama yaşı ve çevresel koşullar gibi sayılabilir (Asi vd., 2007; Gökalp ve Uz, 2017a, 2017c; Kogbara vd., 2018; Kogbara vd., 2016; Uz ve Gökalp, 2017b). Servis ömrü boyunca bir kaplamanın kayma direnci ağırlıklı olarak yüzey dokusu (makro ve mikro doku) tarafından etkilenir. Kaplama mikro ve makro dokusunda azalmaya yol açan birçok sebep bulunmaktadır. Bunlar; cıllanma, soyulma, sökölme, gömölme, kuma, terleme, tekerlek izi gibi bozulmalar ve yüzey kirliliği ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerdir (Adams ve Kim, 2014; Ahammed ve Tighe, 2009; Bazlamit ve Reza, 2005; Kim ve Lee, 2005; Kogbara vd., 2018). Ayrıca, yağışlı hava ve kaplama kayma direnci kaybı arasında güçlü bir ilişki olduğu yapılan çalışmalar ile ortaya konmuştur (Abdul-Malak vd., 1988; Mayora ve Piña, 2009; Meyer, 1991; Xiao vd., 2000).

Kaplama kayma direncinin ölçülmesi karmaşık bir iştir. Çünkü kaplama özelliklerinden (doku, malzeme, sıcaklık), lastik özelliklerinden (diş tasarımı, kauçuk bileşeni, kayma hızı, sıcaklık) ve çevresel ve iklimsel koşullardan gelen ve ölçümleri etkileyen birçok faktörün olmasıdır (Uz vd., 2016). Bu nedenle yıllar içerisinde en doğru kayma direnci değerini ölçmek için birçok cihaz ve metot

geliştirilmiştir. Aynı kaplama yüzeyi için farklı ölçüm değerleri verebilen bu cihazlar, çalışma prensiplerine bağlı olarak üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bunlar boyuna sürtünme katsayısı ölçen, yanal kuvvet katsayısı ölçen ve son olarak sabit veya düşük hızda ölçüm yapan cihazlardır (Andriejauskasa vd., 2014; Sandberg ve Descornet, 1980). Bu metotlarda farklı ölçüm hızları, lastik tipleri, tekerlek yükleri ve su film kalınlıkları kullanılmaktadır.

2.4.1. Boyuna sürtünme katsayısı ölçüm prensibine sahip cihazlar

Boyuna sürtünme katsayısının (LFC) ölçüldüğü cihazlarda prensip, düz bir şekilde hareket eden bir araçta fren sistemi ile tekerleklerle fren kuvvetinin aktarılması ve aracın durdurulması veya tekerleğin yol yüzeyi üzerinde kızıklanması sürecine dayanır. Bu süreci takiben, tekerleğin açılma hızı düşer, kinetik enerji termal enerjiye dönüşür ve araç yavaşlar. Fren kuvvetinin çok büyük olduğu durumlarda, araç tekerliği kilitlenir ve yol yüzeyinde kaymaya başlar. Bunun sonucu olarak, lastik ve yol temas yüzeyi arasında aracı yavaşlatan sürtünme kuvveti oluşur. Boyuna sürtünme katsayısı ölçüm cihazları, tekerleğin kızıklanmasını kontrollü kayma (kayma oranı) süreci ile sağlar. Kayma oranı kullanmanın amacı tekerlek ve araç hızını hesaplamak ve karşılaştırmaktır. Kayma oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir, fakat en yüksek boyuna sürtünme katsayısı ve en kısa araç durma mesafesini sağladığından en uygun kayma oranı 0,15-0,20 arasındadır. LFC prensibine sahip cihazlardan bazıları ve özellikleri Çizelge 2.8’ de (Uz vd., 2016; Andriejauskasa vd., 2014; Sandberg ve Descornet, 1980) verilmiştir.

Çizelge 2.8. LFC prensibine sahip cihazlar ve özellikleri

Sıra	Araçlar	Temel parametreler	Tekerlek ve tekerlek yükü türleri
1	ADHERA	Kayma Açısı: 1 Su film kalınlığı: 1,0 mm Ölçüm hızı: 40 - 120 km/s	Tekerlek: PIARC Düz profil 165R15 Tekerlek yükü: 2500 N.
2	BV-11	Kayma Açısı: % 17 Su film kalınlığı: 0,5-1,0 mm Ölçüm hızı: 70 km/s.	Tekerlek: Trelleborg tip T49 (140kPa) Tekerlek yükü: 1000 N.

3	GripTester	Kayma Açısı: % 15 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 5-100 km/s	Tekerlek: 254 mm çaplı düz profil ASTM 140kPa Tekerlek yükü: 250 N
4	RoadSTAR	Kayma Açısı: % 18 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 30/60 km/s	Tekerlek: PIARC dış lastik yüzü Tekerlek yükü: 3500 N.
5	ROAR NL	Kayma Açısı: % 86 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 50/70 km/s	Tekerlek: ASTM 1551 (207kPa) Tekerlek yükü: 1200 N.
6	RWS NL	Kayma Açısı: %86 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 50/70 km/s	Tekerlek: PIARC düz profil 165R15 (200kPa) Tekerlek yükü: 1962 N.
7	BV-8	Kayma Açısı: %1 ile 14 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 40-80 km/s	Tekerlek: AIPCR uzunlamasına dış lastik yüzü 165R15 Tekerlek yükü: 3500
8	SRM	Kayma Açısı: %1 ile 15 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 40-80 km/s	Tekerlek: AIPCR uzunlamasına dış lastik yüzü 165R15 Tekerlek yükü: 3500 N.
9	TRT	Kayma Açısı: % 25 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 40-140 km/s	Tekerlek: Düz profil ASTM Tekerlek yükü: 1000 N.
10	SRT-3	Kayma Açısı: 1 Su film kalınlığı: 0,5 mm Ölçüm hızı: 60 km/s	Düz (200kPa).

Çizelge 2.8’ de görülebileceği gibi neredeyse tüm LFC ölçüm prensibine sahip cihazlar sabit kayma oranı ile çalışmaktadır. Diğer bir yandan, değişken kayma oranına sahip Skiddometer BV-8 ve SRM gibi bazı cihazlar da bulunmaktadır. Değişken kayma oranı kullanılmasının asıl amacı tekerleğin dönmesi engellenmeye başlayana kadar sürtünme kuvvetini artırmaktır. Sabit kayma oranlı cihazlar sürekli ölçüm alımı sağlaması ve uzun kesimlerin takibini kolaylaştırması açısından daha çok araştırma çalışmalarında çok tercih edilmektedir (Andriejauskasa vd., 2014; Uz vd., 2016). Ayrıca, Çizelge 2.8’ de örnek olarak sadece on tanesi verilen cihazların tümü kilitlenebilir tekerlek sistemine benzer bir prensibe sahiptirler. Bu cihazlar, bir araca monte edilmiş

veya manuel bir şekilde belli bir hızda bir çizgi üzerinde bir operatörün belli bir hızda yürümesi ve/veya koşması ile ölçüm alınabilen cihazlardandır. Bu tez kapsamında kullandığımız cihaz, kilitlenebilir tekerlek sistemine sahip ve bir araca monte edilmiş ilgili standarda uygun olarak üretilmiş tekerleğe sahiptir.

2.4.2. Yanal kuvvet katsayısı ölçüm prensibine sahip cihazlar

Yanal kuvvet katsayısı (SFFC) ölçümüne sahip araçlar/cihazlarda lastik kayma açısına bağlı olarak bir ölçüm alınır. Kayma direnci ölçüm cihazları genellikle sabit kayma açısını kullanırlar. Sabit açı kullanan cihazların sürekli ölçüm alma imkânından dolayı, izleme ve araştırma amaçlı ölçümler için daha iyi olduğu düşünülmektedir. Değişken kayma açısına sahip cihazlar kısa kesimlerde ölçüm alabilmektedir. Uygulamalarda kullanılan bazı ölçüm cihazları ve bu cihazların sahip olduğu özellikler Çizelge 2.9 'da (Andriejauskasa vd., 2014; Uz vd., 2016) verilmiştir.

Çizelge 2.9. SFFC prensibine sahip cihazlar ve özellikleri

Sıra	Araçlar	Temel parametreler	Tekerlek ve yükü
1	SKM	Kayma Açısı: 20°; Su film kalınlığı: 0,5 mm; Ölçüm hızı: 50 km/s; Ölçüm Aralığı: 100 m ve üstü	Tekerlek: Düz profil ; Tekerlek yükü: 1960 N.
2	SCRIM	Kayma Açısı: 20°; Su film kalınlığı: 0,5 mm; Makro doku ölçer; Ölçüm hızı 50 km/s; Ölçüm Aralığı: >10 m.	Tekerlek: Avon SCRIM Düz profil 76/508 (350kPa); Tekerlek yükü: 1960 N

Çizelge 2.9 incelendiğinde SFFC alt grubunda yer alan temel parametreler, LFC de tanımlanan parametreler ile benzerlik gösterdiği görülecektir. Farklı olarak, SFFC sabit bir kayma açısı, su film kalınlığı ve ölçüm hızı prensiplerine dayanmaktadır. Bu durum diğer LFC için tanımlanan parametrelerden farklıdır ve bu parametreler değişkenlik göstermektedir.

2.4.3. Sabit veya düşük hızda ölçüm prensibine sahip cihazlar

Sabit veya düşük hızda (SSMM) ölçüm prensibine sahip cihazlar; basit çalışma prensipleri, taşınabilir oluşları ve hem laboratuvar hem de saha ölçümlerinde kullanılabilir olmaları sebebiyle daha çok tercih edilmektedirler. Ölçüm esnasında hareketsiz olan bu cihazlar yol yüzeyi ile kauçuk kaydırıcı (pabuç) arasında bağıl hareketi sağlayan bir mekanizma içerir. Bu türdeki cihazlardan en çok bilinenleri İngiliz pandülü test cihazı ve Dinamik sürtünme test cihazıdır. Zira bu cihazlar bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda aktif bir şekilde kullanılmıştır. Burada bu iki test yöntemine kısaca bakmak yararlı olacaktır.

İngiliz Pandül Testi (BPT) tüm dünyada en iyi bilinen ve önceki çalışmalarda en yaygın araştırma aracı olarak kullanılan kayma direnci ölçüm cihazıdır (Fwa vd., 2004; Kelvin vd., 2005; Kogbara vd., 2016; Saito vd., 1996). BPT, İngiliz Yol Araştırması Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir. Cihaz ve yöntemin basitliği, düşük maliyeti ve taşınabilirliği nedeniyle yaygın bir şekilde kabul görülmüştür. BPT, hem laboratuvar çalışmalarında hem de saha ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. BPT, dinamik bir pandül olup, kauçuk kaydırıcı kenarlarının deney yüzeyi üzerindeki hareketi esnasındaki enerji kaybını ölçmek için kullanılan bir cihazdır. Bu test metodu ülkemizde de yaygın olarak kullanılmakta ve ölçümlerde genellikle ASTM E303 standardı (ASTM, 2018) takip edilmektedir. Ölçümleri düşük hızda gerçekleştirmesinden dolayı malzemenin mikro doku ölçümlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplama kayma direnci ölçümünde kullanılan en basit ve ucuz aletlerden biridir. Birçok araştırmacı ve uygulamacı BPT ile yapılan kaplama kayma direnci ölçümünün dolaylı olarak yol malzemesinin mikro dokusunun da ölçümü olarak düşünmektedir. BPT, birçok koşulda uygulanabilir ve çok yönlü bir test oluşu nedeni ile dünya çapında kabul görmüş bir ölçüm yöntemidir.

DFT cihazı, saha ve laboratuvar ölçümlerinde kalite kontrol, proje ve araştırmalarda yararlanılmak üzere sürtünme verilerinin elde edilmesi için kullanılır. Bu test metodu ülkemizde kullanılmakta ve ölçümlerde genellikle ASTM E 1911 standardı (ASTM, 2009) takip edilmektedir. Temel prensibi

Coulomb' un sürtünme yasanına dayanır. Bu yöntemde, üç adet kauçuk lastik, yatay dönen bir diskin altına sabitlenmektedir. Test sırasında, disk 80 km/saat hıza ulaştığıında otomatik olarak kaplama yüzeyine dik bir şekilde alçalarak yola temas eder. Kauçuk lastikler yol yüzeyine dik bir şekilde etkiyen W sabit yükü altında ve doğrusal bir F kuvveti ile V hızında döner. F, kaplama ile kauçuk lastikleri arasındaki sürtünme kuvvetidir. Sürtünme katsayısı (μ), F'yi W'ye bölmek suretiyle bulunabilmektedir. 20, 40, 60 ve 80 km/saat hız değerlerinde pik sürtünme ölçüm değerleri alınabilmektedir. Bunun yanında, cihazın sahip olduğu bilgisayar programı sayesinde farklı hız aralıklarında sonuçlar almak da mümkündür.

2.4.4. Farklı kayma direnci ölçüm yöntemlerinin karşılaştıırılması

Aynı kaplama üzerinde farklı sonuçlar veren farklı çalışma prensiplerine sahip cihazlar arasında benzer yönler olmakla beraber, her bir cihazın kullanımından, metodundan dolayı güçlü ve zayıf yönlerinin de varlığı kaçınılmazdır. Tezin bu kısmında, yukarıda anılan ölçüm prensiplerine sahip cihazlara ve ölçüm prensiplerine ait güçlü ve zayıf yönler halinde izelge 2.10' da (Gökalp ve Uz, 2017a; Mataei vd., 2016) verilmiştir.

Çizelge 2.10. Farklı kayma direnci ölçüm yöntemlerinin karşılaştıırılması

lm Prensibi	Güçlü Yönler	Zayıf Yönler
LFC	Kullanıcı dostu bir yapıya sahip, kolay ve zaman kaybı yaratmayan bir kullanım imkânı sunmaktadırlar.	Kurbalarda, T bölümlerinde ve dönel kavşaklarda kullanılamamaktadırlar. Kaygan yüzeylerde ölçümsel hata oranları yksektirler. Sürekli bir ölçüm yapılması mümkün değildirler Temin ve işletme maliyetleri oldukça yksektirler. Belli bir hıza bağlı olarak kayma direnci performansı belirlerler.
SFFC	Kullanıcı tarafından daha kolay kontrol edilebilmektedirler.	Yüzey bozulmalarına (sklme, çatlama vb.) karşı oldukça hassas olmaktadırlar. Bozulmuş yüzeylerde yapılan ölçümler neticesinde, cihaza ait tekerleklerin deforme olma ihtimali oldukça yüksektir.

	Kurbalarda, T bölümlerinde ve dönel kavşaklarda kullanılamamaktadırlar. Sürekli bir ölçüm yapılması mümkün kılabilirler. Yüksek çözünürlüklü kayma direnci verileri almak mümkün kılabilirler.	Ölçüm göstergeleri veya birimleri (Mu-metre gibi) uluslararası değildir. Uluslararası düzeyde kullanılan test yöntemleri değildir. Genel de bölgesel veya özel bir amaç veya uygulama için kullanılırlar. Cihazlar kullanımı sırasında büyük miktarda suya ihtiyaç duymaktadırlar. Kar veya bu kaplı yüzeylerde yapılan ölçümlerde hatalar ile karşılaşılabilir. Cihazlar, oldukça büyük ve karmaşık bir yapıya sahiptirler. Veri işleme ve analizi karmaşıktır.
SSMM	Dünyada en yaygın kullanılan kayma direnci cihazlarından olmaktadır. Hem laboratuvar da hem de sahada kullanılabilirler. Cihazlar, portatif olmakla beraber cihazların temin ve işletim maliyetleri LFC ve SFFC' ye kıyasla daha düşüktür. BP'ye ait tekrar edilebilirlikleri, tekrar üretilebilirlikleri, DFT' ye kıyasla daha düşüktür. İngiliz Pandülü, operatöre bağlı iken, DFT operatöre bağıllığı neredeyse yoktur. Hem düşük hem de yüksek hızda ver almak mümkündür.	Operatöre bağıllığı yüksek cihazlarda elde edilen verilerin güvenilirliği düşüktür. Sonuçlar, operatörden operatöre büyük değişiklikler gösterebilir. Dolayısı ile bir ölçüm sahsında tek bir operatörden faydalanmak daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır. Bu tür prensipte çalışan cihazlar sahada kullanılmaları durumunda, gerek operatör gerekse alet ve takım güvenliği açısından ölçümlerin yapılacağı bölümler trafiğe kapatılması zorunlu olmaktadır. Bu durumda akan trafiğin işleyişi üzerinde ciddi etkiler olmaktadır. Her zaman araç ile kaplama yüzeyi arasındaki ilişkiyi simüle edemeyebilir. Sürekli bir ölçüm yapılması mümkün değildir. Belirli lokasyonlarda sınırlı ölçümler yapılabilmektedir.

Çizelge 2.10' dan anlaşılacağı üzere saha uygulamalarında, genel olarak LFC ve SFFC prensibine sahip cihazlar kullanılmaktadır. Bu tür prensiplere sahip cihazlar, genelde bir araca monte edilmiş olarak bulunurlar. LFC ve SFFC prensibine sahip cihazlar, SSMM prensibine sahip cihazlara oranla daha pahalı ve kullanılmaları daha zordur. Laboratuvar uygulamalarında genelde gerek

kullanım kolaylığından gerekse maliyetinin düşük olmasından dolayı SSMM ölçüm prensibine sahip olan BPT kullanılmaktadır. Yine belirtilen ölçüm prensibine sahip DFT cihazı, BPT cihazına kıyasla daha pahalı bir cihazdır. Bu nedenle tedarik edilmesinde yaşanan ekonomik sorun nedeni ile kullanımı kısıtlı kalmaktadır. Ancak, saha çalışmalarında da kullanımı ve yüksek hızlarda (80 km/s hıza kadar) kaplama kayma direnci ile ilgili bilgi verdiğinden fonksiyonel olarak kullanılabilir. Bunun yanında DFT cihazından elde edilen veriler, kaplam yüzey dokusu ölçüm yöntemlerinden (hacimsel, lazer, görüntü işleme vb.) elde edilen bilgilerin bir arada kullanıldığı bütünleşmiş formüller geliştirilmiştir. Bunlardan örnek verecek olursak ASTM1960 standardında ve PIARC tarafından tanımlanan (ASTM, 2015; PIARC, 1987), Uluslararası Sürtünme İndeksi (International Friction Index-IFI) dairesel doku ölçer ve/veya kum yama ve DFT' den elde edilen sonuçlar kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilmektedir.

Yukarıda detaylıca verildiği üzere hem kaplama yüzey dokusunun belirlenmesinde hem de kayma direnci performansının ortaya konmasında, prensipte birbirine benzer ve/veya farklı cihazlar ve yöntemler bulunmaktadır. Bunların bazıları operatöre bağımlı iken bazıları operatörden bağımsız veya bir araç ve yazılım ile bütünleşmiş bir sistemden oluşmaktadır. Aynı zamanda, temin edilme bedelleri de düşünüldüğünde, kimi cihaz ve/veya yöntemler pahalı olmakla beraber uzman bir operatöre veya teknik personele ihtiyaç duyar iken kimileri de daha ucuz olmakla beraber kısa bir süre içerisinde verilebilecek eğitim ile yetiştirilebilecek operatör ve/veya teknik personele ihtiyaç duymaktadır. Kullanım alanları bakımında, hem laboratuvar ortamında hem de sahada kullanılabilen cihazların daha efektif kullanımı söz konusu olmaktadır.

2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler

Trafik kazalarının oluşuna ve şiddetine etki eden en önemli parametrelerden biri olan yol yüzeyinin kayma direncinin gerek yolun tasarım aşamasında gerekse de yolun hizmet ömrü süresince belli bir düzeyde kalması istenmektedir. Çünkü yetersiz bir kayma direncine sahip yol yüzeyi, özellikle yağışlı günlerde, kaymaya bağlı trafik kazalarının oluşmasına neden olmakta, buna bağlı olarak ciddi can ve

mal kayıpları yaşanabilmektedir (Hall vd., 2001). Kaymaya bağı trafik kazalarını önemli bir miktarda/düzeyde önlemek, doğru zamanda ve doğru bir şekilde yol yüzeyinin kayma direncini tayin etmek, buna istinaden gerekli görüldüğünde bakım ve onarımı yapmak veya elzem durumlarda yeniden yapmak ile mümkün olabilmektedir.

Dünya genelinde, karayolunun yapım, bakım ve onarımından sorumlu idareler, yolun üstyapısının kayma direnci performansını ortaya koymak, yol güvenliği açısından risk taşıyıp taşımadığını belirlemek için farklı ölçüm araçları kullanılarak belirlenen yol kaplama kayma dirençleri için minimum eşik değerler belirlemiştir. Karayolları idareleri tarafından, genel olarak, minimum kayma direnci eşik değerleri iki seviyede ele alınıp kullanılmaktadır. Bunlar, araştırma (Investigatory) seviyesi ve müdahale (Intervation) seviyesi olarak isimlendirilmiştir. Araştırma seviyesinde kayma direnci değerine sahip olan bir yol kaplaması için karayolu idaresinin düzenli takibinin yapılması ve gerekli koruyucu bakım ve onarımın planlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Müdahale seviyesinde kayma direnci değerine sahip olan bir yol kaplaması için ise idarenin bakım ve onarım noktasında zaman kaybetmeksizin aktif rol alarak gerekli müdahalenin yapılmasını zorunlu kılınmaktadır (Fwa, 2017; Hall vd., 2009; Hall vd., 2001; Rogers ve Gargett, 1991).

Dünyanın farklı bölgelerinde gerek takip edilen standart test metotlarına gerekse de yolun türüne, trafik seviyesine bağı olarak kayma direnci için farklı minimum eşik değerleri önerilmiştir. Bu konuda en tipik örnek Amerika Birleşik Devletleri Ulaştırma birimi tarafından havaalanı kaplamaları için minimum, bakım onarım planlaması gerektiren ve yeni inşa edilmiş kaplama yüzeyinden beklenen kayma direnci sınıflandırması ve eşik değerleridir (Çizelge 2.11).

Çizelge 2.11. Havaalanı kaplaması için kayma direnci eşik değerleri

Hız	65 km/s			95 km/s		
Koşul	Minimum	Bakım Planlama	Yeni İnşa Edilmiş Kaplama	Minimum	Bakım Planlama	Yeni İnşa Edilmiş Kaplama
Mu meter	0.42	0.52	0.72	0.26	0.38	0.66
Dynatest kayma direnci testi cihazı	0.50	0.60	0.82	0.41	0.54	0.72
Skiddometer	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Havaalanı kayma direnci testi cihazı	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Safegate kayma direnci testi cihazı	0.50	0.60	0.82	0.34	0.47	0.74
Finlandiya, Grip tester kayma direnci testi cihazı	0.43	0.53	0.74	0.24	0.36	0.64
Tatre kayma direnci testi cihazı	0.48	0.57	0.76	0.42	0.52	0.67
Norsemeter kayma direnci testi cihazı	0.45	0.52	0.69	0.32	0.42	0.63

Çizelge 2.11’ de farklı hızlarda farklı cihazlar/standart yöntemler ile elde edilmesi tavsiye edilen kayma direnci değerlerinin birbirinden farklı olduğu açıkça görülmektedir. Dolayısıyla, ölçüm yapılan cihaza, ölçümün yapılacağı hız ve kaplamanın durumuna göre tanımlanan eşik değerlere göre değerlendirme yapılmalıdır.

Karayolu üstyapısı için benzer durum gözlemlendiği söylenebilir, farklı olarak genelde benzer bir cihaz ve yöntem ile farklı yol sınıfı için farklı değerler

önerilmiştir (Hall vd., 2001). Bu duruma örnek olarak, Birleşik Krallık ulaştırma dairesi tarafından önerilen ve yolun sınıfına bağlı olarak tanımlanan değerler Çizelge 2.12’ deki gibi verilebilir.

Çizelge 2.12. Kayma direnci araştırma düzeyi eşik değerleri

Yol Sınıfı	Kayma direnci eşik değerleri (50 km/s)							
	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
Otoyol	X	X						
Çift şeritli yol	X	X	X					
Tek şeritli yol		X	X	X				
Küçük ve büyük kavşaklara yaklaşımlar, Döner kavşaklara yaklaşımlar				X	X	X		
Yaya geçitlerine ve diğer yüksek risk durumlarına yaklaşımlar					X	X		
Döner kavşaklar				X	X			
Eğimi % 5 ila 10, 50 m'den daha uzun kesimler				X	X			
Eğimi % 10'dan büyük 50 m'den daha uzun kesimler				X	X	X		
Viraj yarıçapı <500 m - çift şerit				X	X			
Viraj yarıçapı <500 m - tek şerit				X	X	X		

Çizelge 2.12’de görüldüğü üzere, yol sınıfına, kesimine bağlı olarak değerlendirme yapılmaktadır. Otoyol ve çift şeritli yollarda, diğer yol sınıfı ve/veya kesimlere istinaden daha düşük kayma direnci eşik değerleri tanımlanmıştır.

Çizelge 2.12’ de verilen duruma ek olarak, dünyanın farklı bölgelerinde hem yol sınıflandırması hem de kayma direnci araştırma ve müdahale seviyesi eşik değerlerinde farklılık olduğu görülecektir. Farklı ulaştırma birimleri için yapılan çalışmalardan bazı örnekler ve kayma direnci için önerilen/tanımlanan

müdahale seviye değerleri Çizelge 2.13' de verilmiştir (Fwa, 2017). Burada, farklı ülkeler için farklı kıstasların kullanılabileceği, hatta bunun oldukça önemle üzerinde durulması gereken bir nokta olduğu bilinmelidir. Zira ilgili bölgelerin coğrafi ve iklim koşulları, doğal kaynakları, nüfusu ve demografik yapısı, yol altyapısı ve yol ağı durumu, gelişmişlik seviyesi gibi hususlar birbirine göre değişebilmektedir. Bu, husus dikkate alınarak farklı eyaletler için farklı kayma direnci eşik değerlerinin ortaya konması oldukça mantıklı olmakla beraber, diğer tüm ülkelerce de dikkatle üzerinde durulması gereken husus olmaktadır.

Çizelge 2.13. Kayma direnci için önerilen müdahale için eşik değerler

Ulaştırma Birimi	Kayma direnci müdahale seviye değerleri
Idaho	SN64S = 30
Kentucky	SN64R=28 (Eyaletler arası yollar, otoyol) , SN64R=25 (Birincil ve ikincil yollar)
Texas	SN64R = 30 (Eyaletler arası yollar, otoyol) SN64R = 26 (Birincil yollar), SN64R = 22 (İkincil yollar)
Ohio	SN64S = 32 SN64R = 23
Maryland	SN64R = 30 (Bölünmemiş yollar), SN64R = 25 (Bölünmüş yollar)
Yeni-Zelanda	ESC = 0.30 (Bölünmüş veya bölünmemiş karayolu için)
İngiltere	CSC = 0.30 (düşük trafiğe sahip otoyollar) CSC = 0.35 (yüksek trafiğe sahip otoyollar)
SN64R: Dişli tekerlek 64 km/s; SN64S: Düz tekerlek 64 km/s, ESC: SCRIM eşdeğerlik katsayısı, CSC: SCRIM karakteristik katsayısı.	

Kaplama kayma direnci eşik değerlerinin belirlenmesi üzerine yukarıda verilenler dışında da birçok çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalar ve çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi listelenmiştir.

- Runkle ve Mahone (1977) tarafından 64 km/s hızda yapılan SN testi sonuçlarının 30 ve altında çıkması durumunda, ölçüm yapılan yol kesiminin kaymaya bağlı kaza oluşumu açısından risk taşıdığı belirtilmiştir.

- Li vd. (2005) tarafından pürüzlü ve düz tekerlek ile yapılan ölçümlerdeki farkı ve aralarındaki ölçüm modelini ortaya koymak için Indiana eyaletinde çeşitli yollarda ölçümler yapılmış, Indiana için düz tekerlek ile yapılan kayma direnci ölçümlerinde yolun sağlaması gereken minimum değerin SN 20 olması gerektiği belirtilmiştir.
- McCullough ve Hankins (1966) Texas eyaletinde 571 bölgede 50 km/s hızda yapılan ölçümler neticesinde, minimum kayma direnci değerin SN 40 olarak önermiştir.
- Wambold (1988) pürüzlü tekerlek ile yapılan SN ölçümünde kabul edilebilir değerin 35, İngiliz pandülü ile yapılan ölçümlerde ise bu değerin 55 olduğunu belirtmiştir.

Tez kapsamında yapılan analizlerde kullanılacak ve dinamik sürtünme ölçer ile belirlenecek kayma katsayısı eşik değeri Alman standardında yer almıştır. 2012 yılında güncellenen Alman standardında (ANSI-NFSI B101.3-2012) dinamik sürtünme ölçer ile elde edilen kayma direnci değerinin $\geq 0.43-0.45$ olması durumunda yolda kayma riskinin düşük, $\geq 0.30-0.42$ olması durumunda kayma riskinin kabul edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir. Ancak bu değerin < 0.30 olması durumunda ise kayma potansiyelinin yüksek olacağı ifade edilmiştir (Bellopepe vd., 2016).

İngiliz pandülü bu tez kapsamında kullanılan aktif bir kayma direnci aracıdır. İngiliz pandülü ile yapılan ölçümlerin operatöre bağımlılığı oldukça yüksek olmakla beraber kullanım kolaylığı ve maliyetindeki düşüklük ve hem sahada hem de laboratuvarda kullanılabilirliğinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Yıldız, 2018). Yol ve hava alanı yüzey karakteristik özelliklerinden olan kayma/kızaklama direncinin ölçülmesinde kullanılan bu cihazın kullanımına ve sonuçların değerlendirilmesinde takip edilecek standart TS EN 13036-4 tanımlanmıştır (TSE, 2014). Bu standartta kayma potansiyelinin sınıflandırılması, 24-54 arasında değişen pandül değerlerine göre yapılmaktadır. 54 ve üzeri değere sahip yollarda kayma potansiyelinin düşük olduğu ($1/10^6$) ancak 24 ve altında olan değerlerde ise bu oranın yüksek ($1/20$) olduğu bilinmektedir. Ancak, 1969 yılında Ulaştırma Araştırma Laboratuvarı tarafından

önerilen ve hala günümüzde de referans alınan minimum İngiliz pandülü değerleri ise 45-65 arasında değişmektedir. Minimum 65 BPN değeri, dönel kavşaklarda, 150 metreden fazla yarıçapa sahip olan yatay kurbalarda, %5 eğime sahip düşey kurbalarda ve trafik ışıklarına yaklaşımlarında istenmektedir. 55 BPN değeri ise otoyol ve devlet yollarında, ağır taşıt trafiğinin olduğu yol trafik şeritlerinde istenirken, 45 değeri diğer yollara ait yüzeylerde minimum kıstas olarak belirlenmiştir (Msallam vd., 2017).

Ülkemiz karayolu teknik şartnamesinde maalesef herhangi bir eşik değeri tanımlanmamıştır. Bu nedenle bu tez kapsamında yapılacak analizlerde, bu kısımda önceki çalışmalara ışığından tanımlanan eşik değerlerden yararlanılacaktır.

2.5. Kaplama Türleri

Yol kaplamaları, trafik ve çevre etkilerine karşı koyan ve üzerine gelen trafik yüklerini alt tabakalara ileten yapılardır. Gerek trafik yükleri nedeniyle gerekse de çevresel koşullardan kaynaklı olarak oluşan basınç ve çekme gerilmelerinin en yüksek seviyede görüldüğü tabaka olması nedeniyle trafik güvenliği ve konforu açısından doğru yöntemler ve kaliteli malzemeler kullanılarak inşa edilmesi gerekmektedir. Kaplamaların taşıtlar için sürüş konforu ve emniyeti sağlamak, trafik yüklerinin kaplamaya zarar vermeden kaplama alt tabakaların iletmek ve trafik, iklim ve çevre etkilerine karşı dayanıklı, üzerinde oluşan gerilmelere karşı direnç göstermek amacıyla inşa edilirler. Kullanılan malzemelerin özelliklerine ve yapım metotlarına göre kaplama türleri üç kategoride incelenebilmektedir. Bunlar, rijit (beton) kaplamalar, esnek (asfalt-agrega karışımı) kaplamalar ve kompozit kaplamalardır (Yoder ve Witczak, 1975). Bu tez kapsamında, esnek üstyapı aşınma tabakası türlerinden TMA ve AB aşınma tabakası üzerinde pürüzlendirme uygulaması tatbik edilmesinden mütevellit bu kısımda bitümlü sıcak karışım türleri, özellikleri ve işlevleri ele alınacak, devamında yüzeysel kaplamalar ve bakım, onarım amaçlı diğer kaplama türlerinden bahsedilecektir.

2.5.1. Bitümlü sıcak karışım

Bitümlü sıcak karışımlar (BSK), bitüm ve bu bağlayıcı ile üniform bir şekilde karıştırılmış agrega birleşiminden oluşmuş bir asfalt kaplama türüdür. Diğer mühendislik malzemelerinin tasarımlarında olduğu gibi bitümlü kaplama karışımlarının tasarımı da büyük oranda malzeme seçimi ve malzemelerin kullanım miktarına ve uygulama koşullarına bağlıdır. Bir BSK tasarımında; dayanıklı bir kaplama sağlayacak yeterli miktarda bitümün tanımlanması gerekmekte ve deformasyon olmaksızın trafik taleplerini karşılayacak derecede yeterli dayanımı sağlaması beklenmektedir. Aynı zamanda, kuma veya dayanım kaybı göstermeksizin yaz aylarındaki sıcaklıklarda bitüm ve agreganın termal genişlemesine imkân sağlayacak şekilde sıkıştırılmış karışım içerisinde yeterli oranda hava boşluğu barındırması beklenmektedir. Ayrışma olmaksızın karışımın serilmesine izin verecek yeterlikte işlenebilir olması kaplama imalatının düzgün ve homojen malzeme içeren bir yüzey elde edilmesi açısından önemli bir unsur olarak görülmektedir (Behiry, 2013; Chen vd., 2004; Hicks vd., 1999; Theyse, 2002; Tutumluer, 1995; Uzan, 2004).

BSK imalatlarında, hem agrega hem de bitüm ısıtılmaktadır. Bundaki temel amaç, karıştırma işleminden önce agregaları kurutmak ve bitümün yeterli akışkanlığını sağlamaktır. Agregalar ve bitüm, bir karışım tesisinde bir araya getirilmekte, yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak karıştırılmaktadır. Karışımın agrega %93-97 oranında, bitüm ise %3 ila % 7 arasında bir oranda kullanılmaktadır. Tesiste karışım işlemi tamamlandıktan sonra, sıcak karışım kaplama alanına taşınmakta ve düzgün bir yüzeye sahip olacak şekilde, hafifçe sıkıştırılmış halde bir serim makinası (finişer) yardımıyla serilmektedir. Karışım hala sıcak durumda iken, malzeme, pürüzsüz ve iyi pekiştirilmiş bir kaplama tabakası elde etmek amacıyla ağır motorlu silindirler ile sıkıştırılmaktadır (Çabuk, 2010; Davis, 2001; Gökalp vd., 2016; Haddock ve O'Brien, 2013; Wen vd., 2016).

Bitümün ve agreganın farklı üretim ve uygulama koşullarına bağlı olarak BSK kaplama türleri bulunmaktadır ve bunlar kendi aralarında özelliklerine bağlı olarak çeşitlendirilmiştir. Bunlar, asfalt betonu, taş mastik asfalt karışımı,

geçirimli asfalt, mastik asfalt karışım ve kum asfalt karışımıdır. Bu tür kaplamalar ile ilgili özet bilgiler aşağıda verilmiştir (Çabuk, 2010).

Asfalt betonu: Bu karışımlar, sürekli yoğun bir gradasyona sahiplerdir. Bunun yanında, karışım boşluk ve bitüm oranları düşüktür. Bu tür kaplamalar, tezimizde de yer aldığı üzere aşınma tabakasının yanı sıra binder tabakalarında da kullanılmaktadır. Bitümlü temel tabakasında ise bu kaplama türünün iri boyutlu yoğun gradasyona sahip karışımları kullanılmaktadır.

Taş mastik asfalt karışımı: Bu karışım türü kesik gradasyona sahip olmakla birlikte, kaba agrega iskeleti içindeki boşlukların bitüm-filler harcı ile doldurulmasıyla elde edilmektedir. Agrega iskelet yapısı sayesinde bu karışımlara sahip kaplamalar, tekerlek izlerinin oluşumuna karşı yüksek direnç göstermektedir. Sahip oldukları yüksek bitüm oranı nedeniyle imalat sırasında uygun sıkıştırılmaları durumunda yüksek durabilite özelliği göstermektedir. Ek olarak, bu tür kaplamalara ait karışımların üretimi ve sahada uygulanması sırasında (yüksek bitüm oranına sahip olmasından dolayı) bitüm akabilmektedir. Bu akmayı önlemek amacıyla, karışımda genellikle elyaf kullanılmaktadır. Ancak bazı durumlarda polimer kullanılarak modifikasyona gidilebilmektedir.

Geçirimli asfalt karışımı: Homojen açık gradasyonlu malzemelerle (yüksek oranda kaba agregaya, ince agrega ve daha az oranda filler) oluşturulmaktadır. Boşluk oranı, bu karışım türü için yüksektir. Sahip olduğu geçirgen yapısı ile üstyapıya giren suların drenajı bu tür kaplamalar ile sağlanabilmektedir. Bitüm akma problemi, açık gradasyonlu yapısından kaynaklı olarak ortaya çıkmakta, bunu önlemek için de elyaf veya polimer türü malzemeler ile bitümlü karışım desteklenmektedir.

Mastik asfalt karışımı: Kesik gradasyonlu, düşük orandaki kaba agreganın zengin bir harç (bitüm+ ince agrega+ filler) içinde dağılmış halde bulunduğu boşluksuz karışım tipidir. Bu tür karışımların bitüm oranı yüksek, boşluk oranı düşüktür. Tekerlek izi oluşumunun önlenmesi için sert bitümler kullanılmakta ve oluşturulan kum+ filler+ bitüm harcı ile istenilen mukavemet sağlanmaktadır.

Kaba agregalar bu harcın içinde iskelet teşkil etmeyecek şekilde dağılmaktadır. Sıcak dökülebilir ve sıkıştırma gerektirmemektedir. Bu tür karışımların yüzey pürüzlülüğü, önceden bitümle kaplanmış agreganın yüzey üzerine serpilip sıkıştırılmasıyla sağlanmaktadır. Mastik asfalt çeşitli trafik ve iklim koşulları altında yollarda köprü üstlerinde ve havaalanlarında kullanılmaktadır.

Kum asfalt karışım: Bu sıcak karışım türü, sıvı petrol asfaltı veya bitümlü emülsiyon formunda bitüm ile kumun karışımı ile oluşmaktadır. Karışım sıcak karışımın imal edildiği tesislerde üretilebildiği gibi yerinde yapılabilmektedir.

Yukarıda kısaca sunulan BSK' lardan oluşan kaplamaların uygulandıkları yollarda tasarlanan servis ömrü hizmet verebilmesi için bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar aşağıdaki gibi kısaca özetlenebilir (Behiry, 2013; Chen vd., 2004; Hicks vd., 1999; Theyse, 2002; Tutumluer, 1995; Uzan, 2004).

- **Stabilite:** Üzerine etkiyen yüklerden dolayı meydana gelebilecek deformasyonlara karşı koyma yeteneğine stabilite denmektedir. Stabil olmayan kaplamalar, tekerlek izi ve ondülasyon oluşumları ile göze çarpmaktadır.
- **Dayanıklılık:** Hava, su, sıcaklık ve trafiğin zarar verici etkilerine direnme yeteneğine dayanıklılık (durabilite) denmektedir. Direnç kaynağı, bitümden geldiği gibi agrega özelliklerinden ve karışım tasarımlarından da gelebilmektedir.
- **Esneklik:** BSK' ların çatlamadan hafifçe eğilebilme ve temel ve alt temel tabakalarının geçici oturmalarına uyabilme yeteneğine esneklik denmektedir. Esnek özelliğe sahip olmayan BSK' lar, trafik yükleri ve çevre koşulları altında çatlak, ondülasyon, tekerlek izi gibi yüzey bozulmalarına maruz kalır.
- **Yorulma Dayanımı:** Kaplamalar, trafik altında tekrarlı yüklemelere dolayısıyla gerilmelere maruz kalırlar. Bu tekrarlı yüklemelere/gerilmelere karşı koyabilme yeteneği yorulma direnci olarak tanımlanır.
- **Geçirimsizlik:** Kaplamaların içinden hava ve su geçişine karşı gösterdiği dirence geçirgenlik denmektedir. Kaplamaların sahip oldukları boşluk oranı neticesinde doğal olarak sahip oldukları bir özelliktir.

- İşlenebilirlik: BSK' ların karıştırma ve sıkıştırılma kolaylığı olarak tanımlanır. İşlenebilir sıcaklığın tayin edilebilmesi amacıyla farklı sıcaklıklarda viskozite deneyleri yapılmakta, buradan elde edilen veriler ışığında karışım ve serim sıcaklığı tayin edilebilmektedir. İşlenebilirlik problemlerine en sık olarak serim sırasında karşılaşılmaktadır.
- Kayma Dayanımı: Tezin ana konusunu oluşturan bu kavram, BSK' nın özellikle ıslak halde iken kaymaya karşı gösterdiği direnci olarak tanımlanmaktadır. Yüksek kayma dayanımı elde etmeye ilişkin faktörler, kaplamada yüksek stabilite için ön görülen faktörlerle benzerlik göstermektedir. Birçok parametre kaplama kayma direncini etkilemekle beraber bazılarının üzerinde önemli durulması gerekmektedir. Örneğin, uygun bitüm içerikleri bunlardan biridir. Fazla miktarda kullanılan bitüm, sıcak ve yükleme koşullarına bağlı olarak kasma eğiliminde olacaktır. Bu durum kaplamanın kayma direncinin düşmesine bir etkindir. Agregat özellikleri en önemli etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Pürüzlü yüzey dokusuna, kübik şekle ve yüksek dayanıma sahip agregalar, yüksek kayma dayanımına sahip bir kaplamanın oluşumundan önemli bir rol alır.

2.5.2. Yüzeysel kaplamalar

Yüzeysel kaplamalar mevcut kaplamaların bakımını yaparak özelliklerini iyileştirmek, koruyucu bir tabaka gibi mevcut üstyapının ömrünü uzatmak veya düşük hacimli yollarda direkt olarak bir kaplama tabakası olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüzeysel kaplamalar, üstyapı mühendisliğinin temel güvenlik bileşeni olan kayma direncinin korunmasında veya yeniden kazanılmasında sıkça kullanılan uygulamalardır (Cafiso ve Taormina, 2007; Saykin vd., 2012).

Yüzeysel kaplamaların performansı yapım şartları, malzeme özellikleri ve miktarları, trafik, hava ve çevre koşulları gibi bir takım faktörlere bağlıdır (Uz ve Gökalp, 2017b). Yüzeysel kaplamalar, genel olarak iki farklı kategori altında incelenmektedir. Bunlar sathi kaplamalar ve harç tipi kaplamalardır. Bu

kaplamalar hakkında, raporun bu kısmında kısmi olarak değinilecek, özellikleri, avantaj ve dezavantajlı yönleri bilimsel çalışmalar ışığı altında ortaya konacaktır.

Sathi kaplamalar: Sathi kaplama, bir veya daha fazla agrega ve bitümlü bağlayıcı tabakalarını içeren ekonomik yüzeysel kaplama tipidir. Bu tür kaplamalar hem üstyapı inşaatında hem de mevcut yolların bakımı, korunması ve ömrünün uzatılması için kullanılabilmektedir. Bu tip kaplamaların serilmesi kolay, maliyeti ucuz olmaktadır. Çok az yük taşıma kabiliyetine sahip olması nedeniyle trafik hacmine sahip yollarda direkt olarak kaplama tabakası olarak kullanılmakta, üstyapının yük taşıma kapasitesi hesaplanırken de dikkate alınmamaktadır. Sathi kaplamaların kolay inşa edilmesi ve maliyetinin düşük olması, Yeni Zelanda, Güney Afrika, Türkiye, Kanada vb. gibi ülkelerde hem aşınma tabakası hem de bakım onarım yöntemi olarak yaygın biçimde kullanılmasında etkin bir rol oynamıştır (Gransberg ve James, 2005; Karasahin vd., 2011; Uz ve Gökalp, 2017b). Örneğin, Yeni Zelanda’da toplam yol ağının % 95’ i, Türkiye’de toplam yol ağının % 65’ i sathi kaplamalı yollardan oluşmaktadır (Gransberg, D; vd., 2005; Terzi vd., 2013; Wilson ve Black, 2008).

Sathi kaplamaların farklı fonksiyonel özelliklerinde mevcuttur (Adams ve Richard Kim, 2014; Arıkan Öztürk, 1998; Cenek ve Jamieson, 2005; Çabuk, 2010; Gransberg ve James, 2005; Wilson ve Black, 2008). Bunlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

- (1) Düşük trafik hacmine sahip yollar için uzun ömürlü, ekonomik yüzeyler sağlamak.
- (2) Yüzey suyunun yol temellerine veya çatlamış kaplamalarda su sızmasını engellemek.
- (3) Kaplama yüzeylerindeki gevşek agrega parçacıkları arasında bağ kurmak ve bunları birbirine bağlamak ve kopan kısımları doldurmak.
- (4) Trafik yükleri altında cıllanmış yol yüzeylerini yenilemek.
- (5) Yaşlanmış bitümlü kaplamaları iyileştirmek.
- (6) Ertelenmiş veya aşamalı kaplama inşası durumlarında geçici kaplama görevi görmek.

- (7) Bitümlü tabakaların granüller yol tabakasına yapışmasına yardımcı olmak.
- (8) Bitümlü tabakaların birbirine ya da yeni bir tabakanın eskisine yapışmasını sağlamak.
- (9) Düşük hacimli yollarda toz ve gürültü kontrolü sağlamak ve
- (10) Mevcut bir kaplamanın estetik görünümünü geliştirmektedir.

Sathi kaplama performansını etkileyen tasarım ve yapım aşamasında dikkate alınması gereken çok sayıda faktör bulunmaktadır. Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken faktörler trafik, agrega tür ve boyutunun seçimi, bağlayıcı tipi ve miktarı, yüzey durumu, bitüm püskürtme sıcaklığı gibi parametrelerdir. Sathi kaplama performansı ayrıca yapım ile ilişkili parametrelere de bağlıdır. Bunlar bağlayıcının yüzeye üniform uygulanması, bağlayıcı ve agrega serimi ile agrega serimi ve silindirleme arasında geçen zaman, malzemenin yapıma uygunluğu, yapımda kullanılan ekipmanların durumu, yapım öncesi, esnası ve sonrası hava durumu ve çevresel koşullar gibi faktörlerdir (Adams ve Kim, 2014; Cenek ve Jamieson, 2005; Gransberg, vd., 2005; Gransberg ve James, 2005; Hidayatiningrum ve Suparma, 2011; Karasahin vd., 2011; Wilson ve Black, 2008).

Harç tipi kaplamalar: Harç tipi kaplamalar, bakım/onarım ve koruma amaçlı kullanılan en ileri yüzey iyileştirme uygulamalarından birisidir. Harç tipi kaplama asfalt emülsiyonu, iyi gradasyonlu ince agrega, su, mineral filler ve kimyasal katkı karışımı ile elde edilmektedir. Bitümlü harç tipi kaplamalar; bitüm emülsiyonu, granülometrik agrega, mineral filler, su ve katkı maddelerinin belli bir oranda karışımından oluşmaktadır. Malzeme, hareketli bir sericide karıştırılıp, kesintisiz olarak serilmektedir. Hareketli serici önceden belirlenmiş oranlarda karışım bileşenlerini ölçerek karma makinesine göndermektedir. Tipik karışımının oluşumunda agregayı sırasıyla çimento (filler), su, katkı maddesi ve emülsiyon izlemektedir. Bahsedilen içerikler karıştırıldığında, kremsi (yumuşak), homojen ve akışkan bir karışım elde edilir. Harç tipi kaplamalar, seçilmiş malzemelerin bilimsel metotlar ile karışım tasarımlarının yapılması, teknik yapım şartnamelerinin uygulanması ile başarı ile uygulanabilirler (Çabuk, 2010; Florence ve Southgate, 1970).

Harç tipi kaplamaların, yalnızca otoyol veya caddelerde değil havaalanı pistleri, otopark ve köprü döşemelerinde mevcut kaplama yüzeylerinin onarım ve koruyucu bakım uygulamalarında kullanılması mümkündür. Harç tipi kaplamalar, maksimum agrega boyutundan 1,5 kat daha kalın olacak şekilde ve ağır trafik koşulları altında yapısal dayanım amacı ile uygulanmamalıdır. Harç tipi kaplamanın birincil amacı mevcut kaplamayı korumak ve ömrünü uzatmaktır. Harç tipi kaplamalar, çatlak doldurma, eski veya yeni kaplama yüzeyini oksitlenmeden, sudan, nemden ve trafik aşınmasından koruma veya iyileştirme gibi amaçlar için kullanılmaktadır (Florence ve Southgate, 1970; Hall vd., 2001; Khan, 1998; Khan ve Wahhab, 1998; Kucharek vd., 2010; Oikonomou ve Eskioglou, 2007). Harç tipi kaplamaların avantaj ve dezavantajlarına yönelik yapılan literatür aşamasında (Dunn, 1996; Hall vd., 2001; Hicks vd., 1997;; McPherson ve Muchnick, 2005; Oikonomou ve Eskioglou, 2007) özetle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır. Harç tipi kaplamaların avantajları şu şekilde sıralanabilir.

- (1) Düşük maliyet,
- (2) Çatlak kapama,
- (3) Kolay uygulama,
- (4) Asgari donanım ve insan gücü gereksinimi,
- (5) Az malzeme ve enerji gereksinimi,
- (6) Yapım hızı,
- (7) Kaplama faydalı ömrünün uzatılması ve
- (8) Kayma direncini ve trafik güvenliğini artırmak.

Harç tipi kaplamaların dezavantajları ise (1) Ömrünün kısa olması (2) Tasarım aşamaları ve kıstaslarının eksikliği,(3) Çok sayıda yapım kısıtlamaları olarak belirtilebilir.

Karartma örtüsü: Karartma örtüsü, su geçirimsizliği sağlamak kılcal çatlakları doldurmak, kaplamadaki gevşek agrega sonucu malzeme kaybını önlemek, yüzey görünümünü iyileştirmek için var olan mevcut kaplamaya bitüm püskürtülerek uygulanan bir bakım yöntemidir. Bu nedenle, bu uygulama yaşlanmış ve sökülmeğe başlamış kaplamalarda kullanmak daha uygun olmaktadır. Bazı

modifiye katkılı bitümler (kauçuk modifiyeli bitüm, polimer modifiyeli bitüm) geleneksel, klasik bitümlere göre yaşlanması daha yavaş ilerlemektedir. Karartma örtüsü; yapısal çatlakları, temel problemlerini, aşırı agrega kaybını ve diğer büyük kaplama bozukluklarını düzeltmemektedir. Karartma örtüsü; yaşlanmış ve sökülmüş sıcak karışım yüzeylerinde, sathi kaplama uygulanmış yüzeylerde ve açık gradasyonlu sıcak karışım yüzeyleri gibi emülsiyonun yüzeye nüfuz etmesi beklenen yerlerde kullanılmaktadır. Karartma örtüsü kaplama yüzeyini koyulaştırarak bu bölgede belirgin bir hat oluşturmaktadır (Çabuk, 2010; Prapaitrakul vd., 2005).

Mikro-yüzey (ince yüzey) kaplamalar: Mikro-yüzey kaplamalar, yapısal olarak harç tipi kaplamalar ile benzerlik göstermektedir. Mikro yüzey uygulamaları için hazırlanan karışımın içinde polimer kullanılmaktadır. Buradaki amaç ise, agrega ve emülsiyon ve uygulanacak yüzey arasında daha iyi bir yapışma özelliği kazandırmaktır. Harç tipi kaplamalardan farklı olarak, mikro yüzey kaplamalarda kesilme karışım içerisine eklenen çeşitli kimyasallar kullanılarak yapılmakta, harç tipi kaplamalardaki gibi buharlaşma işlemi beklenmemektedir. Mikro-yüzey kaplamaların kullanımında, çeşitli avantajlar söz konusudur. Bunlardan bazılarını şöyle sıralamak mümkündür:

- (1) Düşük maliyete sahiptir.
- (2) Mevcut yol ömrünü uzatır.
- (3) Yüzey dokusunu iyileştirir.
- (4) Kolay ve hızlı uygulanabilir.
- (5) Düşük karbon ayak izine neden olur ve
- (6) Yüzeyden kopmaların olduğu yerleri doldurur.

Mikro-yüzey kaplama uygulamalarının sayılan avantajlarının yanı sıra, çeşitli dezavantajları da vardır Bunlar; (1) Büyük yapısal düzensizliği ortadan kaldırmaması; (2) Uygulamadan birkaç hafta sonra yüzeyde duran gevşek taşların yol yüzeyinde kalacak olması; (3) Yoğun trafik akımının olduğu yollarda kullanılmasına uygun olmamasıdır.

2.6. Agregalar Türleri ve Karakteristik Özellikleri

Agregalar, betonarme yapıların ve karayolu alt ve üstyapılarının iskeletini oluşturan, yani yapılara hacim kazandıran, farklı mekanik, fiziksel özelliklere ve kimyasal içeriğe sahip yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır (MIRO, 2018). Hem yol alt ve üstyapılarının hem de beton ile inşa edilmiş diğer yapıların özelliklerinin hizmet ömrü süresince öngörülen fonksiyonel ve yapısal performanslarını sergileyebilme kabiliyetleri, agregaların sahip oldukları özelliklerle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle herhangi bir yapıda kullanılan agregaların özellikleri tüm boyutlarıyla ortaya koymak oldukça önemlidir. Agregalar, doğal olarak üretilbildikleri gibi, yapay (maden artığı, yıkım malzemesi ve geri dönüştürülmüş malzemelerden ve endüstriyel atık olan cüruf) yollardan da elde edilebilir (Gökalp vd., 2016). Tezin bu kısmında agrega türleri ile ilgili bilgiler akademik çalışmalar ışığı altında özetlenecektir. Bunun yanı sıra, bu tezde kullanımı araştırılan ve yapay agrega sınıfında yer alan cüruf için ayrı bir başlık açılarak cürufların detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

2.6.1. Doğal agregalar

Kırılmış taşları, kum ve çakılı kapsayan doğal agregalar, yeryüzünde en çok bulunan doğal kaynaklardır. Doğal agregalar inşaat, tarım ve endüstri tarafından karmaşık kimyasal ve metalürjik süreçlerde kullanılan bir temel hammaddedir. Aynı zamanda, agregalardan üretilen temel ürünlerin düşük değerine rağmen, agregalar, bir ulusun ekonomik ve sosyal refahının önemli bir göstergesi olarak da benimsenmiştir. Bunu örnekler ile açıklamak gerekirse, asfalt kaplamaların %90'ından ve betonun %80'inden fazlasını agregalar oluşturmaktadır. Yani inşaat alt ve üstyapılarının ekonomik olarak inşa edilmesinde agregalar çok büyük bir rol almaktadır.

Boya, kâğıt, plastik ve cam gibi endüstriyel ürünlerin imal edilmesinde toprak, kum, çakıl, kırılmış taş formunda ham madde olarak agregalara ihtiyaç duyulmaktadır. Toz haline getirildiğinde, tarımda, ilaçta ve ev ürünlerinde

kireçtaşı önemli bir mineral katkı maddesi olarak kullanılır. Agregaların kullanım alanlarını, çevre korumasına olan katkısıyla (su arıtma filtre görevi görmesi ve elektrik santralleri tarafından üretilen kükürt dioksit emisyonlarının azaltılması vb.) de genişletmek mümkündür (Sherif, vd. 2015).

Doğal agregaları, jeolojik oluşumlarına göre sınıflandırdığımızda üç grup karşımıza çıkmaktadır. Bunlar aşağıda sıralandığı gibidir.

- (1) Volkanik (Magmatik),
- (2) Tortul (Sedimenter),
- (3) Metamorfik (Başkalaşım) agregalardır.

Her agrega türü, inşaat mühendisliği uygulamalarında aktif bir şekilde kullanılmaktadır. Agrega türlerinin kaynağının farklılık olması, doğal olarak agregaların fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin birbirinden farklılık doğurmaktadır. Aynı zamanda, kimyasal içerik bakımında farklı olan agregaların mineralojik içeriğinin değişmesine neden olmaktadır. Bu değişimlerin, belirlenmesi aradaki farklılıkların ortaya konması adına bir dizi test ve analizlerin yapılmasını gerekli kılmaktadır. Magmatik kayalar, ergimiş kaya parçalarının soğuması ile meydana gelen kaya türleridir. Soğuma sürecinde çeşitli farklılaşmalar oluşmaktadır. Bunun neticesinde camsı veya kristal bir matris içerisinde kristaller oluşmaktadır.

Magmatik kayalara, granit, siyenit, peridotit, pegmatit, volkanik cam, feldspat ve bazalt gibi birçok örnek verilebilir. Kütleli olarak büyük boyutlar, yüksek birim hacim ağırlıklarına, gözenekli yüzey yapıya, oluşum sürecinden kaynaklı olarak yüksek boşluk oranına, kristalleşen parçacıkların kapladığı yüzey yapısında dolayı pürüzlü bir yapıya sahip olan magmatik kayalar, yüksek cilalanma direncine ve parçalanma-aşınma mukavemetine/dayanımına sahiptirler.

Tortul kayalar, hava koşullarıyla ve/veya kayaların çeşitli çevresel nedenler ile parçacıkların birleşmesiyle meydana gelmektedir. Doğal agrega rezervinin

yaklaşık % 80'i bu türden agregalar oluşturmaktadır. Magmatik kayaçlarla karşılaştırıldığında, katmanlı tabakalardan oluşan bu kayaçların şekil, yapı, boşluk oranı, dayanım ve hava koşullarına dayanıklılığı gibi fiziki ve mekanik özellikleri büyük farklılıklar gösterir. Kireçtaşı içeren kayaçların en yaygını olarak bilinen bu kayaçların saf kireçtaşı formu ile saf dolomit arasında değişen türlerinin mevcut olduğu bilinmektedir. Bunlara doğal kum ve çakıl, kumtaşı, kuvarsit, çakmaktaşı vb. gibi örnekler verilebilir.

Başkalaşım kayaçlarına değinilecek olursa; bunlar yerkabuğuna geri çekilen volkanik ve/veya sedimenter kayaçların değişken basınç ve sıcaklık altında boyutsal yapısının değişmesi ile meydana gelmektedir. Bu tür kayaçlara örnek verilecek olursa gnays, mermer, şist gibi kayaç söylenebilir (Egesi ve Akaha, 2012; Mamlouk ve Zaniewski, 2006; Manning ve Bird, 1995; Schön ve Wang, 1997).

Yol kaplamaları için kullanılan agregalar sadece kaplamanın üzerinde oturacağı temel malzemesi değil, aynı zamanda kaplamanın kendisini meydana getiren bir malzeme olarak da bilinir. Bu nedenle kullanıldığı katmanlara bağlı olarak farklı görev üstlenebilmektedir. Örneğin, kaplamanın üst tabakaları, alt tabakalar için koruma görevi görmek yanı sıra yüzeyde oluşturduğu makro ve mikro dokusu sayesinde yüzey sularının drene edilmesi görevini görür hem de emniyetli bir sürüş için yüzeyde kayma karşı bir direnç olgusu meydana getirir. Doğrudan, trafik yüklerinin ve çevresel faktörlerin üzerine etki ettiği yüzey olmasından dolayı, bu tabakada agregalar trafik yükleri altında aşınmaya, parçalanmaya ve donma-çözünme vakalarında kimyasal ayrışmaya karşı dirençli olmaları beklenmektedir. Sık karşılaşılan kaplama bozulma problemlerinin üstesinden gelebilmek için doğru ve kaliteli agreganın seçilmesi zorunlu olmakta, zira bunlardan beklenen özellikler standartlarda tanımlanmaktadır (Cachim, 2009; Egesi ve Akaha, 2012; Gökalp vd., 2016; Katz vd., 2000; Praticò ve Vaiana, 2013). Bu tez kapsamında, farklı agregaların farklı performans gösterdiği göz önünde bulundurulmuş ve farklı jeolojik oluşumlara sahip (bazalt, kireçtaşı, dere malzemesi) agregaların test edilmesi yoluna girilmiştir. Farklı kaynaklardan

temin edilen agregalardan en iyi özellikleri gösteren agregalar tezin amacı doğrultusunda kullanılmıştır.

2.6.2. Yapay agregalar

Yapay agregalar, doğal olarak elde edilmeyen ancak bir endüstriyel üretim (Çelik çürüfları, genişleştirilmiş kil vb.) sonrasında veya insanın yaşamsal faaliyetleri çerçevesinde kullandığı ve ömrünü tamamladıktan sonra geri kazanılan dönüştürülmüş beton, çüruf, maden, endüstriyel cihaz, alet. Atıkları vb. katı atık sınıfında yer alan ürünler olarak tanımlanabilir (Huang vd., 2007). Bu türden agregaların büyük bir çoğunluğunun, yol veya yapı gibi inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım potansiyeli bulunmaktadır. Bu tür agregalar, çok farklı kaynaklarda elde edilebilmektedir. Bunlardan bazılarına örnek verilecek olursa cam, tekerlek, plastikler, baca külleri, genişleştirilmiş killeri, çürüflar vb. saymak mümkündür (El-Assaly ve Ellis, 2001; Roth ve Eklund, 2003). Bu tez kapsamında, endüstriyel yan ürünlerden ve doğal agregalara nazaran çeşitli üstün teknik özellikleri bulunan çürüfların kullanımı üzerinde durulmuştur. Bu nedenle, yapay agrega türü olan çürüflar ile ilgili genişçe bilgiye yer verilecektir.

2.7. Çürüflar ve Çürüfların Karayolu İnşaatında Kullanımı

Dünya nüfusunun artması ve dünya çapında ticaretin gelişmesi tüm ulaşım türlerinde olduğu gibi karayolu ulaşım yatırımlarını hem ulusal hem de uluslararası anlamda gerekli kılmıştır. Bunun yanında, hizmette olan mevcut karayolu ulaşım altyapısının bakım/onarım veya yenilenme ihtiyacı da doğal olarak artmaktadır. Bu durum daha konforlu, güvenli, zaman israfı yaşanmadan bir ulaşım hizmetinin kullanıcılara sunulması amacıyla; hem yeni bir ulaşım altyapısının kurulmasını hem de mevcut altyapının iyileştirilmesini zorunlu kılmıştır. Dolayısıyla hacimce yol kaplamasının yaklaşık %90-95'ini oluşturan agregalara, kaplamanın farklı tabakalarında farklı amaçlar doğrultusundan kullanılmak üzere ihtiyaç doğurmuştur.

Dayanıklı yol kaplamalarının imalatı veya daha uzun süre hizmet verebilecek bir bakım/onarım için kaliteli agregaya olan talebi yükseltmiştir ki; bu durum giderek azalan doğal agrega kaynaklarına olan yönelimi de artırmıştır (Gökalp vd., 2018; Uz vd., 2016). Yol kaplamasının farklı tabakaları için büyük miktarlarda ihtiyaç duyulan agregaların temin edilmesi bir takım ekonomik ve çevresel problemlere yol açmıştır. Zaman zaman kaliteli agreganın temin edilmesinde 100'lerce km'yi aşan uzun mesafeler gerektirmekte, bu amaçla yüksek tonajlı araçlar kullanılmaktadır. Bunun ekonomik ve zamansal bir kayba neden olduğu açıktır. Aynı zamanda, doğanın tahrip edilmesi, araçlardan salınan sera gazları çevresel bir felakete de neden olmaktadır (Yüksel, 2017).

Yukarıda ifade edilen tüm kaygılar göz önünde bulundurularak, hem teknik hem çevresel ve ekonomik açıdan uygun alternatif agreganın kaynaklarına yönelim son zamanlarda artmıştır. Doğal agreganın yerini alabilecek ve doğal agreganın özelliklerini gösterebilecek alternatif malzeme arayışı tüm dünyada ilgilenilen bir konu olmuştur (Asi vd., 2007; Aziz vd., 2014; Aziz vd., 2015; Kavussi vd., 2016; Murari vd., 2015; Oluwasola vd., 2014; Oluwasola vd., 2015). Bu yönelim, karayolu alt ve üstyapı işlerinde çokça kullanılan agregalara sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde alternatif arayışını da hızlandırmıştır. Karayolu inşaatında sürdürülebilirlik çabalarından birisi, yol üstyapı kalitesini düşürmeden doğal malzeme kullanımını azaltmaya imkân verecek atıl ve atık malzemelerin kullanımını sağlamaktır (Arribas vd., 2015; Aschuri ve Yamin, 2011; Gökalp vd., 2018). Tüm dünyada, metal sanayi büyük miktarlarda endüstriyel yan ürün üretmektedir (Buzatu vd., 2015; Gökalp vd., 2018; Mihok vd., 2006; Primavera vd., 2016). Çelik cürufu, çelik üretim süreci sonucunda ortaya çıkan bir yan üründür ve üretimde kullanılan çeşitli katkı maddelerinin oksidasyonu sonucu ortaya çıkan oksit ve silikatlardan oluşan karmaşık kimyasal bir yapıya sahiptir (Fronek, 2012; Kayır, 2016; Mihok vd., 2006; Primavera vd., 2016; Sahu vd., 2016; Sasaki, 2015).

Türkiye yıllık 50 milyon ton üretim kapasitesi ile dünyadaki en büyük çelik üreticilerinden biridir. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği tarafından yayımlanan rapora göre 2020 yılı üretimi 35,8 milyon ton olduğu belirtilmiştir. Bu üretimle

elik üreten ülkeler arasında Türkiye dünyada 7. Sırada yer alırken, Avrupa’da ise en büyük elik retişı olmuştur(TD, 2021). Toplam elik üretiminin %10-15’inin cüruf olarak oluştğunu dikkate aldığımızda her yıl yaklaşık 4,5 milyon ton cüruf ortaya çıktığı öngörülebilir (Gökalp vd., 2018; Uz vd., 2014).

elik cürufunun ekonomiye kazandırılması Türkiye için oldukça önemli bir konudur. Cürufun, karayolları teknik şartnamesinde aranılan şartları sağlaması koşulu ile yol üstyapısında kullanım potansiyelinin araştırmaları ve doğal agreganın tamamının veya bir kısmının elik cürufları ile yer değiştirilmesi hem ekonomik hem çevresel açıdan yarar sağlayacaktır. Ne yazık ki, Türkiye’de atık malzemelerin yol inşaatında kullanımı çok sınırlıdır ve çoğunlukla teoride kalmıştır. Özelikle elektrik ark fırın cüruflarının büyük bir bölümü atık bertaraf alanlarında depo edilmektedir. İnert atık sınıfına giren bu endüstriyel yan ürünlerin teknik açıdan üstyapıda agrega olarak kullanımının araştırmaları bilimsel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır (Karasahin vd., 2011; Terzi vd., 2013; Yılmaz ve Sütaş, 2008; Yonar vd., 2015).

Atık malzemelerin geri kazanımı yėınların azalmasını ve doğal malzemelerin korunumu sağlayacaktır. Cürufun yol alt ve/veya üstyapısında kullanımı ile cüruf depolama sahalarında, salınan CO₂ miktarında ve yapım maliyetlerinde azalma görülmesi mümkündür. Ancak, çeşitli yönleri ile üstün özellikler gösteren cürufların (cürufların yüksek cilalanma direncine sahip olması) yol üstyapısında kullanımı ile kayma direnci açısından daha güvenli yolların hizmete kullanıcılara sunulmasına, böylelikle doğrudan ve/veya dolaylı olarak hem kişinin hem de ülkenin maddi ve manevi açıdan kayıp yaşamamasına neden olur. Ayrıca, yüksek cilalanma direncine sahip agregaya alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu anlamda ülkenin sahip olduğu kaliteli agrega yetersizliğinin kısmen de olsa önüne geçilmiş olacaktır (Buzatu vd., 2015; Gmez-Nubla vd., 2017; Krayushkina vd., 2012; Mauthoor vd., 2016; Mihok vd., 2006; Motz ve Geiseler, 2001; Pasetto vd., 2017; Yüksel, 2017).

Cürufların, doğal agregaların tamamının veya bir kısmının yerine yol agregası, demiryolu balastı, dolgu malzemesi ve beton agregası olarak geniş bir alanda

kullanımı üzerinde birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Çevresel açıdan sürdürülebilir bir kaplama karışımı geliştirmek için cürufların geçirimli kaplama tabakasında granit agregaların yerine kullanılabilirliğini araştıran Fwa vd. (2013), çalışmalarında hem saha hem de laboratuvar testlerine dayanan kaplama kayma direnci, yağışlı hava koşullarında yol işaretlerinin görünürlüğü ve lastik-kaplama arasında oluşan gürültü seviyesini incelemiştir. Bu çalışmada, çelik cüruflu asfalt karışımların yeterli drenaj kapasitesinde ve diğer karışımlarla karşılaştırıldığında daha iyi bir kayma direncine sahip olduğu ve daha az gürültüsü oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

Sorlini vd. (2012) EAF cüruflarının BSK tabakalarında kullanılabilirliğini değerlendirdikleri çalışmalarında, cürufların fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri tanımlamak için testler yapılmış ve % 40'a kadar EAF cürufu içeren BSK hazırlanmış ve test edilmiştir. Test sonuçları cürufların sahip olduğu özelliklerinin ilgili şartname limitlerinde kaldığını göstermiştir. Bir başka BSK türü olan ve bu tez kapsamında da imal edilen TMA karışımlarında çelik cüruflarının alternatif bir agrega olarak kullanılabilirliği Wu vd. (2007) tarafından araştırılmış, sonuç olarak da çelik cüruflu TMA karışımların ilgili şartname kıstaslarını sağladığı belirtilmiştir.

Aşınma tabakası karışımlarında ince agrega olarak çelik cürufun kullanımının karışımın özelliklerine olan etkisini Ziari ve Khabiri (2007) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada, Marshall testine ek olarak, yüksek sıcaklık dayanımı ve sünme sertliği testleri yapılmıştır. Araştırmacılar çelik cürufun bu şekilde asfalt betonunda kullanımının mümkün olduğunu raporlamışlardır. Krayushkina vd. (2012) tarafından benzer içeriğe sahip çalışmada BSK' da EAF cürufunun hem agrega hem de filler olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

EAF cürufu eklenmiş AB aşınma tabakasının kayma direnci performansı Kehagia (2009) tarafından araştırılmıştır. Sonuç olarak, EAF cüruflu karışımların kayma direnci performansı doğal agrega karışımlarından daha yüksek bulunmuştur.

Bunun yanında bir yıllık trafik koşulları altında EAF içeren AB aşınma tabakalarındaki kayma direncindeki düşüş %10-15 civarında olduğu rapor edilmiştir.

Khan ve Wahhab (1998), çelik cürufu ile harç tipi kaplamaların performansını geliştirmeyi amaçladıkları çalışmalarında çelik cürufu, kireçtaşı ve iki farklı emülsiyon ile laboratuvarında harç tipi kaplama numuneleri hazırlamışlardır. Çalışma sonunda, cüruf ve kireçtaşı içeren harç tipi kaplamalarda aşınma direnci bakımından önemli bir iyileştirme sağlandığı görülmüştür.

Doğal agregalarla kıyaslandığında EAF cüruflarının yüksek birim hacim ağırlık, köşelilik ve pürüzlülük gibi üstün özelliklerini ortaya koyan ve bunun sayesinde trafik yüklemesi ve değişken çevresel koşullar altında kaplamanın bozulmaya karşı daha dirençli oldukları gösteren birçok akademik çalışmanın olduğu bilinmektedir. Örneğin, Gökalp vd. (2016) ve (2015), EAF çelik cüruflarının üstyapının değişik tabakalarında agrega olarak kullanılabilirliğini KTŞ' de yer alan fiziksel ve mekanik özellikler açısından değerlendirmişlerdir. Yazarlar, cürufların karayolu teknik şartnamesinde tanımlanan kaplama tabakalarının imalatında kullanılacak agrega özelliklerine ait kıstasları neredeyse tümüyle sağladığı sonucuna varmıştır. Ayrıca, karayolu inşaatının farklı tabakalarında olası kullanma durumunda, çevreye olan etkileri de analiz edilen bu çalışmalarda, cürufların İnert ve/veya zararlı olmayan atık sınıfına girdiği belirtilmiştir.

Yılmaz ve Sütas (2008), Ferrokrom cüruflarının karayolu temel malzemesi olarak kullanımı ile ilgili yaptıkları çalışmada cürufların üstün fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı doğal agrega yerine temel tabakasında kullanılabilir olduğunu belirtmişlerdir.

Kambole vd. (2017), Afrika'da Bazik Oksijen Fırını (BOF) cürufunun yol kaplamalarında kullanılabilirliğini malzeme özellikleri ve sahadaki kaplama performansları açısından ele alıp araştırmıştır. BOF cürufu ile üretilen bitümlü sıcak karışımın birçok açıdan (tekerlek izi oluşumu, bağlanma, nem hassasiyeti ve soyulma direnci) doğal agrega ile üretilen bitümlü karışımdan daha üstün

performans gösterdiği görülen bu çalışmada teknik özellikleri bakımından da doğal agregalara oranla üstün yönlerin olduğu belirtilmiştir. Ancak, uzun dönemde içeriğindeki ağır metallerden kaynaklı olarak yağmur suları ile birlikte bu ağır metallerin içme sularına karışabileceği belirtilerek çevre için bir problem yaratabileceği ifade edilmiştir. Son olarak, kimyasal içeriğinde sahip olduğu serbest kalsiyum oksit ve magnezyum oksitten kaynaklı olarak su ile etkileşimi halinde genleşeceğini ve kaplamanın kararlı yapısını olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir.

2.8. Pürüzlendirme Uygulamalarının Örnekleri

Erken dönem kayma direncinin artırmak amacıyla, imalat aşamasında aşınma tabakaları üzerine uygulanan bir iyileştirme yöntemi olan görülen pürüzlendirme uygulaması, önceki çalışmalarda oldukça kısıtlı olarak yer almaktadır. Tezin bu bölümünde pürüzlendirme uygulaması üzerine yapılan çalışmalar olarak ele alınmış, detaylıca özetlenmiştir.

McHale vd. (2010) tarafından aşınma tabakası yüzey kayma direncinin iyileştirilmesi üzerine yaptıkları çalışmada agrega olarak kuartz-dolorit kullanılmış, farklı gradasyona sahip agregalardan oluşan TMA aşınma tabakası imal edilmiştir. İmal edilen TMA aşınma tabakaları üzerine farklı boyutlarda agrega serpilerek pürüzlendirme işlemi gerçekleştirilmiş ve TMA kesimlerinin yüzey dokusunda ve kayma direncinde oluşan değişim incelenmiştir. Bu çalışmada, en büyük agrega boyutu 14-10-8-6 mm olacak şekilde TMA kesimleri her biri 150 metre olacak şekilde ikişer adet olarak inşa edilmiştir. İnşa edilen aşınma tabakaların biri pürüzlendirilmiş, diğerinde ise pürüzlendirme uygulaması yapılmamıştır. 1-2,85 mm boyutuna sahip kuartz-dolorit agregalar kullanıldığı pürüzlendirme uygulamasında, metre kareye 1 kg gelecek şekilde TMA aşınma üzerine ikici veya üçüncü silindirajdan sonra serpilerek tatbik edilmiştir. Her bir kesimin yüzey karakteristik özellikleri (doku ve kayma direnci) incelenmesi için farklı prensiplere sahip ölçüm cihazları kullanılmıştır. Yüzey dokusu için sensörlü doku derinliği ölçer kullanılırken, kayma direnci ölçümünde üç farklı cihazdan faydalanılmıştır. Bunlar, yanal kuvvetölçer, Grip

kayma direnci aracı ve kilitlenen tekerlek kayma direnci aracıdır. Ölçümler, deneme kesimlerinin trafiğe açılmadan önce ve açılmasından 3 gün, 6 ay ve 10 ay sonra olacak şekilde yapılan bu çalışmada, ilk on aylık ölçümler neticesinde elde edilen veriler paylaşılmıştır. Yüzey doku ölçümleri tekerlek izinden ve tekerlekler arasında yapılmışken, kayma direnci ölçümleri de yalnızca tekerlek izinde yapılmıştır. 10 aylık süreç neticesinde elde edilen bulguları kaplama yüzey dokusu ve kayma direnci özelinde aşağıda özetlenmiştir.

1. Kaplama yüzey doku derinliği pürüzlendirme malzemesinin kullanıldığı kesimlerde, kullanılmayan kesimlere göre daha az olarak belirlenmiştir. Bu durum için pürüzlendirme malzemesinin, henüz serimi yapılmış sıcak kaplamanın var olan yüzey doku boşluklarını doldurmasında kaynakladığı öne sürülmüştür.
2. Düşük hızda (50 km/s) yapılan kayma direnci ölçümlerinde, trafiğe açıldıktan sonraki üçüncü günde, pürüzlendirme yapılmış her deneme kesiminde dalgalı ama pürüzlendirme yapılmamış kesime oranla daha yüksek kayma direnci elde edilmiştir. Pürüzlendirilmiş kesimlerde kayma direnci katsayısı 0,90'ları aşarken, pürüzlendirilmemiş kesimde ise bu değer, 0,80'lerde gözlenmiştir. Ancak, pürüzlendirilmiş ve pürüzlendirilmemiş kesimlerde ki değerler kendi aralarında birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır. Altı aylık trafik altında verilen hizmetten sonra yapılan ölçümlerde, pürüzlendirme yapılan ve yapılmayan tüm kesimlerde belirgin bir düşüş gözlenmiştir. Bu belirgin düşüş gerçekleşmesine rağmen tüm kesimlerde, birbirine çok yakınsak kayma direnci katsayısı görülmüştür. Kayma direnci katsayısı 0,70 civarına kadar inmiştir. On aylık dönem sonrasında kayma direncindeki azalma devam etmiş ve kayma direnci katsayısı 0,60'lı değerlerin altına kadar gerilemiştir.
3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ile farklı hızlarda (20-120 km/s) deneme kesimleri üzerinde henüz trafiğe açılmadan ölçümler yapılmıştır. Normal TMA aşınma tabakalarında, hızın artışı ile beraber kayma direncinin her bir kesim için düştüğü gözlenmiştir. Ancak, pürüzlendirilmiş kesimlerde bu davranış biçimi görülmemiştir. Yani artan hızlarla beraber neredeyse kaplama kayma direncinde değişim gözlenmemiştir. Üç günlük trafik sonrasında, hızla beraber kaplama kayma direncinde tüm kesimler için bir

düşüş gözlenmiştir. On aylık dönem sonrasında, tüm kesimlerin düşük hızlarda iyi katma direnci performansı gösterirken yüksek hızlarda limit değeri olan SN:30 değerlerine yaklaştıkları görülmüştür.

Pürüzlendirme uygulamasının, TMA yüzey tabakası kayma direnci özelliklerini hem erken dönem hem de uzun dönemde belirgin bir şekilde artırma potansiyelinin olduğunu belirten bir çalışma Baran ve Lowe (2011) tarafından yapılmıştır. İlgili çalışma, Queensland eyaleti sınırları içerisinde yer alan farklı yollar (Nicklin yolu; Hope adası yolu; Redland körfeşi yolu) üzerinde pürüzlendirilmiş ve pürüzlendirilmemiş TMA aşınma tabakası deneme kesimleri inşa edilmiştir. Pürüzlendirme malzemesi olarak 2,36-0,075 mm boyutlarına sahip ve %70 en az kuartz olan agrega kullanılmıştır. Deneme kesimleri üzerinde hem doku derinliği hem de kayma direnci ölçümleri yapılan bu çalışmada kayma direnci ölçümleri Norsemeter (ROAR) isimli kayma direnci ile 60 km/h yapılırken, doku derinliği ölçümleri ise kum yama yöntemi ile icra edilmiştir. Elde edilen sonuçlar her bir yol için aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür.

- Nicklin Yolu: 400 metre olarak inşa edilen yolun 230 metresi pürüzlendirilmiştir. Bu deneme kesimlerinde 1. Gün, 1. hafta, 1., 2. 3. aylarda olma üzere toplamda 5 defa ölçümler alınmıştır. Bu deneme kesiminde ince kırılmış cüruf kullanılmış, agrega serimi tarımda kullanılan bir traktör, sıkıştırma işlemi ise ön tarafı lastik tekerlek arka tarafı çelik bandaja sahip bir kompaktör ile yapılmıştır.
1. Pürüzlendirme yapılmamış TMA deneme kesimi üzerinde yapılan doku derinliği ölçüm yaklaşık olarak 0,8 mm (beklenen değerin altında) olarak belirlenmiştir. Pürüzlendirme uygulamasının tatbik edildiği kesimlerde ise doku derinliği 0,6 mm olarak belirlenirken, 3. ay ölçümlerinde bu değerin 0,7 mm olduğu görülmüştür. Bu durum, araştırmacılar kaplama yüzeyinde görülen bu değişim artan trafik ile deneme kesimleri üzerinde uygulanan pürüzlendirme agregasının yüzeyden sökülmesi ile ilişkilendirilmiştir.

2. Pürüzlendirme yapılmamış TMA deneme kesimi üzerinde yapılan kayma direnci başlangıçta 0,40 iken üzerinden geçen trafik sayısı artıkça (3. ve 6. aylar arasında) bu değer 0,47 'ye kadar yükselmiştir. Pürüzlendirme uygulamasının yapıldığı kesimlerde ise kayma direnci başlangıç değeri 0,49 olarak belirlenmiştir. Ancak, ilk hafta sonrasında bu değer 0,42' ye kadar düşmüştür. Yolun trafiğe açıldıktan bir ay sonrasında, standart TMA ile pürüzlendirilmiş TMA arasında kayma direnci açısından bir farklılık görülmemiştir.

- Hope Adası Yolu: En büyük dane çapı 14 mm olan agrega gradasyonu ile inşa edilen yolun TMA aşınma tabakasında hem pürüzlü hem de pürüzlendirilmemiş kesimlere yer verilmiştir. Bu deneme kesimlerinde 1. gün, 1. hafta, 3. ay ve 4. yıl olmak üzere toplamda 4 defa kayma direnci ölçümleri yapılmıştır. Bu, kesimde yıkanmış ve kurutulmuş orta boyutta kum pürüzlendirme malzemesi olarak kullanılmışken, sıkıştırma işlemi yüksek tonajlı çelik bandaja sahip bir silindir kompaktör ile agrega serim sonrasında yapılmıştır.

1. Kaplama üzerinde kayma direnci ölçümler 1. gün, 6. gün, 2. 3. aylarda ve 3. yılda olmak üzere toplamda 6 defa alınmıştır. Pürüzlendirme yapılmamış TMA deneme kesimi üzerinde yapılan kayma direnci başlangıçta 0,33 iken üzerinden geçen trafik sayısı artıkça (3. ayda) bu değer 0,40'a kadar yükselmiştir.

2. 4. yılda yapılan ölçümlerde ise bu değer tekrar azaldığı gözlenmiştir. Pürüzlendirme uygulamasının yapıldığı kesimlerde ise kayma direnci başlangıç değeri, normal TMA yüzeyinde elde edilen değerden, neredeyse iki kat yüksek çıkmıştır. Ancak, artan trafik ile birlikte bu değer lineer bir şekilde düşmekte olduğu yapılan ölçümler neticesinde görülmüştür. Ancak, 4. yılda alınan ölçüm sonuçları, pürüzlendirilmiş kesimin daha yüksek olduğu ortaya koymuştur.

- Redland Körfez Yolu: 1400 metre olarak en büyük dane çapı 14 mm olan agrega gradasyonu ile inşa edilen yolun 850 metresi pürüzlendirilmiştir. Bu deneme kesimlerinde 1. gün, 6. gün, 2. ve 3. aylarda olmak üzere toplamda 4 defa ölçümler alınmıştır. Bu, kesimde de Hope adası yolundaki pürüzlendirme yıkanmış ve kurutulmuş orta boyutta kum pürüzlendirme malzemesi olarak kullanılmışken, sıkıştırma işlemi yüksek tonajlı çelik bandaja sahip bir silindir kompaktör ile agrega serim sonrasında yapılmıştır.

1. Pürüzlendirme yapılmamış TMA deneme kesimi üzerinde yapılan doku derinliği ölçüm yaklaşık olarak 1,5 mm (beklenen değerin üstünde) olarak belirlenmiştir. Pürüzlendirme uygulamasının tatbik edildiği kesimlerde ise doku derinliği 1,0 mm olarak belirlenmiştir.
2. Kaplama üzerinde kayma direnci ölçümler 1. gün, 6. gün, 2. 3. aylarda ve 3. yılda olmak üzere toplamda 6 defa alınmıştır. Pürüzlendirme yapılmamış TMA deneme kesimi üzerinde yapılan kayma direnci başlangıçta 0,42 iken üzerinden geçen trafik sayısı artıkcça (3. ayda) bu değeri 0,46'a kadar yükselmiştir.
3. Üçüncü yılda yapılan ölçümlerde ise bu değerde pek bir değışim olmadığı gözlenmiştir. Pürüzlendirme uygulamasının yapıldığı kesimlerde ise kayma direnci başlangıç değeri, 0,5 ile 0,6 arasında değışmekte olduğu rapor edilmiştir. Ancak, artan trafik ile birlikte bu değerde düşüş gözlenmiş, ancak, üçüncü yılda alınan ölçüm sonuçlarında dahi pürüzlendirilmiş kesimin kayma direncinin standart TMA' ya oranla hala daha yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Batı Avustralya'da TMA aşınma tabakasının erken dönem kayma direncinin artırılması konusunda bir teknik şartname oluşturulmuştur. Bu teknik şartnamede, maksimum dane boyutu 3 mm olan agregaların metre kareye 1,5 kg düşecek şekilde kaplama üzerine serpilmesi ile pürüzlendirme yapılabileceği belirtilmiştir. Pürüzlendirme uygulama zamanı ise, son sıkıştırma işlemi

sırasında, kaplama henüz sıcak iken yapılması önerilmiştir. Kullanılacak agrega türünü de kısıtlayan bu teknik şartnamede, pürüzlendirme amacıyla kullanılacak agrega türü güney Avustralya bulunan Barossa ocağından siyah granit ve Guyana'dan temin edilebilecek gri kalsit boksit olarak tanımlanmıştır (MRWA, 2010; 2017).

Almanya yol yapım birimi tarafından yayınlanan TMA yapım rehberinde (Drüschner, 2005), pürüzlendirme uygulamasına yer verilmiştir. Pürüzlendirme uygulamasında ki amaç, diğer çalışmalarda olduğu gibi, TMA aşınma tabakasının erken dönem kayma direncini yükseltmek olduğu ifade edilen bu rehberde, pürüzlendirme malzemesinin serim miktarının genelde 1-2 kg/m² kadar olduğu belirtilmiştir. Pürüzlendirme uygulaması için 1/3 mm boyutunda agreganın serilmesi tavsiye edilen bu rehberde, uygulama sonrasında 0,25/2 mm malzemenin serilmesi kayma direnci açısından daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Ancak, 2/5 mm malzemenin gürültü ve emisyonu artırdığı için uygulanmamasını önermiştir. Pürüzlendirme malzemesi serilmesinin ilk silindirajdan sonra veya sıcak karışımın yola serilmesinden hemen sonra yapılabilceği belirtilmiştir.

Almanya'da erken dönem kayma direncinin artırılması amacıyla yapılan bir diğer pürüzlendirme uygulamasına Nicholls (1998) kendi kitabında yer vermiştir. Burada, tozdan arındırılmış, 1-5 mm boyutuna sahip agregaların 0,5 / 2,0 kg/m² miktarında yüzeye serilmesinin yapıldığını, serim işleminin de ilk ve ikinci silindiraj arasında yapıldığını belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Agregalar

Bu tez kapsamında farklı kaynaklardan farklı türden agregalar temin edilmiştir. TMA ve aşınma tabakası inşaatında kullanılması için farklı bölgelerden kireçtaşı kökenli agregalar temin edilirken, pürüzlendirme uygulamasında kullanılması içinde bir birine alternatif olabilecek yüksek kayma direnci sahip magmatik agregalardan bazalt, sedimenter kayalardan dere malzemesi ve atık olarak demir/çelik cürufları farklı kaynaklardan olmak üzere temin edilmiştir. Bu kapsamda temin edilen agregaların listesi Çizelge 3.1’ de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Temin edilen agregalar

No	Agrega Kökeni	Numune Kodu	Temin Bölgesi
1	Kireçtaşı	KT-1	Hatay / Kırıkhan
2	Kireçtaşı	KT-2	Tarsus / Mersin
3	Gri Kireçtaşı	KT-3	Ceyhan / Adana
4	Dere malzemesi	DR	Aksu / Kahramanmaraş
5	Bazalt	BZ-1	Niğde / Bor
6	Bazalt	BZ-2	Kayseri
7	EAF cürufu	EAF-1	İskenderun
8	EAF cürufu	EAF-2	Osmaniye
9	EAF cürufu	EAF-3	İskenderun
10	Ferrokrom Cürufu	FER	Elazığ
EAF: Elektrik Ark Fırın			

Çizelge 3.1’ den görüleceği üzere doğal agrega olarak 3 farklı kireçtaşı, 2 farklı bazalt ve 1 adet dere malzemesi, demir/çelik cüruflarından da 3 farklı tesisten EAF ve bir tesisten ise Ferrokrom cürufunun temin edilmiştir.

3.1.1. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Tüm agregaların KTŞ’ de TMA ve aşınma tabakalarında kullanılacak kaba agregalar için tanımlanan fiziksel ve mekanik özellikleri başta olmak üzere bitüm

ile yapışma özellikleri (Çizelge 3.2) bir dizi test ve analiz ile belirlenmiştir. Yapılan deneylere ait görseller Şekil 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri

Agregalar Deneyler	KT-1	KT-2	KT-3	DR	BZ-1	BZ-2	EAF-1	EAF-2	EAF-3	FER
Los Angeles	24,38	16,24	24,38	17,62	12,04	25,90	22,9	25,33	29,67	16,53
Micro-Deval	10,63	21,26	11,70	11,29	10,41	9,35	9,50	8,78	12,33	7,59
Donma Çözünme	2,40	3,00	8,10	6,16	6,85	9,38	8,30	8,25	3,73	6,11
Cilalanma	41,23	43,20	41,60	57,93	61,00	52,40	76,1	59,00	54,10	61,66
Özgül Ağırlık	2,69	2,69	2,69	2,73	2,61	2,67	3,40	3,39	3,31	2,93
Su Emme	0,44	0,24	0,28	0,90	2,00	1,44	1,79	2,46	2,92	1,20
Soyulma ¹	80-85	80-85	85-90	60-65	60-65	75-80	50-55	45-50	55-60	85-90
Soyulma ^{1*}	70-75	70-75	70-75	75-80	95-100	90-95	80-85	80-85	80-85	90-95
Vialit Yapışma ^{1*}	3,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vialit Yapışma ¹	4,00	3,00	4,00	3,00	1,00	2,00	4,00	4,00	2,00	2,00
¹ : 70/100 penetrasyon sınıflı bitüm ile yapılan deney										
^{1*} : 70/100 penetrasyon sınıfı bitüm ile %0,2 DOP katkılı bitüm ile yapılan deney										

Çizelge 3.2 incelendiğinde, gerek doğal agregalar gerekse cüruf lar kökenleri ve elde edildiği kaynaklara göre farklı fiziksel ve mekanik özellikler göstermektedir. Pürüzlendirme uygulamasının yapılmasının temel sebeplerinden biri yüksek cilalanma derecesine sahip olan agregaların temininde yaşanan sıkıntıların varlığı olduğu, bu tezin giriş kısmında detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Buna ilaveten ülkemizin, jeolojik oluşum yapısı nedeniyle kireçtaşı yoğun olarak karşılaşılan bir kayaç türüdür. Maalesef kireçtaşı agregalar düşük cilalanma direncine sahiplerdir ve çoğunlukla cilalanma değerleri 50 PSV değerinin altındadır. Nitekim bu tez kapsamında incelenen kireçtaşı agregalarının cilalanma değerlerinin 50’nin altında ancak 40’nin üstünde olduğu görülmüştür. Diğer agrega türlerinin kıyasla kireçtaşı agregalarının cilalanma direncinin belirgin bir şekilde daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Diğer yandan agregaların cilalanma direnç değerleri kıyaslandığında, en yüksek değer cüruf lar da EAF-1 doğal agregalarda ise magmatik kökene sahip Niğde, Bor bölgesinden temin edilen BZ-1 kodlu bazalt numunelerinin sahip olduğu görülmüştür. Elazığ bölgesinde elde edilen FER kodlu Ferro krom cüruf ve Kahramanmaraş, Aksu

bölgesinden elde edilen DR kodlu dere malzemesinin de cilalanma değerlerinin 50 üstü olduğu görülmüştür.



Şekil 3.1. Agregada deneylerinden görseller

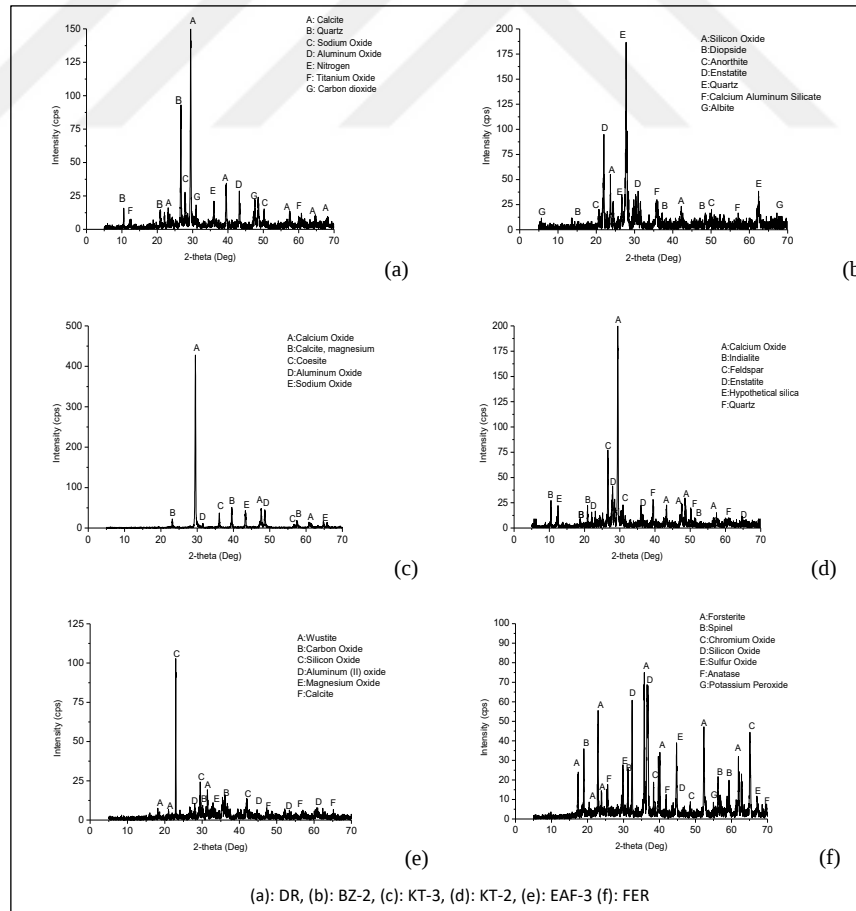
3.1.2. Agregaların kimyasal bileşenleri

Fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında, agregaların kimyasal içerikleri (Çizelge 3.3) X-Ray Flüoresans (XRF) analiz ile belirlenmiştir. Bu analizle amaçlanan, bu tez kapsamında kullanılan her bir agreganın içerdikleri elementleri açısından kimyasal içeriklerinin değerlendirmesini yapabilmek ve her bir agreganın farklılıklarının veya benzerliklerini görebilmektir.

Çizelge 3.3. Agregaların kimyasal içerikleri

Bileşenler	KT-1	KT-2	KT-3	BZ-1	BZ-2	DR	EAF-1	EAF-2	EAF-3	FER
CaO	47,60	48,90	47,50	8,51	7,50	31,00	25,60	21,80	22,60	4,54
CO ₂	47,00	47,20	46,50	5,64	5,48	28,90	17,50	37,90	18,10	22,00
Fe ₂ O ₃	0,42	0,01	0,26	7,35	6,00	4,70	28,70	15,40	26,00	1,35
SiO ₂	1,37	0,88	1,18	49,90	56,80	22,70	10,60	10,30	12,10	23,80
Al ₂ O ₃	0,58	0,15	0,64	18,10	16,00	5,62	5,77	4,45	6,10	14,90
MgO	0,46	0,32	0,76	3,27	1,60	4,01	1,65	2,51	4,50	28,30
Diğerleri	2,58	2,54	3,16	7,23	6,62	3,07	10,18	7,64	10,60	5,11

XRF ile yapılan ve agregaların element temelinde kimyasal içeriklerini veren analize ek olarak agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde etkili olan mineral içeriklerini de belirleyebilmek ve agregalar hakkında daha derin bir bilgi sahibi olabilmek için X-ışını difraksiyon (XRD) analizi farklı kökenleri temsil eden agregalar için yapılmış ve sonuçlar Şekil 3.2’ de paylaşılmıştır.



Şekil 3.2. XRD ile temsili agregaların mineral içerik analizi sonuçları

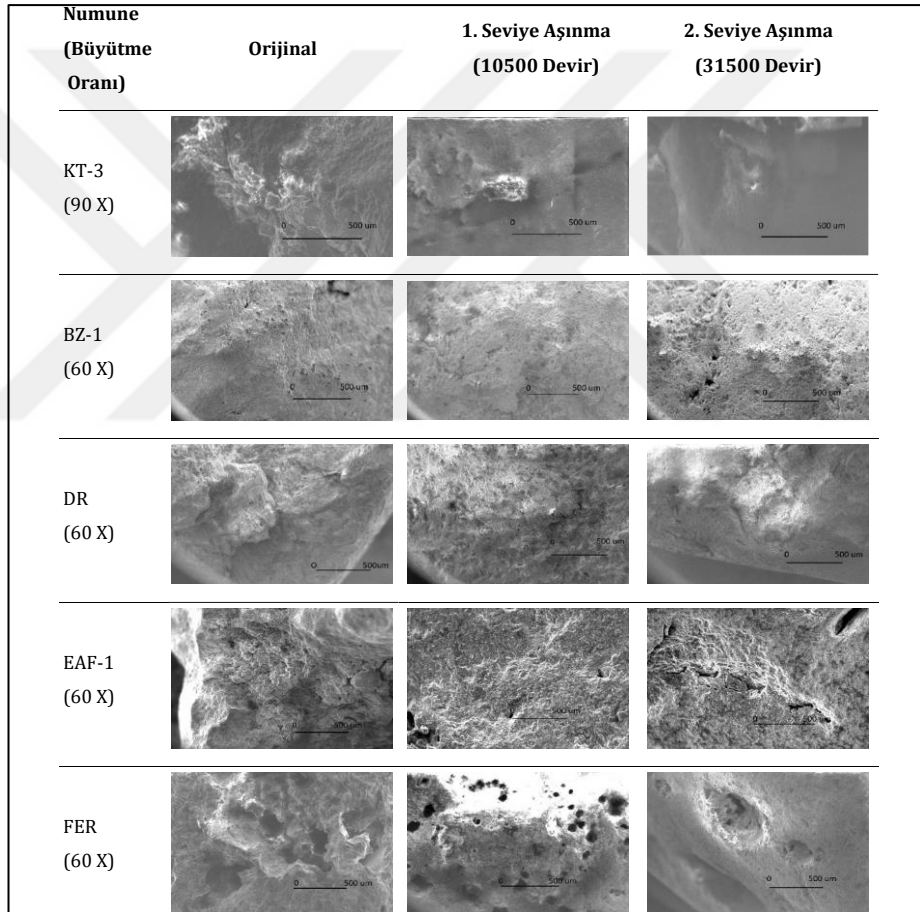
Çizelge 3.3' te verilen XRF sonuçları ile benzer kökene sahip olan agregaların, element içeriklerinin birbiri ile benzerlikler gösterdiği görülecektir. Ancak, miktar açısından farklı bölgelerden temin edilen aynı köken sahip agregalar arasında kısmi ve/veya belirgin farklılıklar görülmektedir. Şekil 3.2' de grafikler halinde verilen XRD ile temsili agregaların mineral içerik analizi sonuçları, XRF ile agregaların kimyasal element içerik analizinden elde edilen sonuçları teyit etmektedir. Farklı köken sahip agregaların kimyasal içeriklerinde görülen farklılık, mineral içeriklerinde de açıkça görülmüştür.

3.1.3. Agregaların yüzey özellikleri

Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM), malzemelerden istenen bilgileri elde etmek için odaklanmış elektron huzmelerini kullanan güçlü bir büyütme aracıdır. Yüksek çözünürlükte ve iki/üç boyutlu görüntüler elde edebilen TEM, çeşitli bilim ve sanayi uygulamalarında çok yönlü bir araç olarak kabul edilmektedir. Çünkü TEM ile malzeme yüzeyinin topografik haritalanması, malzemenin morfolojik ve element bileşimi gibi bilgiler elde edilmesinde kullanılabilen bir alettir. Bunlara ilaveten, TEM malzeme yüzey çatlaklarını malzemenin mikro yapısını belirlemek ve analiz etmek, kimyasal analizlerde bilgi edinmek, yüzey kirlenmelerini tespit etmek ve kristal yapıları tanımlamak amacıyla kullanılabilir. Bundan dolayı, TEM çoğunlukla yaşam bilimi, biyoloji, jeoloji, medikal ve adli tıp, malzeme ve metalürji gibi alanlarda kullanılan çok yönlü bir alettir. TEM, genel olarak, şu bileşenlerden oluşmaktadır: elektron kaynağı, sıcak katot topu, alan salım tabancası, elektromanyetik ve/veya elektrostatik lensler, vakum haznesi, numune haznesi ve depo, bilgisayar, ikincil elektron, , kırınımlı yansıtıcı ve X-ray detektörü. Ek olarak; cihaz sabit bir güç kaynağına, vakum ve soğutma sistemine, titreşimsiz ortama ve cihazı manyetik ve elektrik ortamlardan izole edecek bir alana yerleştirilmeye ihtiyaç duyar (Goldstein vd., 2017; Postek, 1997).

Kaplamanın kayma direncine ve agreganın sıcak bir karışım üzerinde tutunmasına etki eden önemli parametrelerden biri de agregaların yüzey özellikleridir. Zira kaplamada mikro dokuyu oluşturan temel parametre agrega tanecikleridir. Dolayısı ile tedarik edilen agregaların yüzey doku özelliklerinin

belirlenmesi oldukça önemlidir. Agregaların yüzey doku özelliklerinin ve aşınma durumunda yüzey özelliklerinde meydana gelen değişimin belirlenmesi amacıyla TEM ile görsel analiz yapılmıştır. Agregaların yüzey doku özelliklerinin ve aşınma sonrasında yüzey dokularında meydana gelen değişimin belirlenmesi için özel bir yöntem kullanılmıştır. Micro-Deval aparatı kullanılarak agregaların aşınma direnci farklı aşınma durumları için görsel olarak analiz edilmiştir. Bunun için aşınma öncesi hem de aşınma sonrasında her bir agrega kökenini temsilen rastgele seçilen 8-10 mm çapındaki kübik agrega örneklerin yüzey özellikleri taramalı elektron mikroskobu (TEM) görüntülenmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Agregaların TEM altındaki yüzey dokusu görüntüleri

Şekil 3.3' de verilen görüntüler incelendiğinde, en yüksek aşınma seviyesinde dahi hem EAF hem de FER cürufklarının hala gözenekli yapılarını korudukları görülmektedir. Bu durum, trafik altında cürufkların kayma direnci bakımından kendini yenileyen bir yapıda olduğunu ortaya koymaktadır. Kireçtaşının, en

yüksek aşınma seviyesinde neredeyse yüzeyinde pürüzlülük tamamen yok olmuştur. Ancak bazaltın hem dere malzemesine hem de kireçtaşına kıyasla en yüksek seviyede dahi pürüzlülüğünün göreceli olarak daha iyi durumda olduğu söylenebilir. TEM analizleri bu tezin yazarı İslam GÖKALP' in yüksek lisans tezi (Gökalp, 2016) çalışmaları kapsamında belirlenmiş olduğunu burada ifade etmek gerekir.

3.1.4. Agregaların çevresel risk analizi

Teknik açıdan uygun bir malzemenin aynı zamanda çevre ve insan sağlığına zarar vermemesi gerekir. Tez kapsamında, doğal agreganın yanı sıra demir-çelik cürufları da kullanılmıştır. Endüstriyel yan ürün olarak ortaya çıkan cürufların yol inşaatında kullanılmasında, insan sağlığı ve çevre koruma birlikte düşünülmelidir. Çünkü cüruflarda, ağır metaller sınıfına ve insan sağlığına zarar veren ve suda çözünabilen birçok metal bulunabilmektedir. Dolayısıyla, cürufların alt yapı işlerinde kullanımının yer altı ve yüzeysel içme suyu kaynakları için tehlike oluşturabileceği göz önünde bulundurulmakta, bu amaçla atıkların kullanımında risk değerlendirmesi için çeşitli analizler yapılmaktadır.

Risk değerlendirmesinde atık olarak sınıflandırılan cüruflar özelinde dikkat edilecek hususların başında malzeme içerisinde yağmur suyu ile serbest hale geçerek yeraltı sularına ve içme sularına sızabilen diğer bir deyişle liç olabilen inorganik kirleticilerin bulunmasıdır. Bu maddeler yağmur suyu ile birlikte yeraltı sularına geçtiklerinde zamanla insan sağlığına etki ederek önemli sağlık sorunları oluşturabilmektedir.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı atık bertaraf edilmesi ve kategorize edilmesi noktasında çeşitli düzenlemeler yapmış ve farklı mühendislik amaçları kapsamında kullanılacak malzemelerin yüzey suları veya yer altı sularına sızabilecek kimyasal içeriklerinin belirli sınır değerleri aşmaması gerektiği belirtilmiştir. Bunun irdelenmesi ve ortaya konulması amacıyla ek analizlere ihtiyaç duyulmuştur. Bu amaçla, atık sınıfında yer alan ve bölgeden temin edilen tüm EAF cürufları ve Ferrokrom cürufların çevresel etkilerini ortaya koymak için

liç (süzülme) testi uygulanmıştır. Aşağıda liç (süzülme) testi ile ilgili kısaca bilgilere yer verilmiştir.

Leaching (liç-süzülme) testi için test numuneleri TS EN 12457-2, standardına göre hazırlanmıştır. Bu standardın ana başlığı ***“Atıkların nitelendirilmesi - Katıdan özütleme analizi- Granül katı atıkların ve çamurların katı özütlemesi için uygunluk deneyi - Bölüm 2: Sıvı katı oranı 10 l/kg olan ve parçacık boyutu 4 mm’den küçük malzemeler için tek aşamalı parti deneyi”*** dir. Takip edilen bu standartın gereği olarak kullanılacak çözücü olarak saf su (Ph:4 veya Nötr), agrega numuneleri de en az %95 kadarı 4 mm elek çapından geçmiş ve 0,1 mm’den büyük boyutlara sahip olacak şekilde tedarik edilmiştir. 10 l/kg (çözücü / numune) oranı kullanılarak su ve atık malzeme bir kap içerisinde bir araya getirilir. Ve kapalı bir kapta 24 saat boyunca aralıksız, dakikada 10 devir ile oda sıcaklığında (20 ± 2 / 25 ± 2 °C) tutularak karıştırılmaya tabi tutulur. Bu işlem sonrasında oluşan özütler 0,45 mikro metre çaplı filtrelerden geçirilerek süzdürülür. Süzülen su numuneleri analizler için korumalı kaplara alınır.

Çalışmada, deneyi yapılacak numuneler için 1 lt çözücü için 100 gr numune kullanılarak yukarıda anlatılan standart takip edilerek numunelere ait öztüler hazırlanmıştır. Numuneler, İndüktif Çiftleşmeli Argon Plazma Kütle Spektrometresi (ICP-MS) cihazı ile analiz edilmiş, bu şekilde suya sızan kimyasal içerikler ve oranları belirlenmiştir. Burada, teknik açıdan doğal agregalara kıyasla daha iyi özellikler gösteren cüruflar arasından ilgili atık şartname limitlerini sağlayan ve çevreye zarar vermeyen bir cüruf seçimi yapmak amaçlanmıştır.

T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayınlanan atık şartname limitleri ve liç testi analizi sonrasında her bir cürufa ait sonuçlar cürufların inert ve zararsız atık sınıflandırması özelinde Çizelge 3.4’ de verilmiştir ve herbir cürufun karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Cürufların liç testi analiz sonuçları

Kimyasal İçerik (Kısaltma)	EAF-1 (mg/l)	EAF-2 (mg/l)	EAF-3 (mg/l)	FER (mg/l)	Atık Şartname Limitleri (mg/l)	
					İnert	Zararsız
As	0,0007	0,0005	0,0010	0,0001	≤ 0,05	0,05-0,2
Ba	0,0580	0,5210	0,3240	< 0,0004	≤ 2	2-10
Cd	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	≤ 0,004	0,004 - 0,1
Cr	0,0062	0,0028	0,0025	0,0073	≤ 0,05	0,05-1
Cu	0,0015	0,0023	0,0009	0,0003	≤ 0,2	0,2 - 5
Hg	0,0009	0,0011	0,0010	< 0,0001	≤ 0,001	0,001- 0,02
Mo	0,0099	0,0050	0,0110	0,0002	≤ 0,05	0,05 - 1
Ni	0,0007	0,0022	0,0014	0,0005	≤ 0,04	0,04 - 1
Pb	0,0002	< 0,0001	0,0001	0,0001	≤ 0,05	0,05 - 1
Sb	0,0091	0,0178	0,0130	0,0035	≤ 0,006	0,006 -0,07
Se	0,0007	0,0009	0,0007	< 0,0001	≤ 0,01	0,01 - 0,05
Zn	0,0271	< 0,0001	0,0269	< 0,0001	≤ 0,4	0,4 -5
Cl	63.2	65.7	69.0	73.1	≤80	80-1500
F	0.6	0.5	0.4	0.7	≤1	1-15
SO ₄	11	9	21	82	≤100	100-2000

Çizelge 3.4 verilen cürufların liç testi analiz sonuçları incelendiğinde, olası bir yağmurla toprağa veya içme suyuna sızabilecek kimyasal içeriklere ait değerlerin EAF cüruflarında Sb (Antimon) haricinde atık şartname limitlerinin inert sınıfı içerisinde kaldığı görülecektir. Bu nedenle, EAF cüruflarını **zararsız atık madde** olarak sınıflandırılmıştır. Ferrokrom cürufu liç testi sonuçlarına göre suya sızan zararlı kimyasal içerik değerleri açısından incelendiğinde tümünün atık şartname limit değerlerinin altında kaldığı görülmüş ve **inert atık madde** olarak sınıflandırılmıştır. Pürüzlendirme malzemesi olarak EAF gibi endüstriyel atıkların kullanılabilirliğinin de araştırıldığı bu çalışma kapsamında cürufların teknik özelliklerin yanı sıra çevre ve insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde seçilmesi önem arz etmektedir. Çünkü cürufların tesislerde veya depolama sahalarında bekletilmesinin önüne geçip onlara ekonomik bir değer kazandırmak ve bertaraf edilmesinde alternatif bir metot ortaya koymak bu çalışmanın da en önemli amaçlarındandır. Böylelikle karayollarında inşa edilen deneme

kesimlerinin pürüzlendirilmesinde kullanılan cürufların çevre ve insan sağlığına zarar vermediği yapılan bilimsel incelemeler ile açıkça ortaya konmuştur.

Tezin bu bölümünde teknik ve çevresel risk analizi sonuçları verilen agregalar arasında bir seçime gidilmiştir. Teknik açıdan KTŞ' de belirtilen şartları sağlayan ve çevre ve insan sağlığına zarar vermeyen, uygulamanın yapılacağı yol üst yapısına konumca en yakın yerden temin edilebilecek agregalar, pürüzlendirme malzemesi olarak seçilmiştir. Bunlar;

1. Doğal agregalardan en yüksek kayma direncine sahip Niğde, Bor bölgesinden elde edilen **BZ-1 kodlu bazalt** ile Kahramanmaraş, Aksu bölgesinden elde edilen **DR kodlu dere malzemesi** olmuştur.
2. Cüruflardan ise İskenderun'daki bir işletmeden elde edilen **EAF-1 kodlu elektrik ark fırını cürufu** ve Elazığ'dan temin edilen **FER kodlu ferrokrom cürufu** seçilmiştir.
3. TMA ve Aşınma tabakası inşaatında ise Adana, Ceyhan bölgesinde faaliyet gösteren bir taş ocağından alınan ve **KT-3 ile kodlanan kireçtaşı** kullanılmıştır.

3.2. Deneme Yollarının Belirlenmesi

KGM AR-GE dairesi başkanlığı ve KGM 5. Bölge AR-GE başmühendisliği ile birlikte yürütülen koordineli çalışmalar neticesinde, KGM 5. Bölge sınırları içerisinde yapılacak aşınma ve TMA türü kaplama inşaatına ait güncel projeler üzerinde mutabakat sağlanmış ve pürüzlendirme uygulaması deneme kesimlerinin hangi yollar üzerinde yapılacağı kararlaştırılmıştır. Karar aşamasında, pürüzlendirme uygulamasının KTŞ' de tanımlanan Kısım 407 ve Kısım 408 de tanımlanan Aşınma ve TMA kaplamaları üzerinde olmasına öncelik verilmiştir. Mersin-Adana il sınırları içerisinde yer alan farklı trafik yüklemelerine sahip olan biri otoyol diğeri devlet yolu güzergâhında olmak üzere projesi onaylanan ve inşa süreci başlayan iki yol üzerinde yapılmasına karar verilmiştir. Buna göre, Adana-Tarsus-Mersin Otoyolu (052 otoyolu) üzerinde projesi onaylanan ve TMA kaplama inşaatı için gerekli tüm hazırlıkların yapıldığı yol kesimi ile Mersin-

Erdemli-Silifke-Taşucu güzergâhında yer alan devlet yolu üzerinde pürüzlendirme uygulamasının yapılması kararlaştırılmıştır. Yol kaplaması imalatlarının ve üzerlerinde yapılan pürüzlendirme uygulamalarını yerlerini gösteren bir harita (Şekil 3.4) verilmiştir.



Şekil 3.4. Pürüzlendirme uygulaması yapılan deneme yolları

3.3. Pürüzlendirme Parametrelerinin Belirleme Çalışmaları

Pürüzlendirme uygulamasında kullanılacak parametrelerin belirlenmesi amacıyla hem laboratuvarda hem de sahada bir dizi çalışma ve gözlemler yapılmıştır. Tezin bu kısmında yapılan bu çalışmalara ait bilgiler sunulmuştur.

3.3.1. Laboratuvar çalışmaları

Ülkemiz şartnamelerine yeni giren pürüzlendirme uygulaması hem aşınma hem de TMA kaplamalarında aynı şekilde kullanımını önermiştir. Ancak, aşınma ve TMA kaplamalarının imalatı için önerilen agrega gradasyonları arasında farklılıklar bulunmaktadır. Dolayısıyla, aynı uygulama parametrelerinin farklı kaplamalar için aynı performansı veremeyeceği ön görülmüştür. Öyle ki kaplama

tabakasının yüzey dokusuna bu tabakada kullanılan agreganın boyutu ve uygulama yoğunluğu etki etmekte olduğu birçok çalışmada (Do vd., 2009; Fisco ve Sezen, 2013; Fwa vd., 2004; Hegmon ve Mozoguchi, 1975; Huang, 2010; Khasawneh vd., 2016; Luce vd., 2007; Sarsam ve Al Shareef, 2015) rapor edilmiştir. Zira bu uygulamanın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için kaplamanın bu uygulama ile elde edilecek yüzey dokusunun üstyapı performansına olan etkisi belirlenmiş olmalıdır.

KTŞ' ye yeni giren bu uygulamaya benzer uygulamalar detaylıca araştırılmış ve TMA tabakalarının yüzey dokusunu temsil edeceği öngörülen yüzeysel kaplama türlerinden biri olan harç tipi kaplamanın seçilmesi kararlaştırılmıştır. Harç tipi kaplama numuneleri KTŞ' de belirtilen ASTM D 3910 standardına göre hazırlanmıştır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5. Harç tipi kaplama türleri ve agrega boyut dağılımları

Elek Açıklığı (mm)	% Geçen					
	Tip-1		Tip-2		Tip-3	
	Önerilen	Uygulanan	Önerilen	Uygulanan	Önerilen	Uygulanan
9.5	-	-	100	100	100	100
4.75	100	100	90-100	95	70-90	80
2.36	90-100	95	65-90	77.5	45-70	57.5
1.18	65-90	77.5	45-70	57.5	28-50	3
0.600	40-60	50	30-50	40	19-34	26.5
0.300	25-42	33.5	18-30	24	12-25	18.5
0.150	15-30	22.5	10-21	15,5	7-18	10.5
0.075	10-20	15	5-15	10	5-15	10

Yapılan ön laboratuvar çalışmaları ve incelenen çalışmalar neticesinde (Cafiso ve Taormina, 2007; Florence ve Southgate, 1970; Khan, 1998; Kucharek vd., 2010; Mladenovič vd., 2015; Praticò ve Vaiana, 2013; Zaumanis ve Haritonovs, 2016), hangi tip harç tipi kaplamaların imal edileceği belirlenmiştir. Buna göre Tip-2 ve Tip-3 harç tipi kaplamaların aşınma ve TMA kaplamalarının yüzey doku özelliklerini yansıttığı görülmüştür. Çizelge 3.5' de verilen agrega boyut dağılım tablosu temel alınarak Tip-2 ve Tip-3 harç tipi kaplamalar üretilmiştir.

Harç tipi kaplamaların üretiminde emülsiyon kullanılmaktadır. Adana çevresinde yer alan bir firmadan CRS-2 türünden katyonik emülsiyon (Çizelge 3.6) temin edilmiştir. ASTM-D-3910 standardına uygun olarak belirlenen agrega boyutlarına ve miktarına bağlı olarak kullanılacak emülsiyon miktarı da bu standartta tanımlanmıştır. Standart kalıpların sahip olduğu alana bağlı olarak önerilen ve uygulanan bitüm miktarları belirlenmiştir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.6. CRS-2 türünden katyonik emülsiyon reçetesi

Ham Madde	Bitüm	İçerik					
		Su	Emülgator	Emülgator	HCL	Kalsiyum Hidroksit	Katkı
Birim	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg	Kg
Tür	160/220 veya 50/70	H2O	Redicote Em 22/44	RC-406	HCl	CaCl2	-
Miktar	710	290	1	2	2	1	2

Çizelge 3.7. Emülsiyon miktarları

Birim	% Kuru agrega					
Tür	Tip-1		Tip-2		Tip-3	
Emülsiyon oranı	Önerilen	Uygulanan	Önerilen	Uygulanan	Önerilen	Uygulanan
	10,0- 16,0	16,0	7,5- 13,5	13,5	6,5- 12,0	12,0

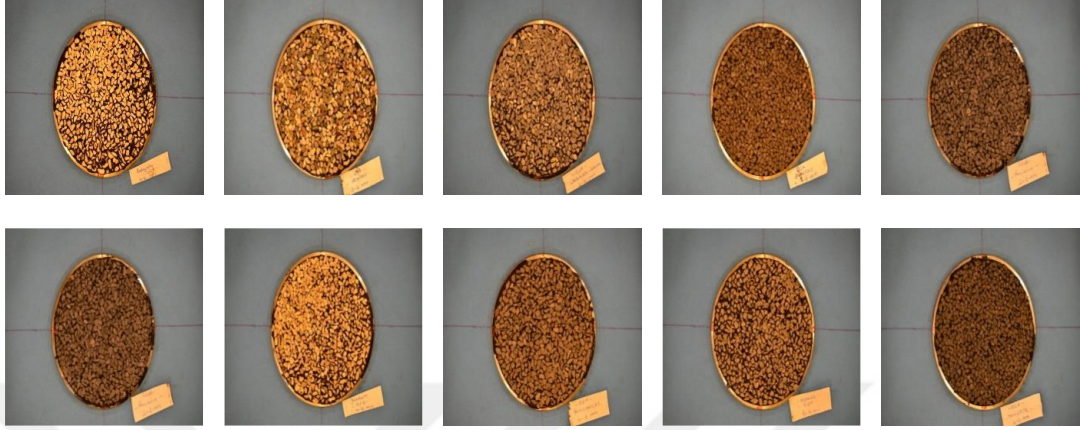
Laboratuvar ön çalışması üretilen harç tipi kaplama numuneleri üzerinde çeşitli parametreler kullanılarak pürüzlendirmeleri yapılmıştır. Pürüzlendirme işleminde kullanılan değişkenler Çizelge 3.8' de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Harç tipi kapmalara uygulanan pürüzlendirme değişkenleri

Agrega Türü	Doğal Agregalar	Endüstriyel Atık (Cüruf)
Agrega Boyutu (mm)	1-3, 2-5	
Uygulama Miktarı (g/m ²)	1,75-2,00	1,75-2,50

Çizelge 3.8' de görüleceği üzere temin edilen her bir agrega 1-3 mm ve 2-5 mm aralığında olmak üzere farklı boyutlarda ayrıştırılmıştır. Farklı miktarlarda (1,75-2,00 g/m² doğal agregalar için; 1,75-2,50 g/m² cüruflar için)

pürüzlendirme malzemesi olarak üretilen harç tipi kaplamaların üzerinde serilmiştir. Standart kalıplarda harç tipi hazırlanan numuneler üzerinde pürüzlendirilmesi yapılmış numunelere ait görseller Şekil 3.5' de verilmiştir.



Şekil 3.5. Pürüzlendirilmiş harç tipi kaplama numunelerinden örnekler

Laboratuvar ortamında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamaları KTŞ' de tanımlanan silindir ile sıcak asfalt kaplamanın serilmesinden sonraki 1. Pas sonrası serilmesini temsil etmesi bakımından pürüzlendirme malzemesi Vialit plaka silindiri ile üzerlerinden bir pas geçirildikten sonra harç tipi kaplama numuneleri üzerinde serpilmiştir. 18 cm çaplı numuneler üzerinde uygulanan pürüzlendirme uygulamasında serim miktarı yapılan kontrollü çalışmaların da kolaylıkla ayarlanabilmiştir. Zira yukarıda üretilme süreçleri detaylıca anlatılan harç tipi kaplamaların pürüzlendirilmesi öncesi ve sonrasında üzerlerinde bir dizi kayma direnci ve yüzey makro dokusu deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen bulgulara Gökalp ve Uz (2017c) tarafından yayımlanan çalışmadan erişilebilir.

Laboratuvar ortamında üretilen numuneler ve hazırlanma işlemleri her ne kadar aşınma ve TMA kaplamalarını yansıtmış olsa da gerçek saha özelliklerini ortaya koymamakla beraber, sahada gerçek sıcak kaplama ve silindir yükleri altında ek bir uygulamaya ihtiyacını doğurmuştur. Bu durumu takiben basit ama etkili bir fikirler sunan bir saha çalışması yapılmıştır.

3.3.2. Saha çalışmaları

Laboratuvarda hazırlanan harç tipi kaplama numuneleri üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamalarında kullanılan değişken ve seviyeler KGM 5. Bölge Müdürlüğü yerleşkesi içerisinde yapılan bitümlü sıcak karışım (BSK) üzerinde denenmiş, küçük çapta bir saha uygulaması yapılmıştır. Saha uygulamasına dair görseller Şekil 3.6' da verilmiştir. Laboratuvarda yapılan çalışmalar sonrasında yapılan saha uygulamasındaki temel amaçları şu şekilde sıralamak mümkündür.

- (1) İlk pas sonrası sıkışma oranı tayini ve yüzey sıcaklık tespiti yapmak.
- (2) İkinci pas sonrası sıkışma oranı tayini ve yüzey sıcaklık tespiti yapmak.
- (3) İlk pas sonrası, BSK yüzeyinde pürüzlendirme sonrası serbest malzeme miktarı tayin etmek.
- (4) İkinci pas sonrası, BSK yüzeyinde pürüzlendirme sonrası serbest malzeme miktarı tayin etmek.
- (5) Uygulama zamanı belirlemek.
- (6) Malzeme serme miktarını saha koşullarında optimize etmek ve
- (7) BSK yüzeyine meydana gelen görüntüyü gözlemlemektir.



Şekil 3.6. BSK üzerinde pürüzlendirme uygulaması görselleri

3.4. Pürüzlendirme Uygulaması Parametreleri

Hem laboratuvar uygulamaları hem de küçük çaptaki saha uygulamasında yapılan ölçümler ve gözlemler neticesinde, pürüzlendirme uygulaması yapılacak aşınma ve TMA tabakaları için ayrı ayrı olacak şekilde karayolu deneme kesimlerinin hangi malzemeler ile hangi miktarda ve hangi zamanda yapılacağı üzerinde sorumlu KGM teknik personelleri ve idarecileri ile birlikte karar verilmiştir. İstişareler ve önceki çalışmalara ışığında idareciler tarafından da onayı alan pürüzlendirme uygulaması değişkenler belirlenmiştir. İlgili değişkenler ve sahada tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının bilgisi TMA için Çizelge 3.9’ da, aşınma için Çizelge 3.10’ da verilmiştir.

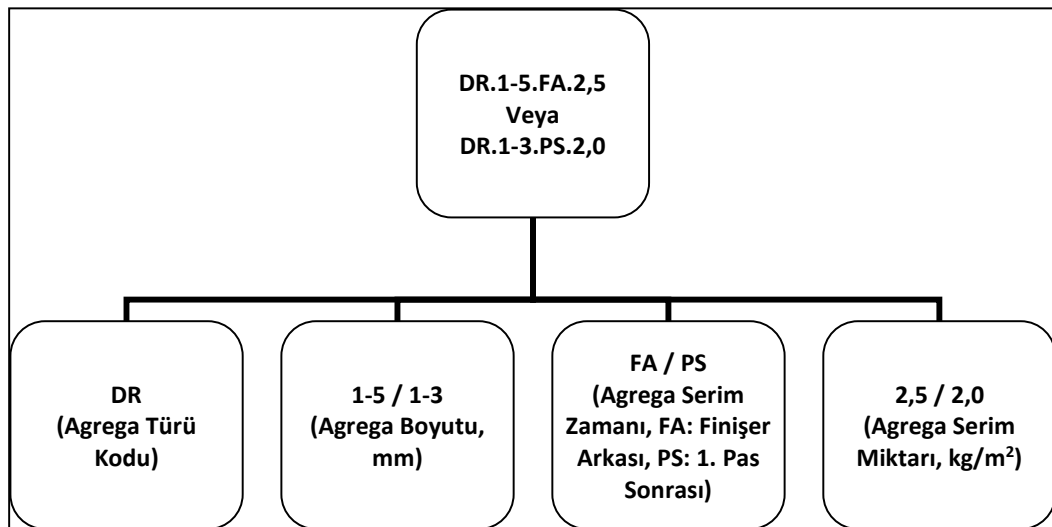
Çizelge 3.9. TMA üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme değişkenleri

No	Değişkenler				KM Aralığı		Kod
	Türü	Boyut (mm)	Uygulama Zaman	Miktar Kg/m ²	Başlangıç	Bitiş	
1	KT	-	-	-	28+500	28+650	TMA-Aşınma
2	BZ	1-3	İlk Pas Sonrası	1.5	28+650	28+950	BZ.1-3.PS.1,5
3	BZ	1-3	Finişer Arkası	2.0	28+950	29+250	BZ.1-3.FA.2,0
4	FER	1-3	İlk Pas Sonrası	2.0	29+250	29+550	FER.1-3.PS.2,0
5	EAF	1-3	Finişer Arkası	2.0	29+550	29+850	EAF.1-3.FA.2,0
6	EAF	1-5	Finişer Arkası	2.5	29+850	30+150	EAF.1-5.FA.2,5
7	FER	1-5	Finişer Arkası	2.5	30+150	30+450	FER.1-5.FA.2,5
8	DR	1-3	İlk Pas Sonrası	2.0	30+450	30+750	DR.1-3.PS.2,0
9	DR	1-5	Finişer Arkası	2.5	30+750	31+050	DR.1-5.FA.2,5

Çizelge 3.10. AB Aşınma üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme değişkenleri

No	Değişkenler				KM Aralığı		Kod
	Agrega Türü	Boyut (mm)	Uygulama Zaman	Miktar Kg/m ²	Başlangıç	Bitiş	
1	DR	1-5	Finişer Arkası	2.5	76+042	76+400	DR.1-5.FA.2,5
2	DR	1-3	İlk Pas Sonrası	2.0	76+400	76+800	DR.1-3.PS.2,0
3	FER	1-5	Finişer Arkası	2.5	76+800	77+300	FER.1-5.FA.2,5
4	EAF	1-5	Finişer Arkası	2.5	77+300	77+800	EAF.1-5.FA.2,5
5	EAF	1-3	Finişer Arkası	2.0	77+800	78+300	EAF.1-3.FA.2,0
6	FER	1-3	İlk Pas Sonrası	2.0	78+300	78+800	FER.1-3.FA.2,0
7	BZ	1-3	İlk Pas Sonrası	2.0	78+800	79+200	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)
8	EAF	1-5	Finişer Arkası	2.5	79+200	79+600	EAF.1-3.FA.2,0(DOP)
9	BZ	1-3	Finişer Arkası	2.0	79+600	80+100	BZ.1-3.FA.2,0
10	KT	-	-	-	80+100	81+300	AB Aşınma

Pürüzlendirme uygulaması kesimleri değerlendirilirken kodları üzerinden yorumlanacak ve grafiklere ve/veya çizelgelere bu şekilde işlenecektir. Her bir kesim için belirlenen kod ile ilgili açıklamalar Şekil 3.7' de yapılmıştır.



Şekil 3.7. Pürüzlendirme değişkenleri kod açılımı

3.5. Deneme Yolları İnşaatı ve Pürüzlendirme Uygulanması

Tezin bu bölümünde, inşa edilen deneme yolları ve bu yollar üzerine tatbik edilen pürüzlendirme uygulaması ile ilgili süreç detaylıca verilmiştir.

Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü tarafından TMA ve aşınma tabakası inşaatı için tasarımlar yapılmış ve nihai tasarımlar ilgili yüklenici firmalar tarafından kullanılarak BSK üretimi gerçekleştirilmiştir. Yüklenici firmalar Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10' da verilen pürüzlendirme uygulamasında kullanılacak agregalar uygun boyutlarda hazırlamış ve inşaatın yapılacağı sahaya taşınmış ve uygun bir alanda istiflenmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. TMA (a,b) ve aşınma (c, d) inşaat sahasında istiflenen agregalar

Pürüzlendirme malzemesinin serimi silindire monte edilebilen bir serici vasıtasıyla yapılmıştır. Sahada uygun bir alanda istiflenen pürüzlendirme

agregaları sericiye bir yükleyici ile yüklenmiştir. Sericinin başlık ayarı ve silindirin hızı tanımlanan ve serilecek agrega miktarının bir metre kareye düşecek şekilde ayarlanmıştır (Şekil 3.9). Pürüzlendirme malzemesinin miktarı tava deneyi ile kontrol edilmiş ve bu işlem dizisi her bir deneme kesimi için tekrar edilmiştir.



Şekil 3.9. TMA (a,b) ve aşınma (c,d) sahasında serici ayarı

Kaplama inşaatının yapılacağı Tarsus-Adana-Gaziantep (TAG) güzergâhından geçen 052 otoyolu ve Mersin-Erdemli-Silifke-Taşucu (MEST) güzergâhından geçen devlet yolu üzerinde ve tüm hazırlılar yapıldıktan sonra TMA ve aşınma tabakası inşaatına başlanmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. TMA (a, b) ve aşınma (c, d) tabakası inşaatından resimler

Otoyol üzerinde TMA aşınma inşaatı yaklaşık 50 metre tamamlanıncaya kadar devam ettirilmiştir. Sonrasında, ilgili kesim için tanımlanan pürüzlendirme uygulaması malzeme serim zamanına göre “1. Pas sonrası veya finişer arkası” yapılmaya başlanmıştır. Pürüzlendirme uygulaması tamamlanan her bir kesim sıkıştırma işlemleri çelik bandajlı ve lastik tekerlekli silindirler ile yapılmıştır (Şekil 3.11).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 3.11. TMA (a,b,e) ve aşınma (c,d) üzerine uygulanan pürüzlendirme

3.6. Saha Ölçüm Yöntemleri

Bu tez kapsamında pürüzlendirilmiş yol üst yapısının kayma direnci performansı ve yüzey doku özellikleri araştırılmıştır. Tezin bu bölümünde saha çalışmalarında kullanılan kayma direnci ve yüzey doku ölçüm yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

Trafik güvenliğini etkileyen ana faktörlerden biri araç lastiği ve yol yüzeyi arasındaki sürtünmedir. Kaymaya bağlı kazalar tüm yol kaynaklı kazalar içerisinde en yaygın olanıdır ve araç lastiği ve yol yüzeyi arasındaki yetersiz sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Tekerlek ile kaplama arasındaki sürtünme kuvvetlerine etki eden yüzey pürüzlülüğünün bir göstergesi olarak ortaya çıkan kaplama kayma direnci, trafik güvenliği açısından, kaplamanın en önemli yüzey özelliği olduğu birçok araştırmacı tarafından dile getirilmiştir. Kaplama kayma direnci ölçülmesi/değerlendirilmesi oldukça karmaşık bir olgudur. Çünkü bir kaplamanın kayma direnci performansı, kaplama özelliklerinden (doku, malzeme, sıcaklık), ve çevresel/iklimsel şartlardan gelen faktörlerden etkilendiği gibi tekerlek özelliklerinden de (diş tasarımı, kauçuk bileşeni, kayma hızı, sıcaklık) etkilenmektedir. Değerlendirme aşamasında ise operatöre bağlılık derecesi elde edilecek sayısal sonuçların farklılık göstermesine neden olacaktır (Kogbara vd., 2016; Kumar, 2014). Bu nedenlerden kaynaklı olarak pürüzlendirme uygulaması yapılacak deneme yolu kesimlerinde farklı ölçüm sistemlerine sahip cihaz ve yöntemler kullanılarak kayma direncinde meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Bu ölçüm yöntemleri İngiliz pandülü, dinamik sürtünme ölçer ve kilitlenen tekerlek kayma direnci aracıdır.

Bir üstyapının performansı ve servis ömrünün tahmini, üstyapı işletim sistemi içinde çalışan mühendisler için çok önemli kavramlardır. Kaplama yüzey dokusu üstyapının fonksiyonel kalitesi ve trafik güvenliği üzerinde oldukça etkili bir parametre olduğu bilinmektedir. Kaplama yüzey dokusu, agrega mineralojisi, agrega boyutu ve gradasyonu, yüzey boşlukları, yol kaplaması bitirme teknikleri ve yüzey aşınmasına bağlıdır. Kaplama yüzeyinin düz bir yatay düzlemde sapan düzensizlikleri kaplama yüzey dokusu olarak bilinir. Bir kaplamanın yüzey doku

derinliğinin ölçülmesinde, hacimsel tabanlı metotlar, lazer tabanlı metotlar ve görüntüleme ve/veya görüntü işleme ve fotogrametri tabanlı yöntemleri kullanılabilmektedir (Uz vd., 2016). Aynı kaplama üzerinde farklı sonuçlar veren farklı çalışma prensiplerine sahip cihazlar arasında benzer yönler olmakla beraber, her bir cihazın kullanımından, metodundan dolayı güçlü ve zayıf yönlerinin de varlığı kaçınılmaz bir olgudur. Bu tez çalışmasında, yüzey doku ölçümleri, makro düzeyde incelenmesi planlanmış ve bu çalışmada metotların güçlü ve zayıf yönleri göz önünde bulundurularak farklı metotlar kullanılması kararlaştırılmıştır. Bu metotlar; lazer profilometre yöntemi, kum Yama ve akış-zaman ölçer test yöntemleridir. Bu tez kapsamında yukarıda anılan yöntemlerin çalışma prensipleri aşağıda detaylıca anlatılmıştır.

3.6.1. İngiliz pandülü

İngiliz Pandül Test (BPT) cihazı, dinamik sarkaç kolunun tutturulduğu standart yükseklikten serbest bırakılması ve pandül koluna monte edilmiş özel kauçuk pabuç ile test yüzeyi arasındaki sürtünme şiddetine dolayısıyla enerji kaybına bağlı olarak sarkacın çıktığı yüksekliğin tayin edildiği basit, düşük maliyetli ve taşınabilir bir test cihazıdır. Cihaz İngiliz Karayolu Araştırma Laboratuvarı tarafından geliştirilmiştir ve şu aparatları içermektedir: pandül, lastik kaydırıcı, özel olarak ölçülendirilmiş gövde, temas ölçüm cetveli, termometre, su püskürtme aparatı ve fırçadır. Bu çalışmada, ASTM E 303 standart metot ile numuneler üzerinde kayma direncinin ölçümü yapılmıştır. Bu test metodu arazide ve/veya laboratuvarda kullanılabilir. Sonuçlar İngiliz Pandül Numarası (BPN) olarak raporlanır. Test numune yüzeyinde şu dört adım takip edilerek uygulanmıştır:

- **Test alanının ve/veya numune yüzeyinin hazırlanması:** Yapılması gerekli ilk adımdır. Numune serbest parçalardan arındırıldığından emin olmak için süpürülür. Süpürme işleminden sonra BPT numunenin üzerine yerleştirir ve su terazisi ve tesviye vidası yardımıyla cihaz dengelenir.
- **Sıfırlama ayarı:** Bu adım gerçekte bir çeşit cihazı kalibre etme adıımıdır. Testi yapacak kişi kilitleme mekanizmasını gevşeterek pandül mekanizmasını

yükseltir ve kilitler. Pandül serbest bırakılır ve ölçüm işaretçisi, pandül kolundaki ayarlama vidasına karşı durana kadar saat yönünün tersine bir hareketle yol alması sağlanır. Eğer işaretçinin gösterdiği değer sıfır değil ise, sürtünme halkası rulman mili hafifçe çevrilir ve tekrar kilitlenir. Testi yapan kişinin, pandül salınımı işaretçiyi sıfıra taşıyana kadar testi tekrarlaması ve sürtünme halkasını ayarlaması gerekmektedir.

- **Kaydırıcı yükseklik ayarı:** Pabucun numune üzerinde temas etmesi gerek özel uzunluk yükseklik ayar vidası ve özel cetvel yardımıyla ayarlanır. Testi yapan kişi, kaldırma kolu yardımı ile kaydırıcıyı aşağı doğru yavaşça indirir, kaydırıcının kenarı, yüzeye değinceye kadar, pandülün kayacağı yerin sağ altına yavaşça hareket ettirir. Sonra ölçüm aleti temas yolunun uzunluğunu doğrulamak için kaydırıcının yanına ve salınım yönüne paralel olarak yerleştirilir. Bu adım, ilk temas noktasını belirlemek için önemlidir. Bu diğer kenar için de tekrarlanır. Eğer temas yolu, test numunesinin üzerinde 124 ve 127 mm aralığında değilse cihazın önündeki tesviye vidasını yükselip düşürerek ayarlamak gerekmektedir.
- **Testin uygulanması:** Son adım testin uygulanmasıdır. Teste başlamadan önce, numune yüzeyi ve kaydırıcı pabuç ıslatılır. Bırakma düğmesine basılır ve pandül kolunun serbestçe kendi yayınca salınmasına izin verir. Dönüş yolunda kol kaydırıcı yüzeyine temas etmeden yakalanır. Test, her defasında numune yüzeyi ıslatarak beş kez tekrarlanır ve sonuçlar kayıt edilir.



Şekil 3.12. İngiliz pandülü

3.6.2. Dinamik sürtünme ölçer

Dinamik sürtünme ölçer (DFT), saha ve laboratuvar ölçümlerinde kalite kontrol, proje ve araştırmalarda yararlanılmak üzere sürtünme verilerinin elde edilmesi için kullanılır. Deney yöntemi ASTM E 1911-09'da tanımlanmıştır. Testin temel prensibi Kolomb'un sürtünme yasasına dayanır. Bu yöntemde, üç adet kauçuk lastik, yatay dönen bir diskin altına sabitlenmektedir. Test sırasında, disk 80 km/saat hıza ulaştığında otomatik olarak kaplama yüzeyine dik bir şekilde alçalarak yola temas eder. Kauçuk lastikler yol yüzeyine dik bir şekilde etkiyen W sabit yükü altında ve doğrusal bir F kuvveti ile V hızında döner. F , kaplama ile kauçuk lastikleri arasındaki sürtünme kuvvetidir. Sürtünme katsayısı (μ), F 'yi W 'ye bölmek suretiyle bulunabilmektedir. 20, 40, 60 ve 80km/saat hız değerlerinde pik sürtünme ölçüm değerleri alınabilmektedir.

DFT cihazına ait bir görüntü (Rado ve Kane, 2014) ve saha çalışmasındaki uygulamadan bir resim Şekil 3.13' te paylaşılmıştır. İlgili görsellerden görüleceği üzere cihazın temel bileşenleri şu şekildedir:

- (1) Su tankı,
- (2) Taşınabilir bir bilgisayar,
- (3) DFT cihazının kendisi,
- (4) Cihaz diskinin altına monte edilen üç adet özel yapım kauçuk lastik ve yedekleri ve
- (5) Farklı hız aralıklarında sonuçlar veren ve cihazı komanda eden cihazı özgü bilgisayar programı.



Şekil 3.13. Dinamik sürtünme ölçer (a) ve saha uygulaması (b)

3.6.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı

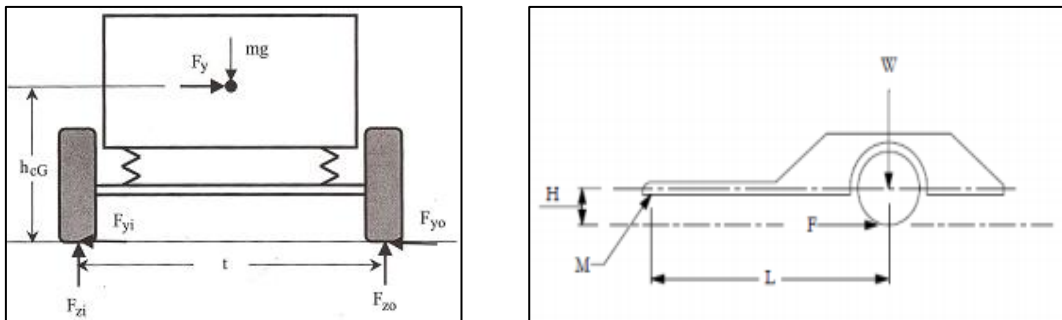
Sürtünme katsayısının belirlendiği bu araçlarda ölçüm prensibi, düz bir şekilde hareket eden bir araçta fren sistemi ile tekerleklere fren kuvvetinin aktarılması ve aracın durdurulması veya tekerleğin yol yüzeyi üzerinde kızıaklandırılması sürecine dayanır. Bu süreci takiben, tekerleğin açısal hızı düşer, kinetik enerji termal enerjiye dönüşür ve araç yavaşlar. Fren kuvvetinin çok büyük olduğu durumlarda, araç tekerliği kilitlenir ve yol yüzeyinde kaymaya başlar. Bunun sonucu olarak, lastik ve yol temas yüzeyi arasında aracı yavaşlatan sürtünme kuvveti oluşur. Boyuna sürtünme katsayısı ölçüm cihazları, tekerleğin kızıaklanmasını kontrollü kayma (kayma oranı) ile sağlar. Kayma oranı kullanmanın amacı tekerlek ve araç hızını hesaplamak ve karşılaştırmaktır.

Kayma oranı 0 ile 1 arasında değişmektedir, fakat en yüksek boyuna sürtünme katsayısı ve en kısa araç durma mesafesini sağladığından en uygun kayma oranı 0,15-0,20 arasındadır. Sürtünme katsayısı ölçüm prensibini kullanan cihazlar sabit kayma oranı ile çalışmaktadır. Sabit kayma oranlı cihazlar sürekli ölçüm alımı sağlaması ve uzun kesimlerin takibini kolaylaştırması açısından daha çok araştırma çalışmalarında çok tercih edilmektedir (Andriejauskasa vd., 2014; Uz vd., 2016). Kilitlenen tekerlek kayma direnci ölçüm aracı da sabit kayma oranına göre tasarlanan bir cihazdır (Şekil 3.14). Aynı zamanda saha ölçümlerinde ASTM E 274 standardı takip edilerek kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı

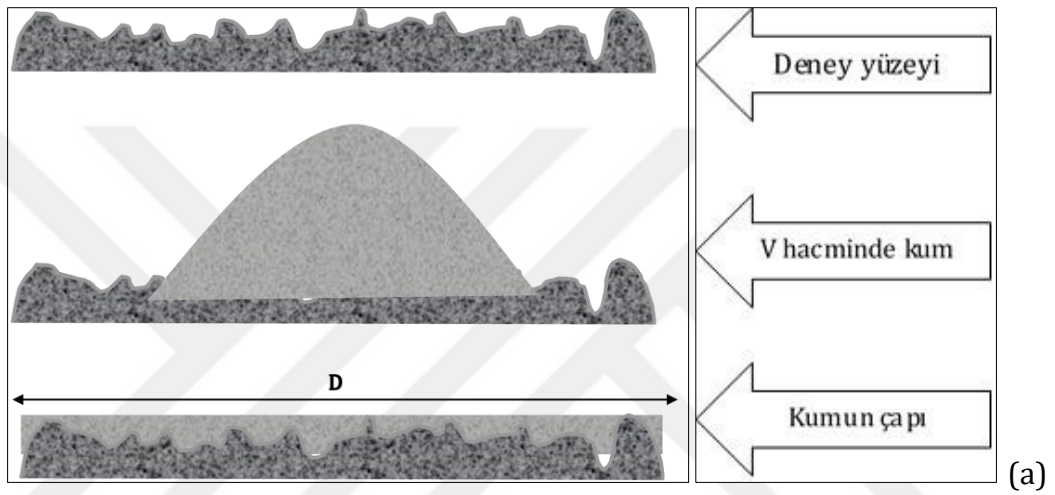
Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracının ölçüm prensibini gösteren şematik çizim Şekil 3.15 verilmiştir. Buna göre kayma direnci birimi “SN” kuvvetin (F) 100 katının cihazın ağırlığına (W) bölümü ile elde edilir.



Şekil 3.15. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ölçüm prensibi

3.6.4. Kum-yama

Kum yama testi, kaplama yüzeylerinin makro dokularını belirlemede en çok bilinen ve kullanılan metottur. Bu testin uygulaması, farklı kurumlar ve enstitüler tarafından yayımlanan standartlara göre değişmektedir. Bu çalışmada, kum yama testini uygulamak için ASTM E 965 kullanılmıştır. Bu test metodunda, makro doku derinliğini boşlukları dolduran kumların oluşturduğu malzemelerin hacmi belirler.



Şekil 3.16. Kum-yama testi şeması (a) ve sahada uygulaması (b)

Testin, laboratuvarda hazırlanan numuneler üzerinde uygulanma sırası şu şekildedir. İlk olarak temiz yüzey üzerine önceden belirlenen miktarda kum dökülür ve kum yayıcı tokmak ile dairesel hareketlerle dağıtılır. Bu dağıtma hareketleri dairenin çapı sabitleninceye ve kum tanecikleri boşlukları tamamen doldurana kadar devam eder ve yüzeyde en yüksek noktalar görünene kadar yayıma devam edilir. Bu süreçten sonra dairenin çapı eşit aralıklı olacak şekilde dört yönden ölçülür. En sonunda dört okumanın ortalaması belirlenir ve ortalama doku derinliği aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanır.

$$MTD=4V/\pi D^2 \quad (1)$$

Burada;

MTD: Ortalama doku derinliğini,

V: Kum hacmi,

D: Ortalama kum çapını temsil etmektedir.

3.6.5. Akış-zaman ölçer

Bu test metodu, ASTM E 2380 standardı takip edilerek yapılmıştır. Bu test, yer çekimi kuvveti altında bilinen bir miktarda suyun, yapının kaplama dokusu içindeki boşluklar boyunca ne kadar sürede kaçacağını gösteren özel bir cihaz ile uygulanır. Cihazın ana gövdesi su ihtiva eden dikey bir cam silindirdir. Silindirin üstü açıktır tabanda ise çevresi kauçuk bir conta ile kaplanmış tahliye kapağı vardır. Kapak yaylı bir düzeneğe ile operatör tarafından kontrol edilir. Üst ve alt şamandıra kapakta asılı şekilde silindirin içine dikey olarak monte edilmiştir. Cihazda şamandıralar tarafından tetiklenen 0,01 hassasiyetli elektronik zamanlayıcı bulunmaktadır. Cihazın bu özelliği daha doğru ve hassas sonuçlar almaya yaramaktadır.

Bu metot ile yüzey doku derinliği tahmin etme yöntemi özetle aşağıdaki gibidir; Cihaz su deşarj kapağı kapalı bir şekilde ile numunenin üzerine yerleştirilir, Üst şamandıra seviyesinin üzerine çıkacak miktarda su, akış ölçere koyulur. Zamanlayıcı sıfırlanır ve suyun deşarj olması için piston kaldırılır. Su kaplama

boşluklarından aktıkça, silindirdeki su seviyesi üst şamandırayı geçerek elektronik zamanlayıcıyı tetikler ve sayaç çalışır. Su seviyesi alt şamandıra seviyesini geçtiğinde alt şamandıra zamanlayıcıyı tetikler ve sayaç durur. Su seviyesinin üst şamandıra anahtarı seviyesinden alt şamandıra anahtarı seviyesine düşmesi için gereken zaman, zamanlayıcının üzerinde belirir. Testin tekrarlı uygulanması daha doğru sonuçların alınmasını sağlar. Testler minimum dört kez tekrar edilerek uygulanmış ve test sonucu ölçümlerin aritmetik ortalaması, olarak alınmıştır. Sonuç olarak, ortalama doku derinliği aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$MTD = (3,114/OFT) + 0.636 \quad (2)$$

Burada,

MTD: Ortalama doku derinliğini,

OFT: Ortalama akış süresini temsil etmektedir.

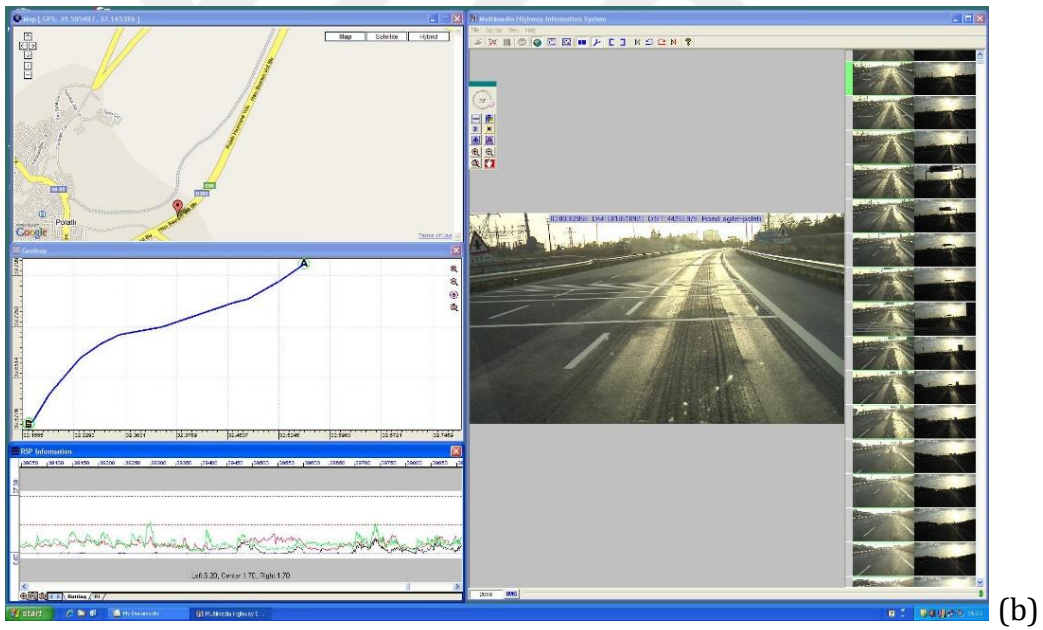


Şekil 3.17. Akış-zaman ölçer

3.6.6. Lazer profilometre

Karayolu Genel Müdürlüğü bünyesinde yer alan ve Ar-Ge Dairesi Başkanlığı yönetiminde kullanılan araçlardan ve ölçüm yöntemlerinden biri olan araca monte edilmiş lazer profilometre cihazı ile doku ölçümünün yanı sıra boyuna-

enine görüntü, IRI değerleri, teker izi oturması ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Lazer profilometre aracı (a), ölçüm ekranı (b)

Araç aynı zaman da geometrik özellikler, küresel konum ve yüzey dokusu çıkarabilen bir araç kullanmaktadır. Araçta yer alan bilgisayar programı/yazılımı sayesinde yüksek çözünürlüklü yüzey kameraları ile çekilen fotoğraflar, bu fotoğrafların alındığı yeri gösterir harita üzerinde ölçümlere ait koordinat, doku ortalama derinliği, IRI ve üstyapı durumu (iyi, orta, kötü olarak) bilgileri ile

birlikte görülebilmekte, fotoğraflar otomatik veya manuel biçimde görsel olarak iletilebilmektedir. Cihazda yer alan IRI değerleri otomasyon sistemi ile anında KGM tarafından kayıt altına alınmakta ve gözlemlenmektedir. IRI değerleri sağlanan hizmetin kabul edilebilirliği yönünden önemli ölçüt niteliklerinden biri olarak görülmektedir. Araçta, 6 adet açılı lazer, 11 dikey lazer olmak üzere toplam 17 adet lazer bulunmaktadır. Bunun yanında 2 adet akselometre ve 1 adet atalet hareket sensörü bulunmaktadır.

3.7. Saha Ölçüm Prensibi ve Planı

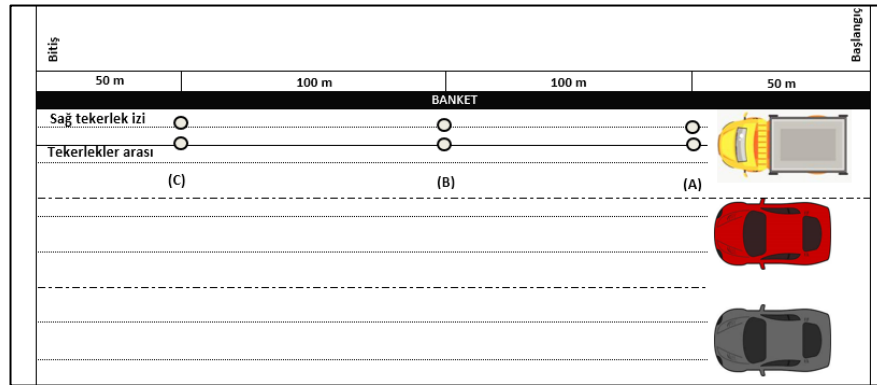
Bu tez kapsamında biri otoyol diğeri de devlet yolu üzerinde inşa edilen aşınma TMA ve aşınma kaplamaları üzerinde farklı değişkenler kullanılarak pürüzlendirme uygulaması yapılmıştır. Her iki yolun geometrik özellikleri ve pürüzlendirme uygulaması kesimlerinin uzunluğu birbirinden farklı olduğu için ölçüm lokasyonlarında da farklı bir ölçüm prensibi takip edilmiştir. Ayrıca, üzerine pürüzlendirme uygulaması yapılan yol kaplamalar farklı tarihlerde inşa edilmiş, kimi KGM 5. Bölge Müdürlüğü'nde (Mersin) kimi Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi'nde (Adana) kimi de KGM' de (Ankara) bulunan cihazların saha ölçümlerinde kullanılmıştır. Kurumlar çalışma programlarına uygun olarak ölçüm cihazları sahaya çıkarılmış ve bu nedenle farklı cihazlar farklı zaman dilimlerinde kullanılmak zorunda kalmıştır. Bu nedenle hem ölçüm prensibinde hem de saha ölçüm planında farklılıklar oluşmuştur. Tezin bu kısımda takip edilen ölçüm prensiplerine ve saha ölçüm planları detaylandırılmıştır.

3.7.1. Saha ölçüm prensibi

TMA tabakası 3 şeritli otoyol üzerinde inşa edilmiş ve üzerinde pürüzlendirme uygulamaları Çizelge 3.9' de verildiği gibi 300'er metre uzunluğuna sahip kesimler halinde yapılmıştır. Gerek kaplama kayma direnci performansının ölçülmesinde gerekse de yüzey doku özelliklerinin belirlenmesinde ağır taşı trafiğinin seyrettiği gidiş istikametinde sağ şerit kullanılmıştır. Ağır taşıt trafiği şeridinin seçilme nedenleri arasında, öncelikle yol üzerinde ölçüm yapacak

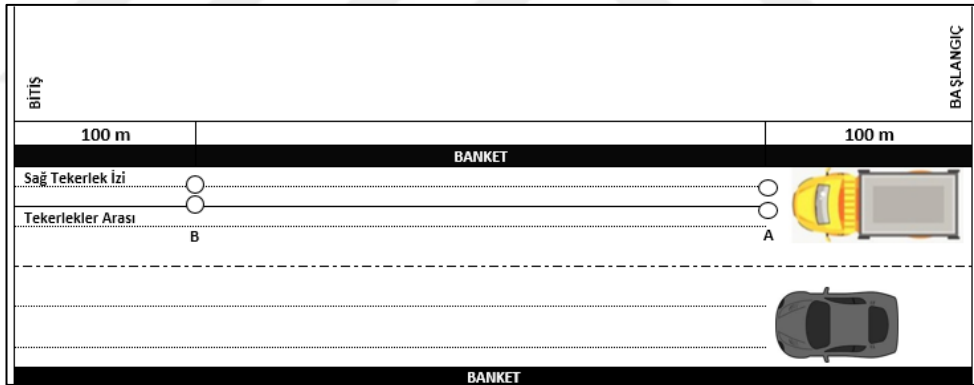
personelin güvenliği sağlamak olmuştur ki, bu şeritte hareket eden araçların hızları diğer şeritlere nazaran daha düşük ve trafik kontrolünün bu şeritte daha kolay sağlanmasının mümkün olmasıdır. Bu şeritte seyreden araçların diğer araçlara oranla daha yavaş hareket etmesi, daha fazla yüke sahip olması diğer seçim kistasını oluşturmuştur. Bu şekilde, araçlar yol yüzeyine zamansal olarak daha fazla süre temas halinde olacağı öngörülmüştür. Öyle ki, araç tekerleklerinin kaplama yüzeyine daha fazla temas etmesi yol yüzeyinin daha hızlı aşınmasına neden olacağı önceki çalışmalardan da bilinmektedir (Ahammed ve Tighe, 2009; Andriejauskasa vd., 2014; Gökalp ve Uz, 2017a; Kogbara vd., 2016; Panagouli ve Kokkalis, 1998).

Otoyolu üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulaması sonrası yukarıda anılan kayma direnci performansı ve yüzey doku derinliği ölçümleri sağ şerit üzerinde üç noktada yapılmıştır. Başlangıçta, sağ, sol tekerlek izi ve tekerlekler arasında yapılan ölçümlerde, sürücülerin dikkatsiz davranması, kural ihlalleri nedeniyle iş sağlığı ve güvenliği kapsamında sol tekerlek izinde yapılan ölçümler iptal edilmiştir. Bu nedenle, saha ölçümleri sağ tekerlek izinde ve tekerlekler arasında tanımlanan KM ve banket referans alınarak yol üzerindeki standart mesafelere uygun olarak yapılmıştır. Otoyolu üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulaması akabinde üzerinde yapılan performans ölçümleri, bir kesim için başlangıçta 9 noktada sonrasında 6 noktada ölçüm alınmıştır. İstisnai olarak, kireçtaşı kullanılarak inşa edilen TMA üzerinde yapılan ölçümler, A ve B kesitleri üzerinde yapılan ölçümlerle sınırlı tutulmuştur. TMA kaplaması üzerinde yapılan ölçüm noktalarını gösteren örnek bir şema Şekil 3.19 paylaşılmıştır.



Şekil 3.19. TMA aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçüm noktaları şeması

Mersin-Erdemli-Silifke-Taşucu (MEST) güzergâhında yer alan devlet yolu iki şeritli olarak inşa edilmiş bir yoldur. TMA aşınma tabakası üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamaları Çizelge 3.10’ da verildiği gibi 400-500 metre uzunluğuna sahip kesimler halinde yapılmıştır. Otoyol üzerinde inşa edilen TMA kaplamasında olduğu gibi kayma direnci performansının ve yüzey doku özelliklerinin belirlenmesi ağır taşıt trafiğinin seyrettiği gidiş istikametinde sağ şeritte yapılmıştır. Ağır taşıt trafiği şeridinin seçilme nedenleri TMA kaplamasında izah edilenler ile tümüyle benzerdir. TMA tabakasında gözlenen iş sağlığı güvenliği kapsamında riskler dikkate alınarak saha ölçümleri sağ tekerlek izinde ve tekerlekler arasında yapılmıştır. Ayrıca, yol mesafesinin uzun olması, yolun TMA inşa edilen otoyola kıyasla daha MEST devlet yolunun daha dar olması ve araştırma kesimlerinin daha fazla olması nedeniyle ölçümler bir kesim üzerinde iki noktada yapılmaya karar verilmiştir. MEST devlet yolu üzerinde her bir kesim için başlangıçta 4 noktada ölçüm alınmıştır. Aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçüm noktalarını gösteren örnek bir şema Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20. AB aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçüm noktaları şeması

Hem TMA hem de aşınma tabakaları üzerinde yapılan ölçümler, belli bir sistem içinde yapılmıştır. Herhangi bir kesim için sağ tekerlek, sol tekerlek ve tekerlekler arası ölçümler için gözlemler yapılmış ve banket çizgisi iç kesimi referans alınarak noktasal mesafeler tanımlanmıştır. Bu mesafeler, 90 santimetre (cm) sağ tekerlek izi ölçümleri için, 170 cm tekerlekler arası ölçümleri için ve 260 cm sol tekerlek izi ölçümleri için tanımlanmıştır.

3.7.2. Saha ölçüm planı

Bu tez kapsamında, üç farklı kayma direnci ölçüm yöntemi ve üç farklı yüzey doku ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Ölçümlerin yapılabilmesi için gereken cihazlar üç farklı kurum ve şehirler üzerinden temin edilmiştir (Çizelge 3.11).

Çizelge 3.11. Ölçüm yöntemi cihazların ve temin edilen kurumlar

Sıra	Cihaz	Temin edilen kurum	Şehir
1	İngiliz pandülü	Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi (ATÜ)	Adana
2	Dinamik sürtünme ölçer	KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü	Mersin
3	Kilitlenen tekerlek Kayma direnci aracı	KGM	Ankara
4	Kum-yama	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü	Adana, Mersin
5	Akış-zaman ölçer	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü	Adana, Mersin
6	Lazer Profilometre	KGM	Ankara

Çizelge 3.11’ de görüleceği üzere üç farklı kurumdan ve/veya kentte bulunan cihazlar, kurumların iş programına bağlı olarak organize edilmiş ve mümkün olduğu ölçüde saha eş zamanlı olarak ölçümler alınmaya çalışılmıştır. Yanı sıra 052 otoyolu üzerindeki TMA ve MEST güzergâhındaki devlet yolu üzerindeki aşınma tipi kaplamaların farklı tarihlerde inşa edilmiştir. Her iki üstyapı kaplama ölçümleri için en az bir günlük çalışma gerekmiştir. Bu nedenle iki farklı güzergâh üzerinde ölçümler iki farklı gün yapılmak durumunda kalınmıştır. Bu nedenle belli bir plandan bahsetmek mümkün görünmese de ölçümler erken dönem için mümkün olduğunca sık aralıklarla,, sonrasında üç ve/veya altı aylık süreler içerisinde yapılmaya çalışılmıştır. Tez kapsamında yapılan ölçümler ve tarihleri 052 yolu üzerinde TMA için Çizelge 3.12’ de ve MEST devlet yolu güzergâhındaki aşınma tabakası için Çizelge 3.13’ de üzerinde verilmiştir.

Çizelge 3.12. TMA aşınma üzerinde yapılan ölçümler ve tarihleri

Sıra	Ölçüm Tarihi	Açıklama
1	09.11.2016	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
2	10.11.2016	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
3	15.12.2016	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
4	09.03.2017	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
5	16.03.2017	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
6	22.05.2017	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
7	30.05.2017	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
8	09.11.2017	ATÜ ve KGM karayolları 5. Bölge Müdürlüğünden temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
9	28.02.2018	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
10	28.06.2018	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
11	17.07.2018	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
12	19.03.2019	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
13	23.01.2021	KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen DFT ve Akış-ölçer cihazları ile yapılan ölçümler

Çizelge 3.13. AB Aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçümler ve tarihleri

Sıra	Ölçüm Tarihi	Açıklama
1	30.05.2017	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
2	31.05.2017	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
3	19.07.2017	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
4	08.11.2017	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
5	27.02.2018	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
6	08.03.2018	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
7	27.06.2018	ATÜ ve KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
8	17.07.2018	KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
9	20.03.2019	ATÜ ve KGM karayolları 5. Bölge Müdürlüğü ve KGM' den temin edilen cihazlar ile yapılan ölçümler
10	24.01.2021	KGM Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünde temin edilen DFT ve Akış-ölçer cihazları ile yapılan ölçümler

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Tezin bu kısmında, 052 otoyolu üzerinde inşa edilen TMA ve MEST güzergâhı üzerindeki devlet yolu üzerinde inşa edilen aşınma tabakalarının üzerinde farklı tarihlerde yapılan ölçümler neticesinde elde edilen araştırma bulguları/sonuçları verilmiştir. Burada verilen bulgular ışığından genel bir değerlendirme yapılmıştır. Bulgular üzerinde tartışmalar ve analizler Bu tez çalışmasının 5. bölümünde yer alan “Tartışma ve Sonuçlar” kısmında detaylıca verilmiştir.

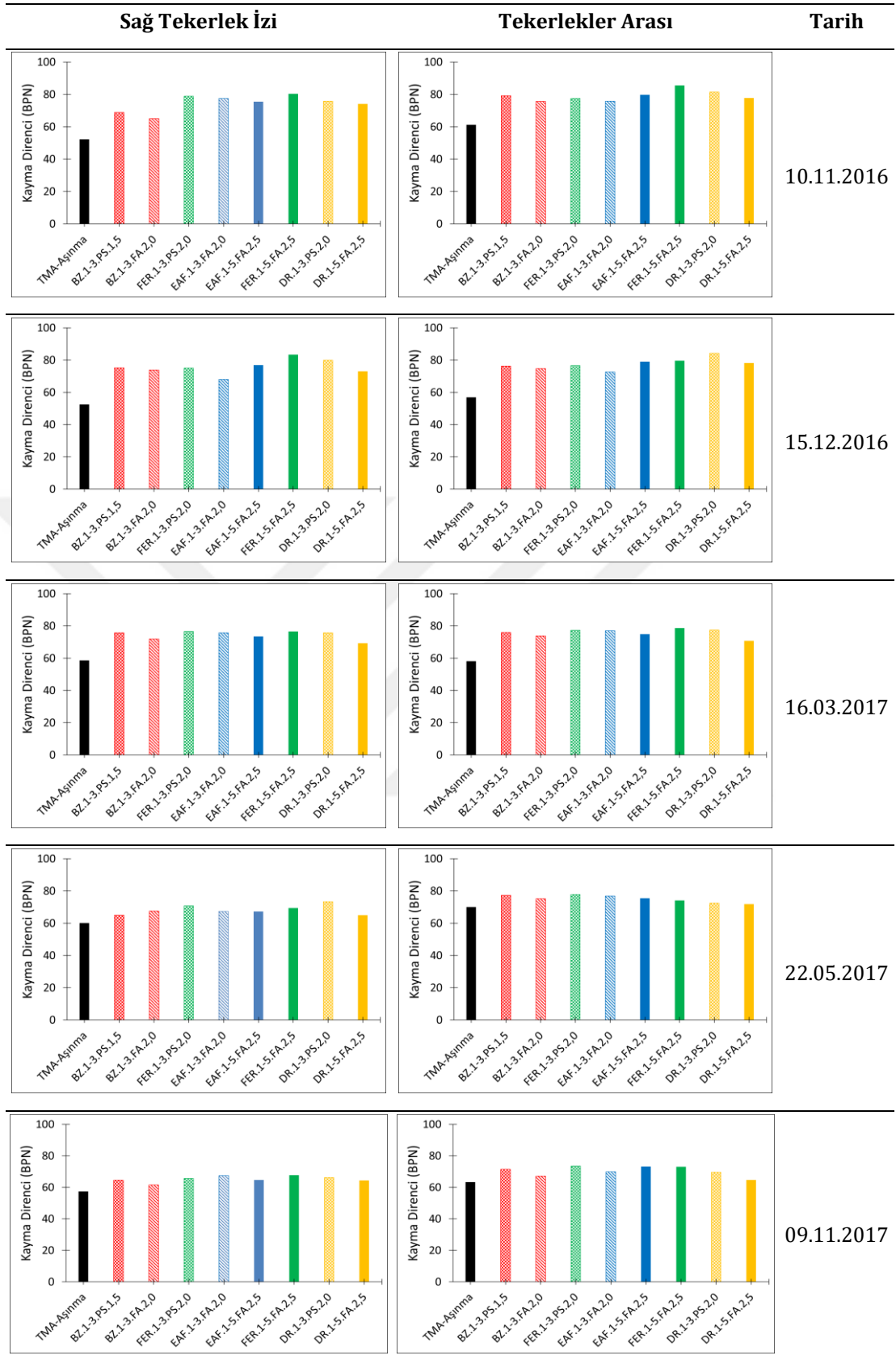
Tez kapsamında biri 052 otoyolu üzerinde biri de MEST güzergâhındaki bir devlet yolu üzerinde olmak üzere iki farklı yol üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulaması yapılmıştır. Bu pürüzlendirilmiş kesimler üzerinden elde edilen bulgular, “TMA tabakası üzerinde yapılan ölçümler” ve “Aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçümler” olarak iki farklı başlık altında her bir test yöntemi için ayrı ayrı verilmiştir.

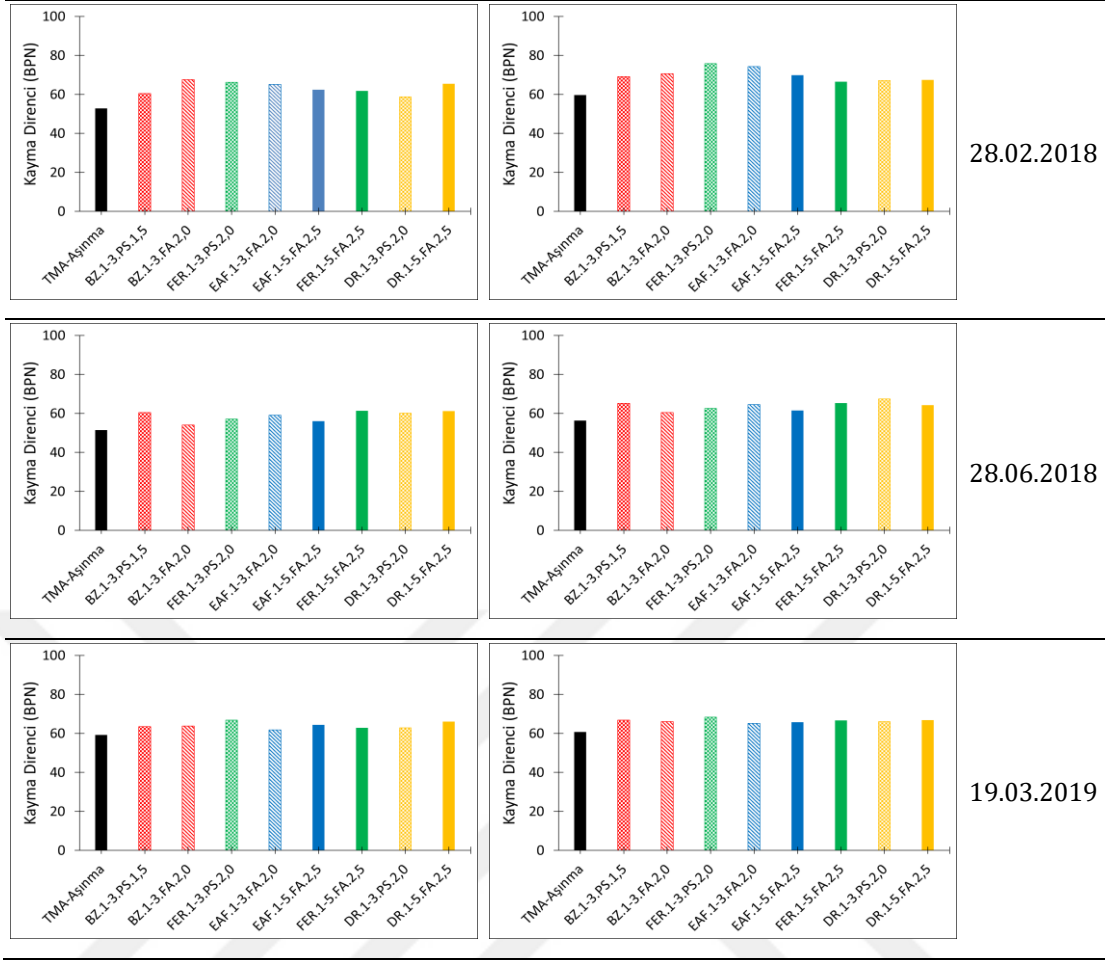
4.1. TMA Aşınma Tabakası Üzerinde Yapılan Ölçümler

TMA aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçümlere dair sonuçların verildiği bu bölümde sırasıyla İngiliz pandülü, dinamik sürtünme ölçer, kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı, kum yama, hidrotimer (akış ölçer) ve son olarak lazer profilometre ile yapılan ölçüm sonuçlarına dair sadece veriler paylaşılmıştır.

4.1.1. İngiliz pandülü ile yapılan ölçümler

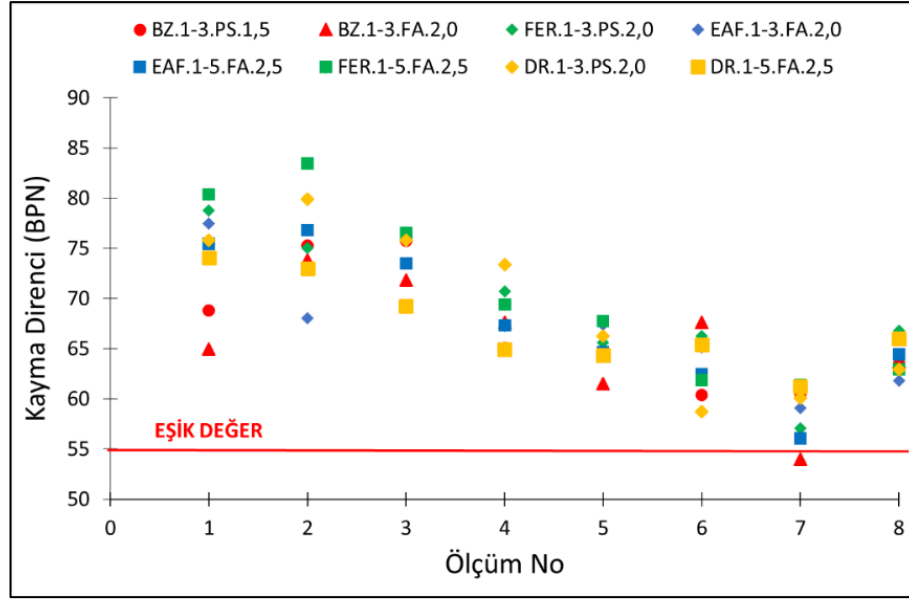
TMA tabakası üzerinde İngiliz pandülü -British Pendulum Tester (BPT)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir (Şekil 4.1).





Şekil 4.1. TMA aşınma tabakası BPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.1 incelendiğinde, TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde BPT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 60-80 (BPN) arasında, son ölçümlerinin de 60-70 (BPN) arasında değiştiği görülecektir.

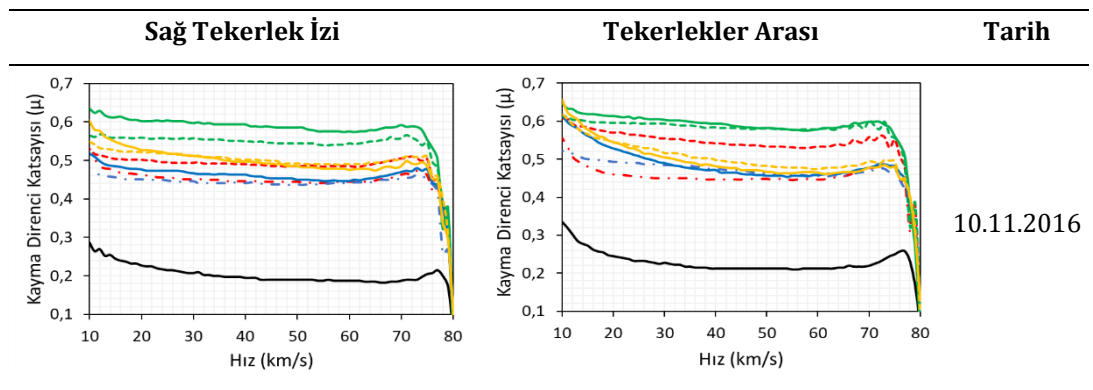


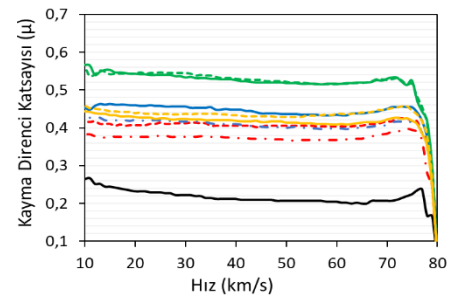
Şekil 4.2. Eşik değeri altında toplu BPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.2' te verilen toplu BPT ölçüm sonuçları incelendiğinde, BZ.1-3.FA.2,0 kodlu uygulamanın yedinci ölçüm sonucu haricinde tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin kabul edilen 55 (BPN) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

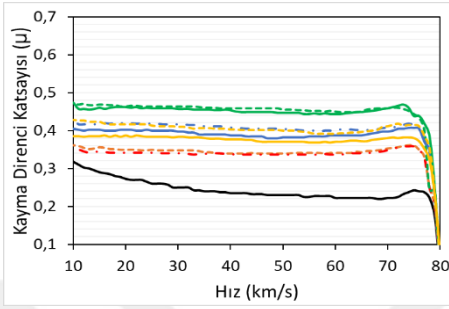
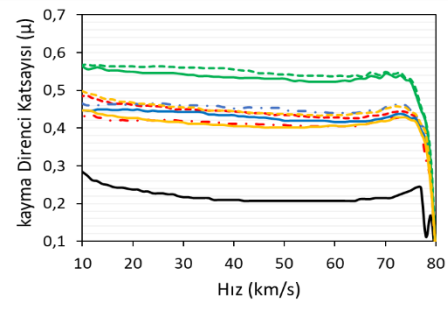
4.1.2. Dinamik sürtünme ölçer ile yapılan ölçümler

TMA tabakası üzerinde dinamik sürtünme ölçer –Dynamic Friction Tester (DFT)- ile yapılan ölçüm sonuçları bu bölümde verilmiştir (Şekil 4.3).

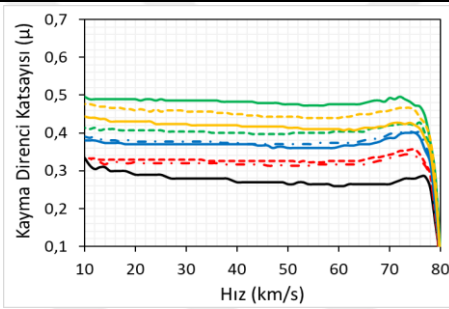
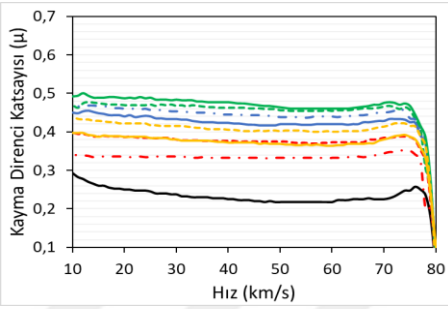




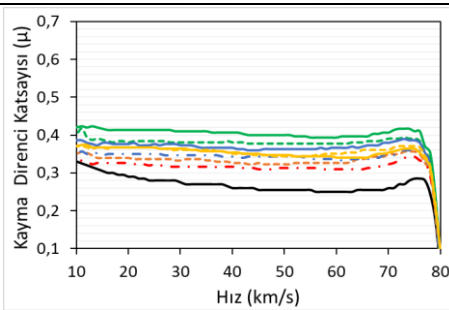
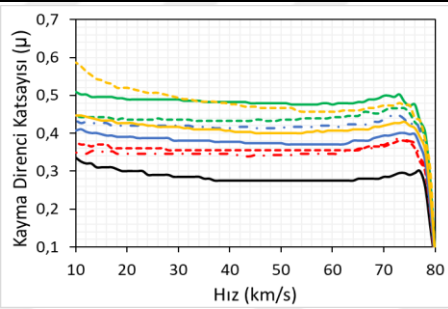
15.12.2016



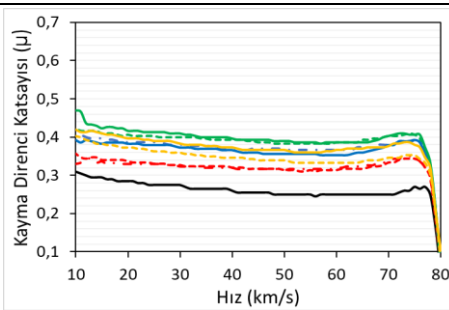
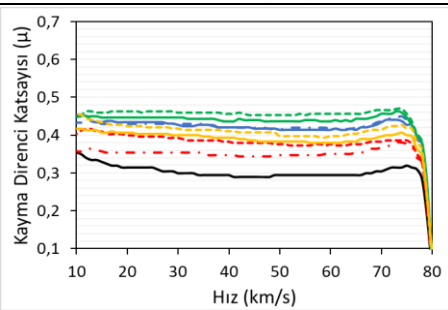
16.03.2017



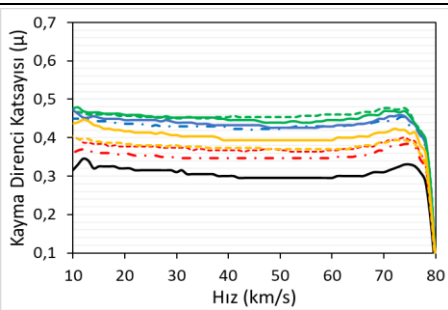
22.05.2017

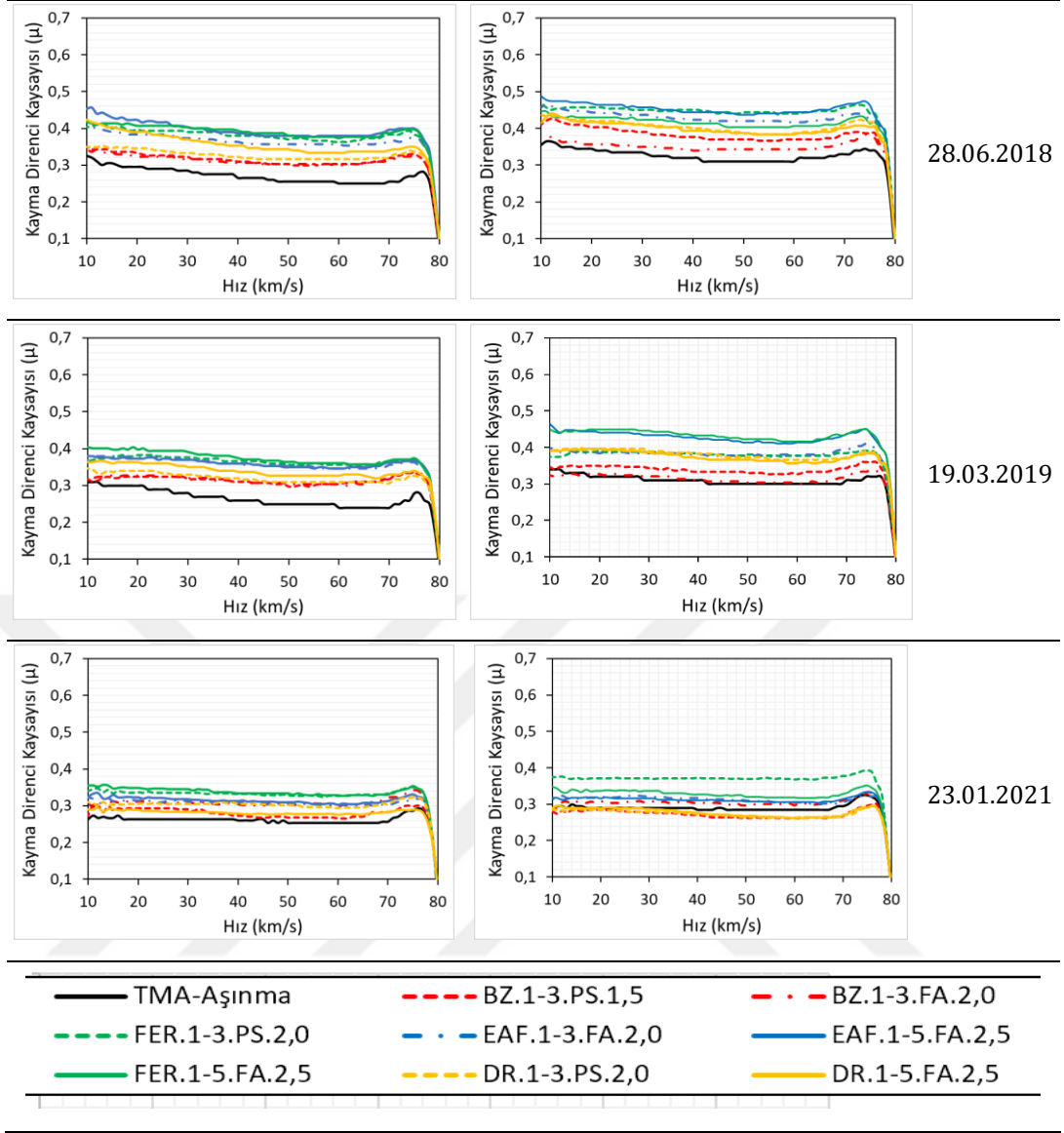


09.11.2017



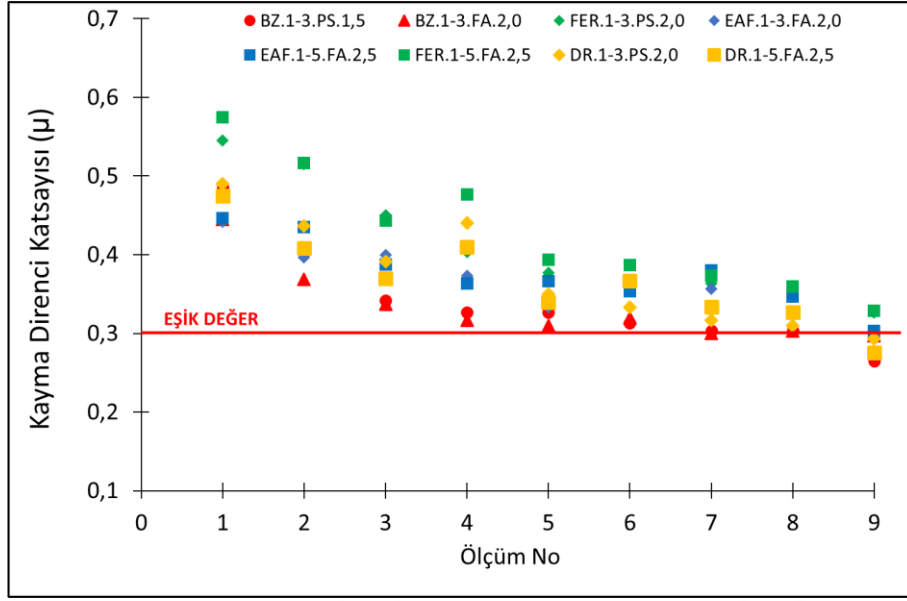
28.02.2018





Şekil 4.3. TMA aşınma tabakası DFT ölçüm sonuçları

Şekil 4.3 incelendiğinde TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde DFT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 0,45-0,65 (μ) arasında, son ölçümlerinin de 0,30-0,40 (μ) arasında değiştiği görülecektir.

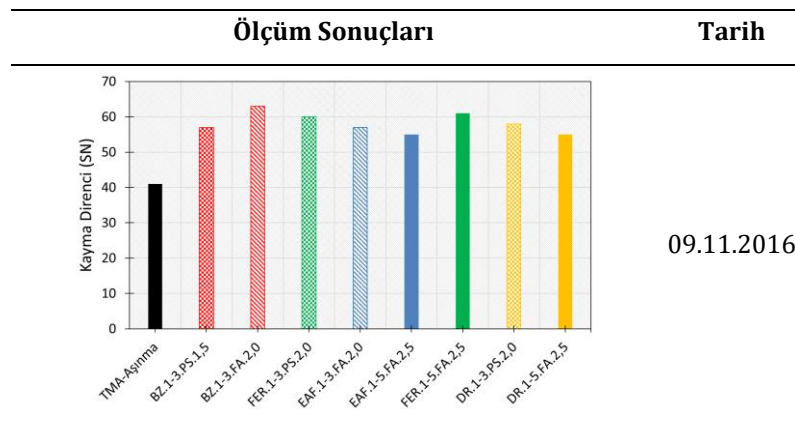


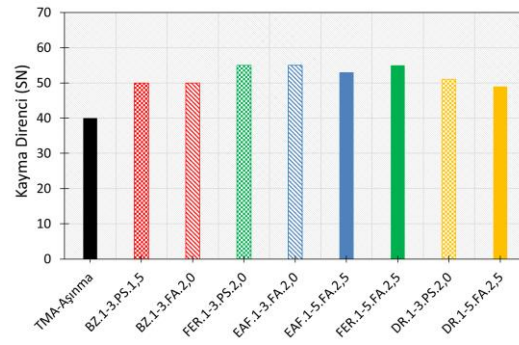
Şekil 4.4. Eşik değeri altında toplu DFT ölçüm sonuçları

Şekil 4.4' te verilen toplu DFT ölçüm sonuçları incelendiğinde, son ölçüm haricinde tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin kabul edilen 0,30 (μ) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

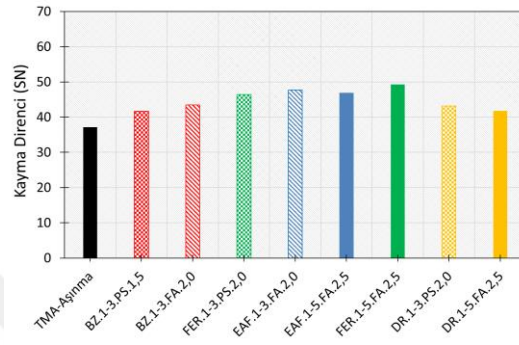
4.1.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ile yapılan ölçümler

TMA tabakası üzerinde Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı, Locked-Wheel Skid Resistance Tester (LWSRT) ile yapılan ölçüm sonuçları Şekil 4.5' te verilmiştir.

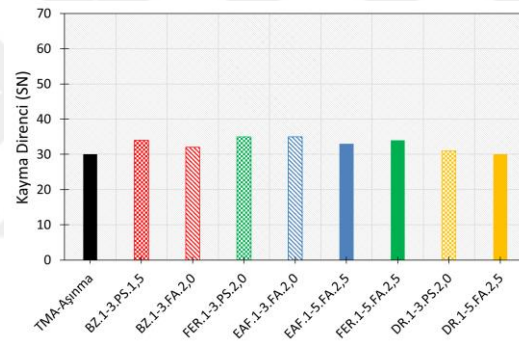




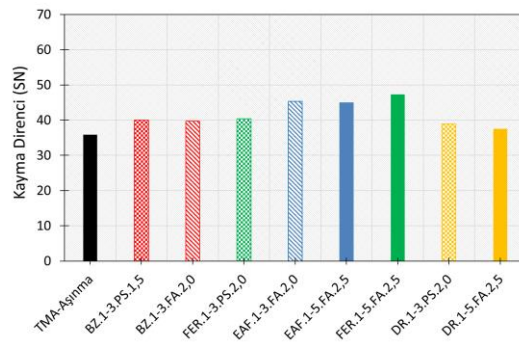
09.03.2017



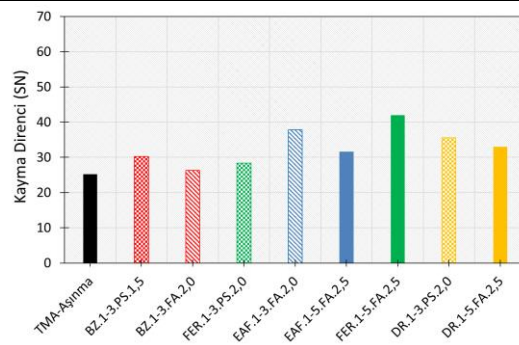
30.05.2017



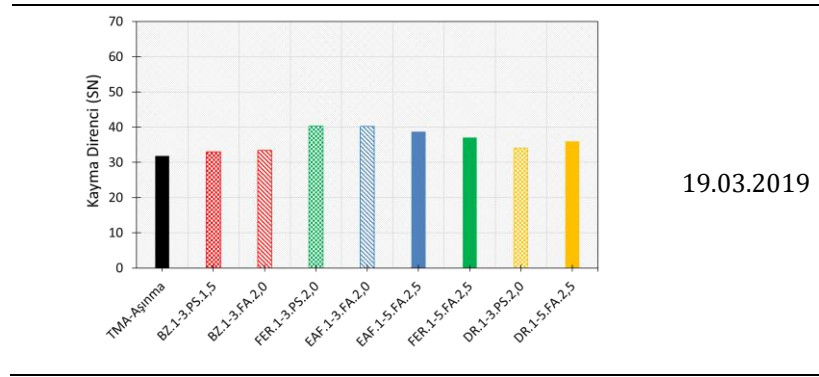
27.09.2017



28.02.2018



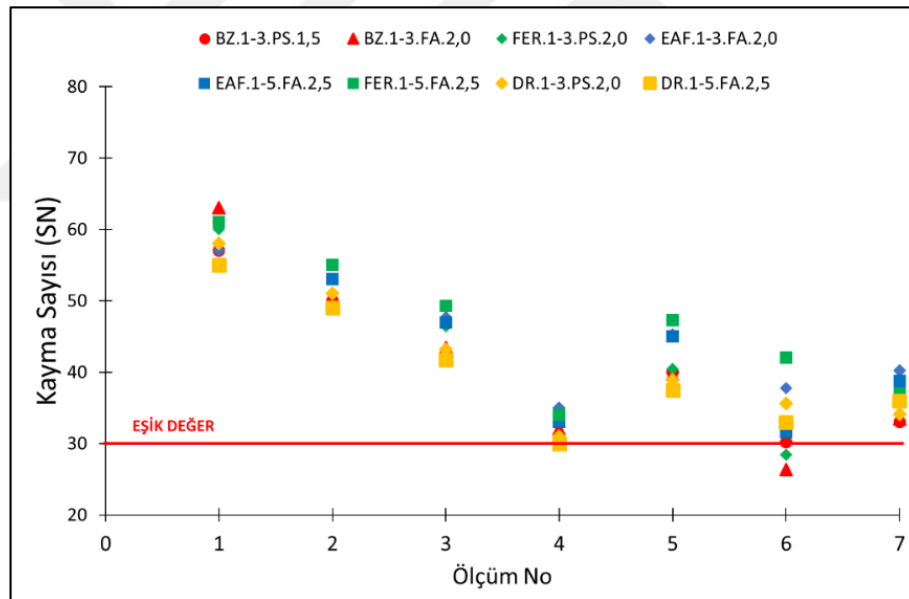
17.07.2018



19.03.2019

Şekil 4.5. TMA aşınma tabakası LWSRT ölçüm sonuçları

Şekil 4.5 incelendiğinde, TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde LWSRT testi ile sağ şerit için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 55-65 (SN) arasında, son ölçümlerinin de 35-40 (SN) arasında değiştiği görülecektir.

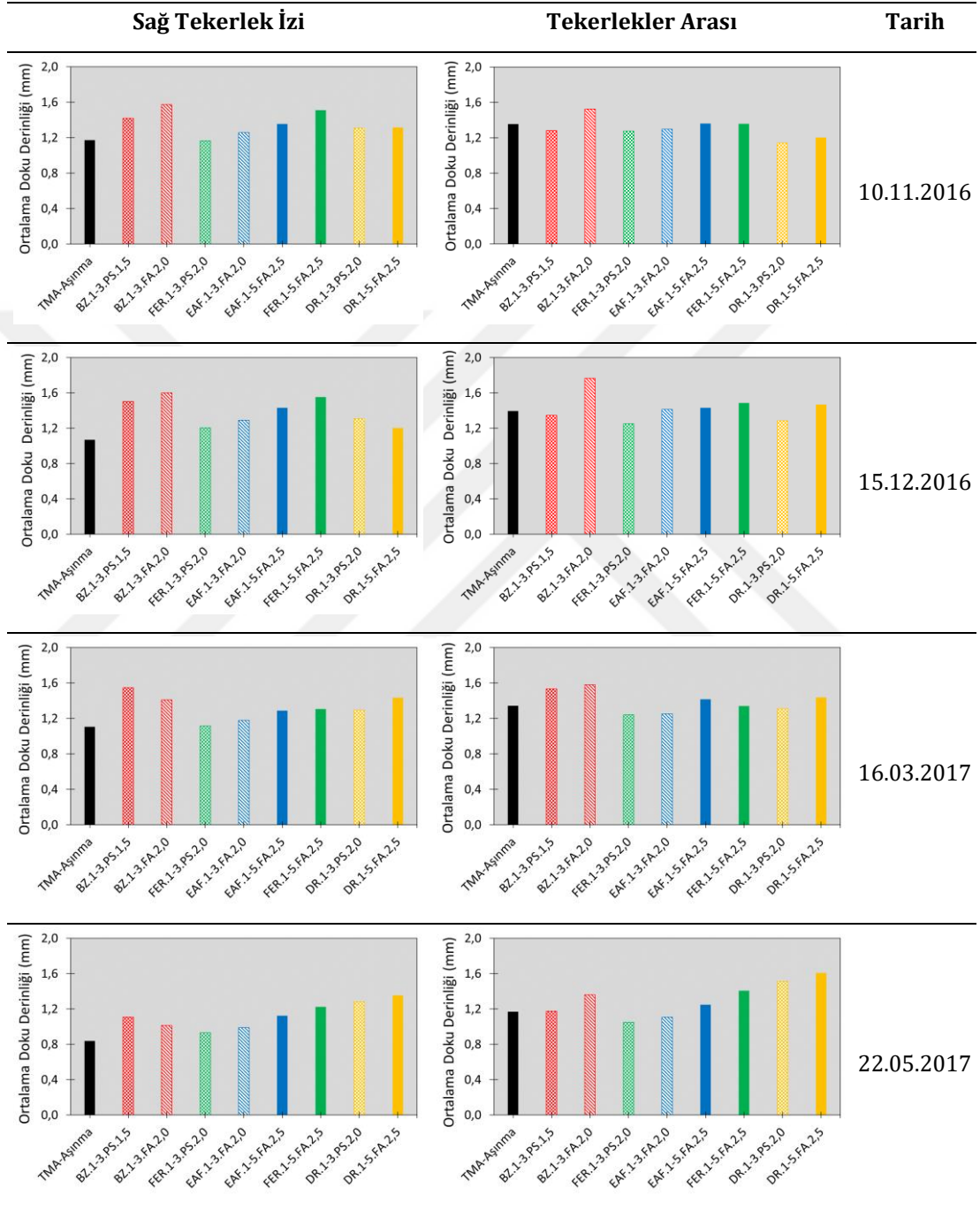


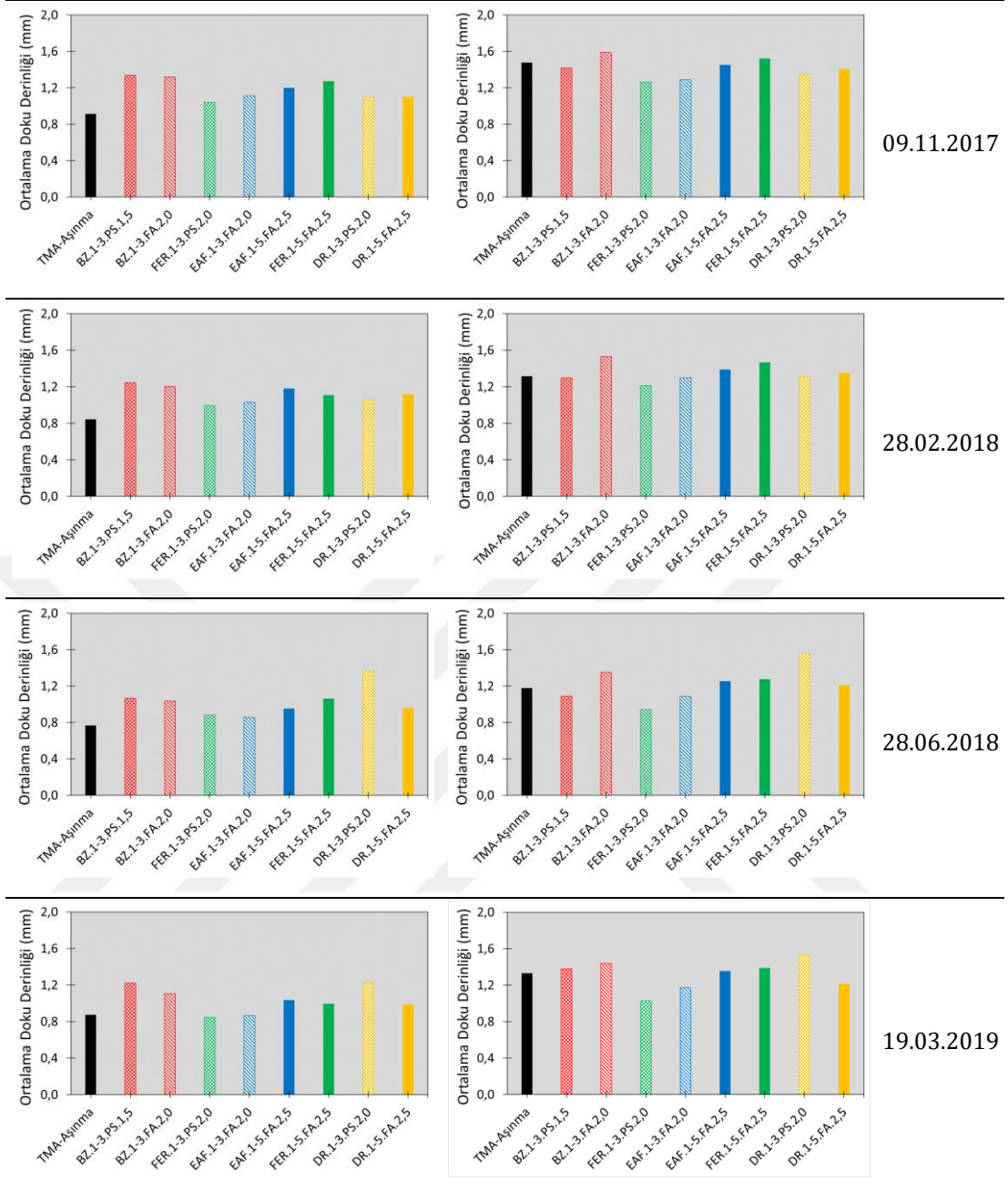
Şekil 4.6. Eşik değeri altında toplu LWSRT ölçüm sonuçları

Şekil 4.6' da verilen toplu LWSRT ölçüm sonuçları incelendiğinde, altıncı ölçüm haricinde tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin kabul edilen 30 (SN) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

4.1.4. Kum-yama ile yapılan ölçümler

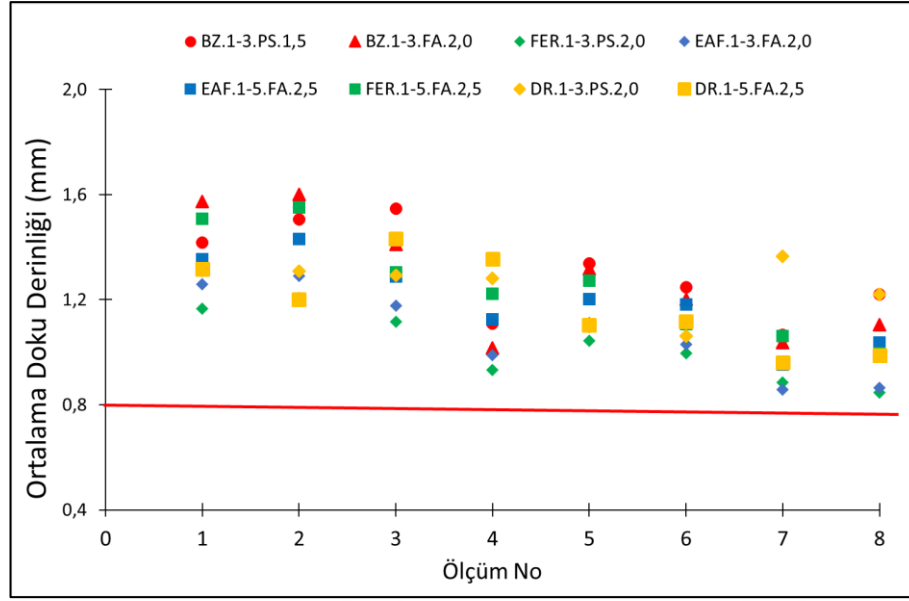
TMA tabakası üzerinde Kum-yama –Sand Patch Test (SPT)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir (Şekil 4.7).





Şekil 4.7. TMA aşınma tabakası SPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.7 incelendiğinde TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde SPT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 1,2-1,6 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 1,0-1,2 (mm) arasında değiştiği görülecektir.

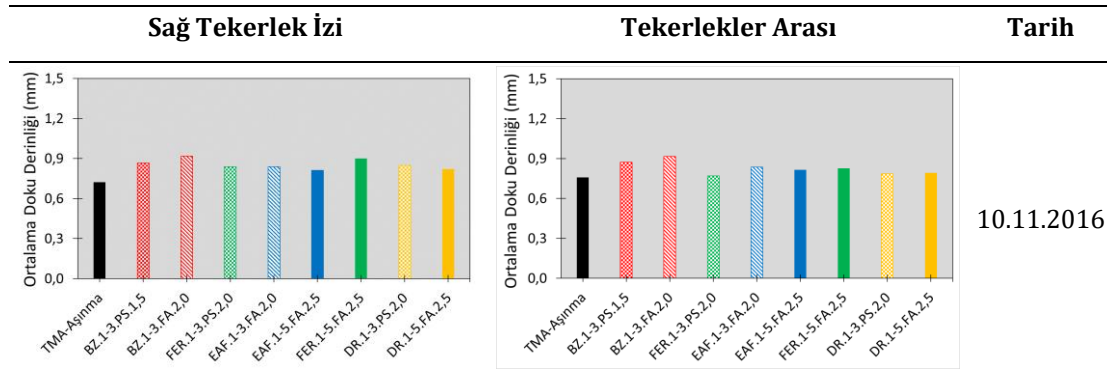


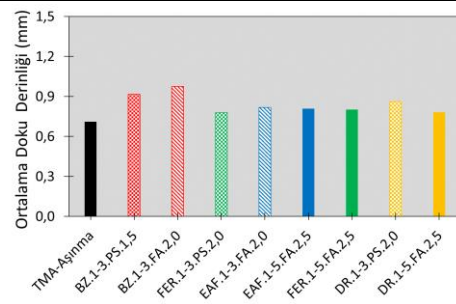
Şekil 4.8. Eşik değeri altında toplu SPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.8' de verilen toplu SPT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının ortalama doku derinliği değerlerinin kabul edilen 0,8 (mm) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

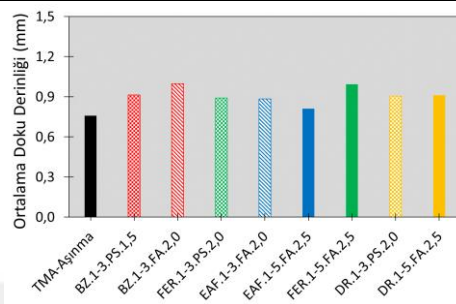
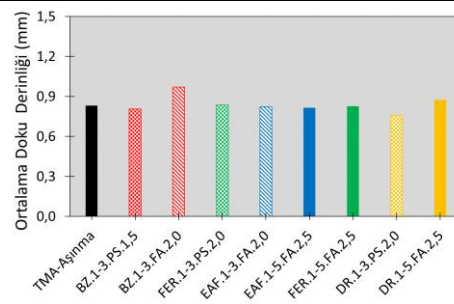
4.1.5. Akış-zaman ölçer ile yapılan ölçümler

TMA tabakası üzerinde Akış-zaman ölçer –Hidrotimer (HT)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir. **Ancak, 22.05.2017 tarihli saha ölçümünde cihazın arızası nedeniyle** ölçüm alınamamıştır (Şekil 4.9).

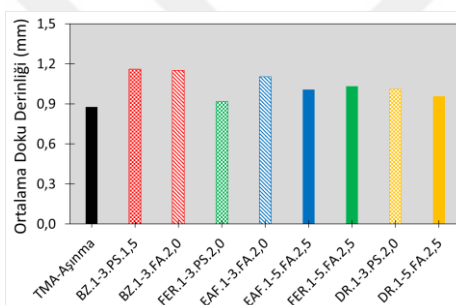
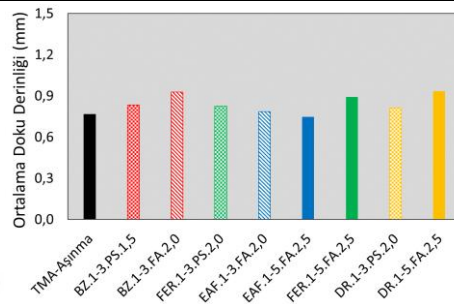




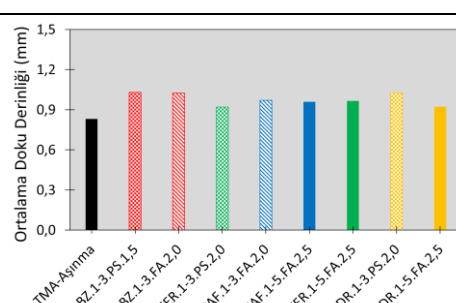
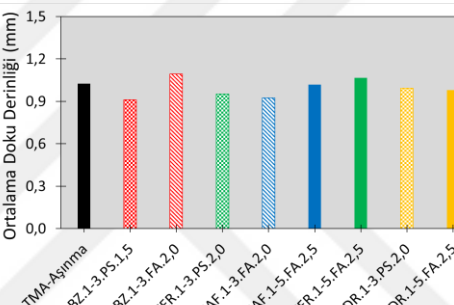
15.12.2016



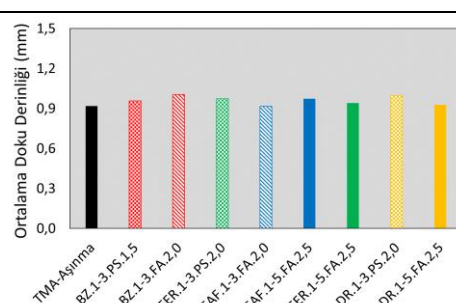
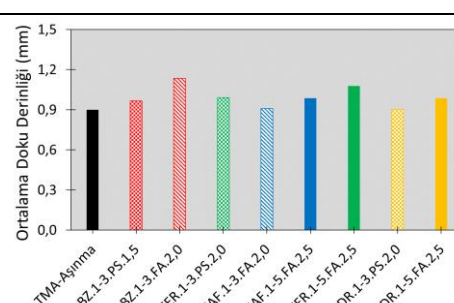
16.03.2017



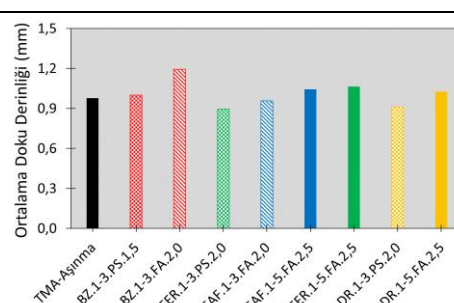
09.11.2017

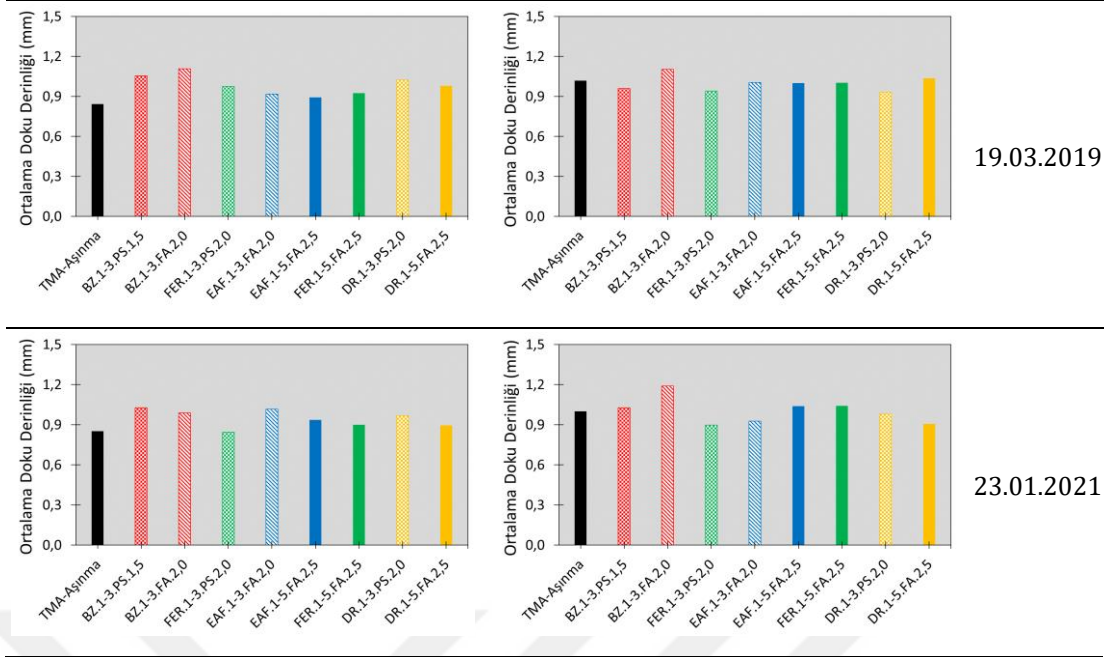


28.02.2018



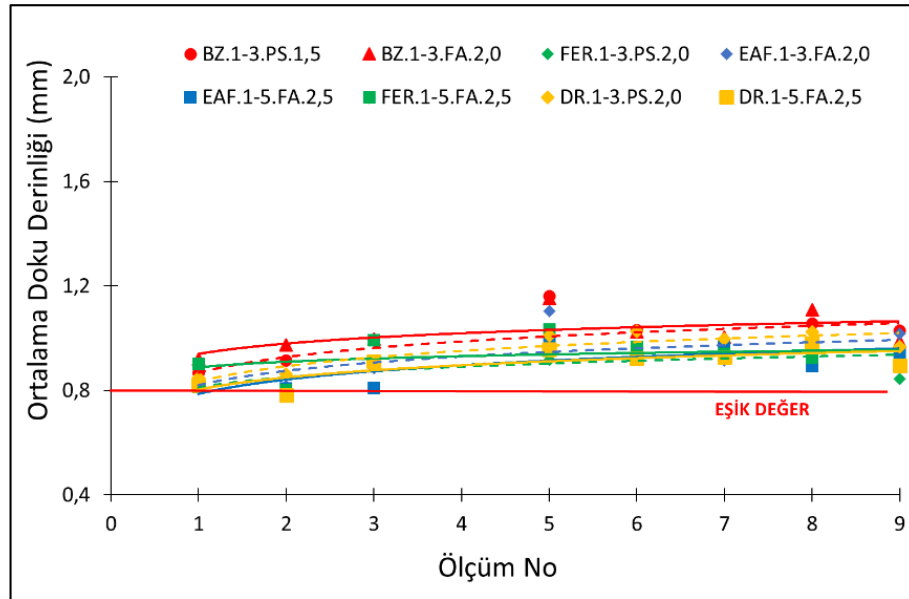
28.06.2018





Şekil 4.9. TMA aşınma tabakası HT ölçüm sonuçları

Şekil 4.9 incelendiğinde TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde HT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 0,8-1,0 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 0,8-1,0 (mm) arasında değiştiği görülecektir.

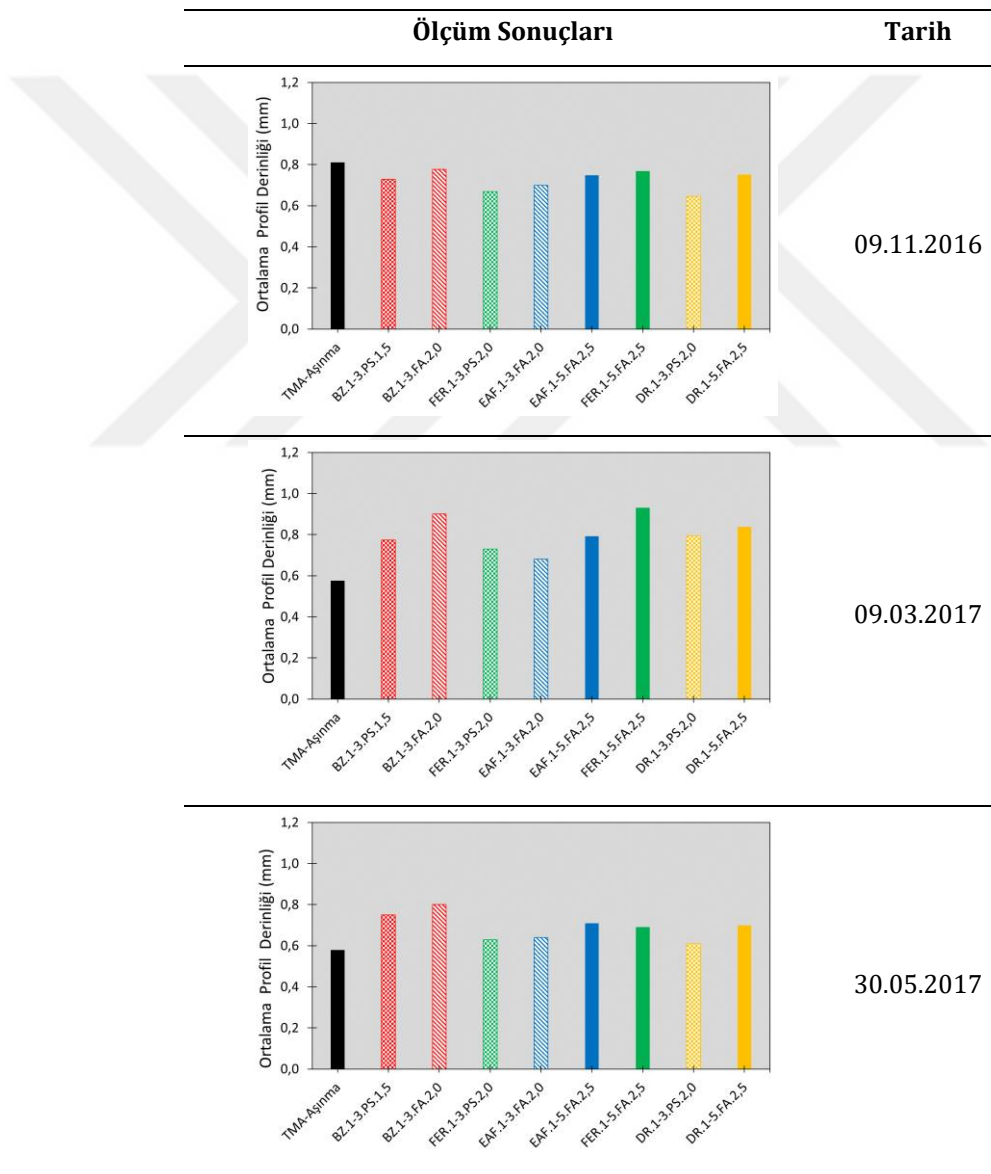


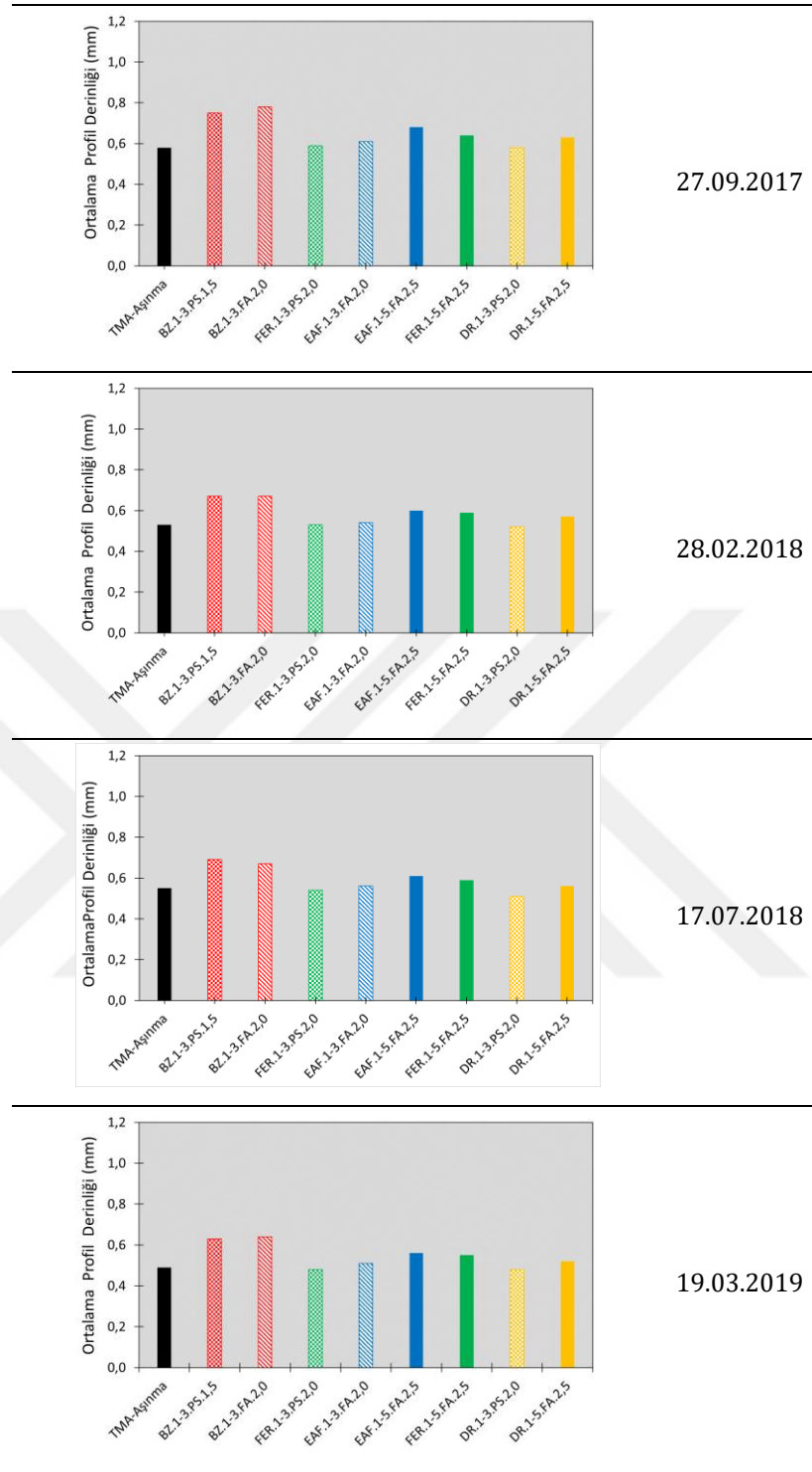
Şekil 4.10. Eşik değeri altında toplu HT ölçüm sonuçları

Şekil 4.10' da verilen toplu HT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının ortalama doku derinliği değerlerinin kabul edilen 0,8 (mm) eşik değerin üstünde kaldığı görülecektir.

4.1.6. Lazer profilometre ile yapılan ölçümler

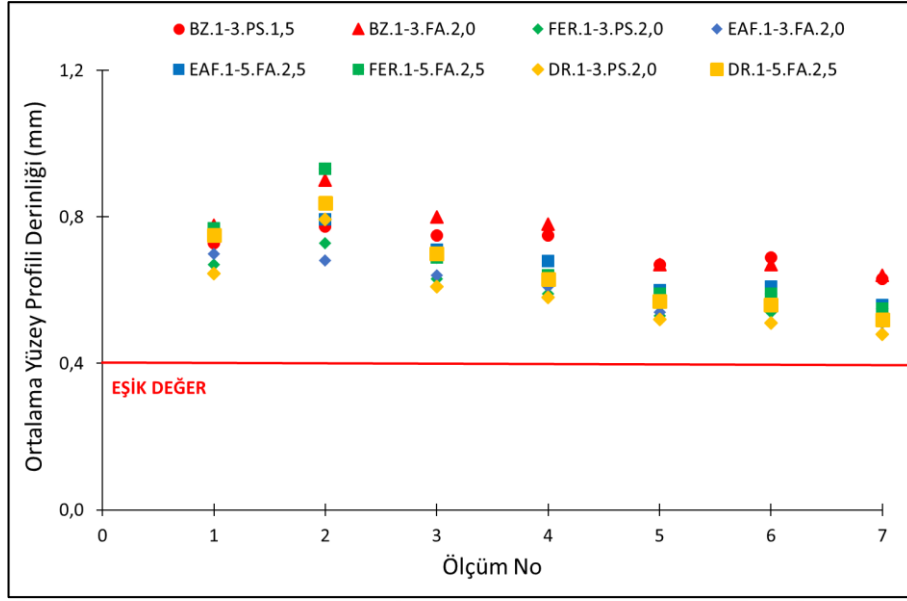
TMA tabakası üzerinde lazer profilometre -Lazer Profilometre (LP)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir (Şekil 4.11).





Şekil 4.11. TMA aşınma tabakası LP ölçüm sonuçları

Şekil 4.11 incelendiğinde TMA aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde LP testi ile sağ şerit için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 0,7-0,8 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 0,5-0,07 (mm) arasında değiştiği görülecektir.



Şekil 4.12. Eşik değeri altında toplu LP ölçüm sonuçları

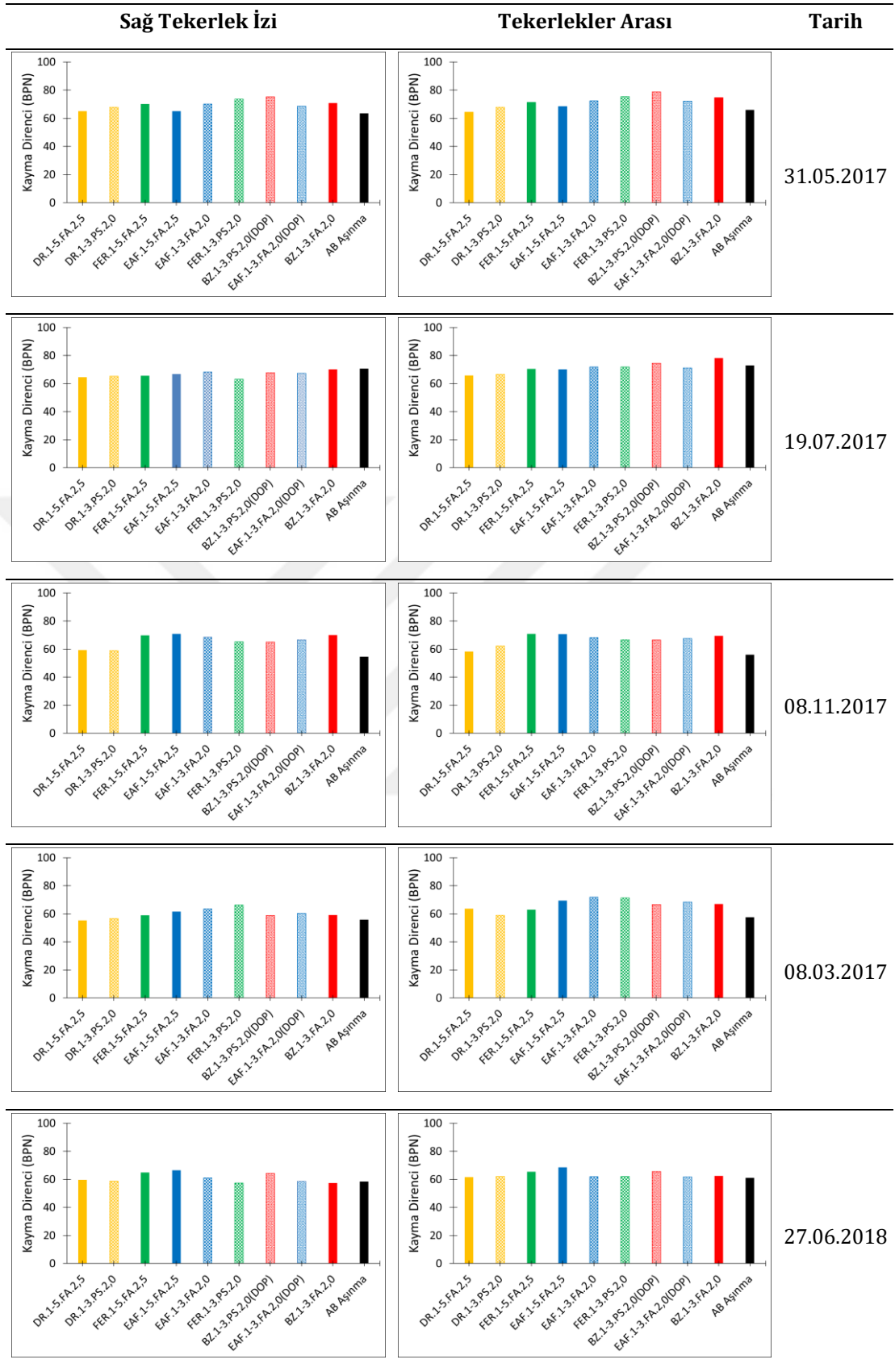
Şekil 4.12’ de verilen toplu LP ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının ortalama yüzey profil derinliği değerlerinin kabul edilen 0,4 (mm) eşik değeri üstünde kaldığı görülecektir.

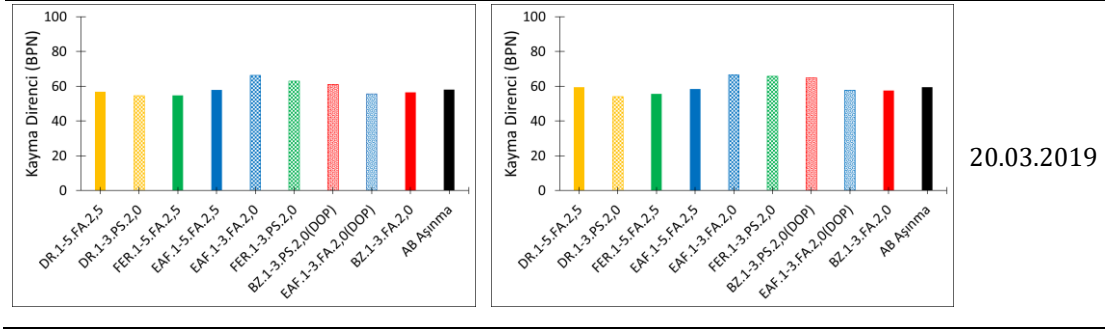
4.2. AB Aşınma Tabakası Üzerinde Yapılan Ölçümler

TMA aşınma tabakasında olduğu gibi AB aşınma tabakası üzerinde yapılan ölçümlere dair sonuçlar bu bölümde sırasıyla İngiliz pandülü, dinamik sürtünme ölçer, kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı, kum yama, hidrotimer (akış ölçer) ve son olarak lazer profilometre ile yapılan ölçüm sonuçlarına dair sadece veriler paylaşılmıştır.

4.2.1. İngiliz pandülü ile yapılan ölçümler

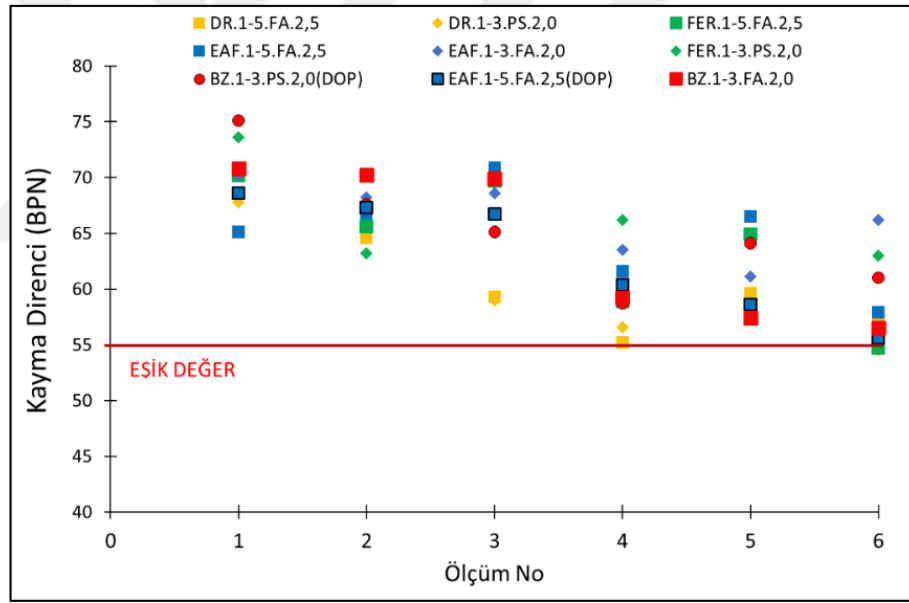
AB Aşınma tabakası üzerinde İngiliz pandülü -British Pendulum Tester (BPT)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir (Şekil 4.13).





Şekil 4.13. AB aşınma tabakası BPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.13 incelendiğinde, AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde BPT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 60-80 (BPN) arasında, son ölçümlerinin de 55-70 (BPN) arasında değiştiği görülecektir.

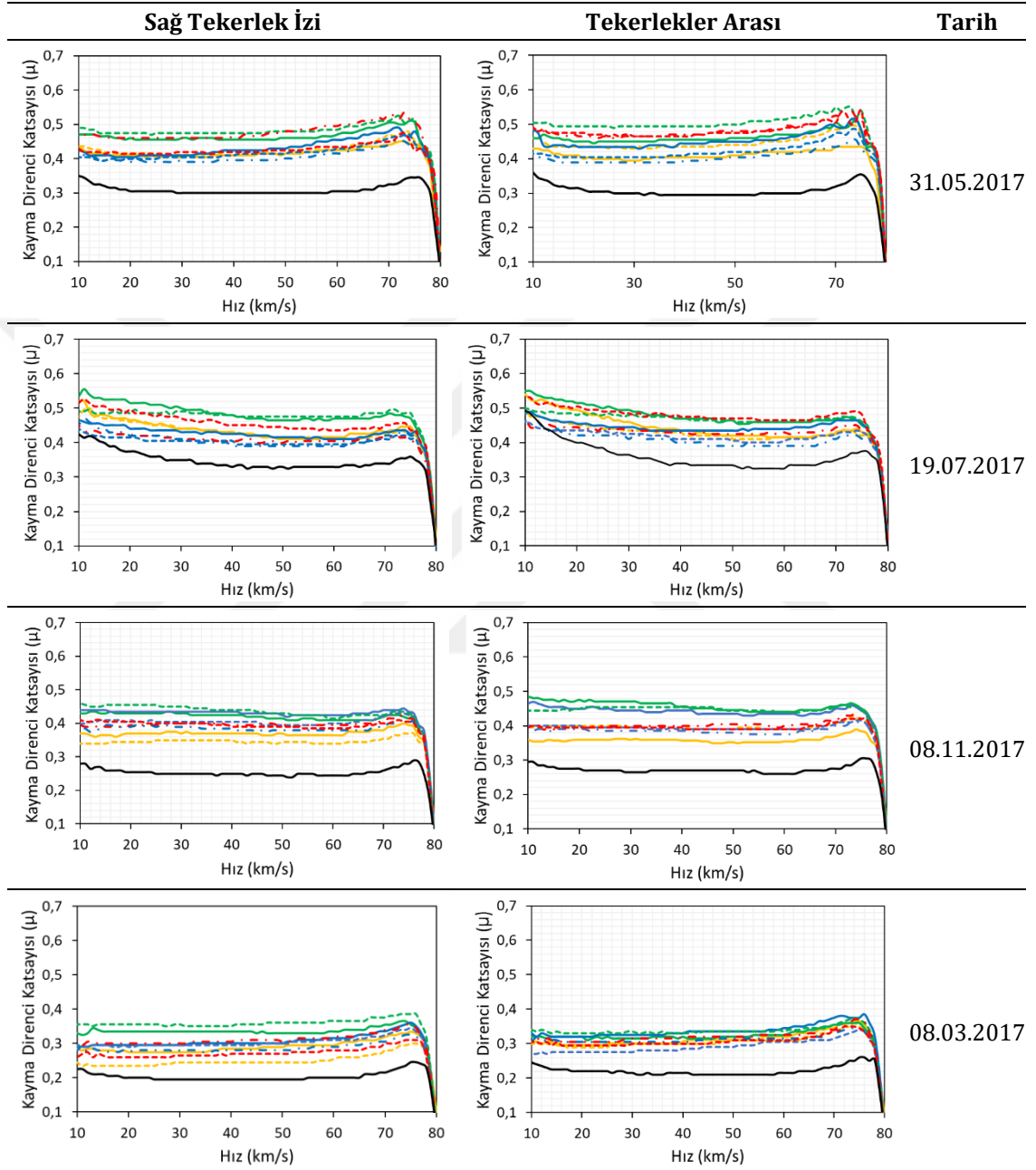


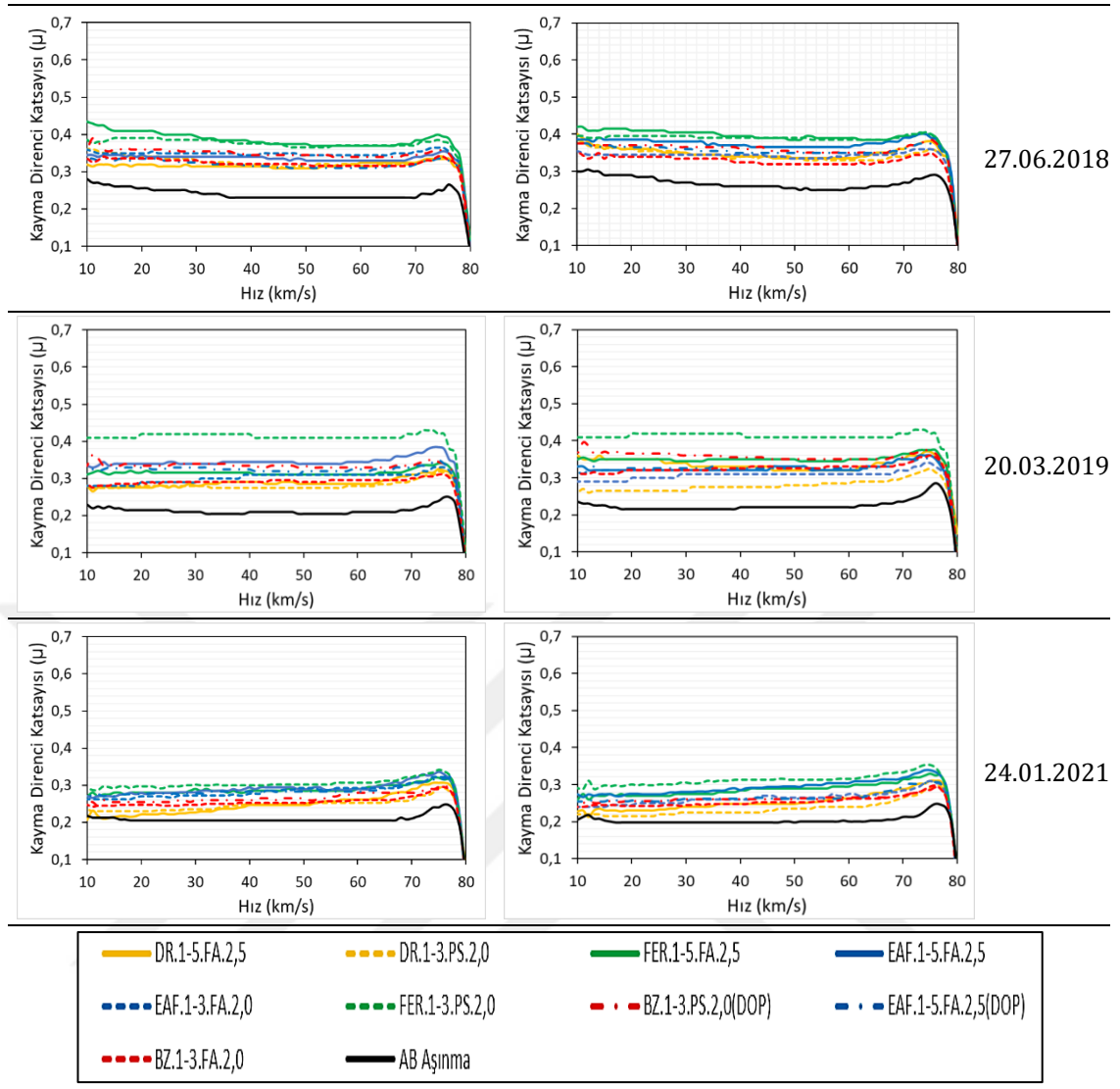
Şekil 4.14. Eşik değeri altında toplu BPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.14' te verilen toplu BPT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin kabul edilen 55 (BPN) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

4.2.2. Dinamik sürtünme ölçer ile yapılan ölçümler

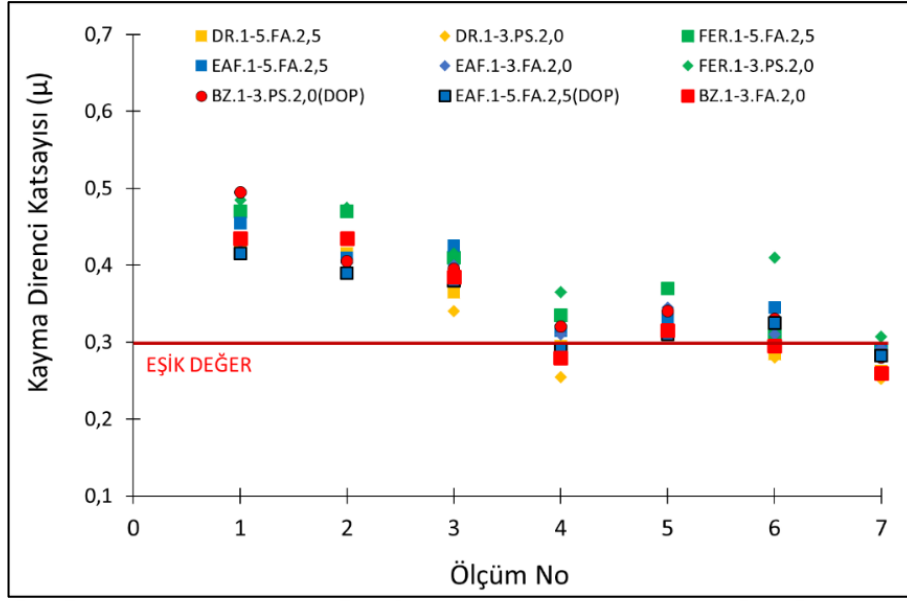
Aşınma tabakası üzerinde dinamik sürtünme ölçer –Dynamic Friction Tester (DFT)- ile yapılan ölçüm sonuçları bu bölümde paylaşılmıştır (Şekil 4.15).





Şekil 4.15. AB aşınma tabakası DFT ölçüm sonuçları

Şekil 4.15 incelendiğinde, AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde DFT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 0,4-0,5 (μ) arasında, son ölçümlerinin de 0,25-0,3 (μ) arasında değiştiği görülecektir.

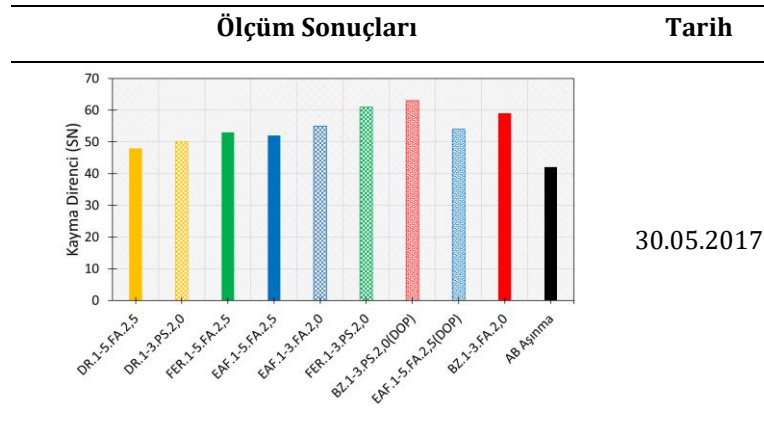


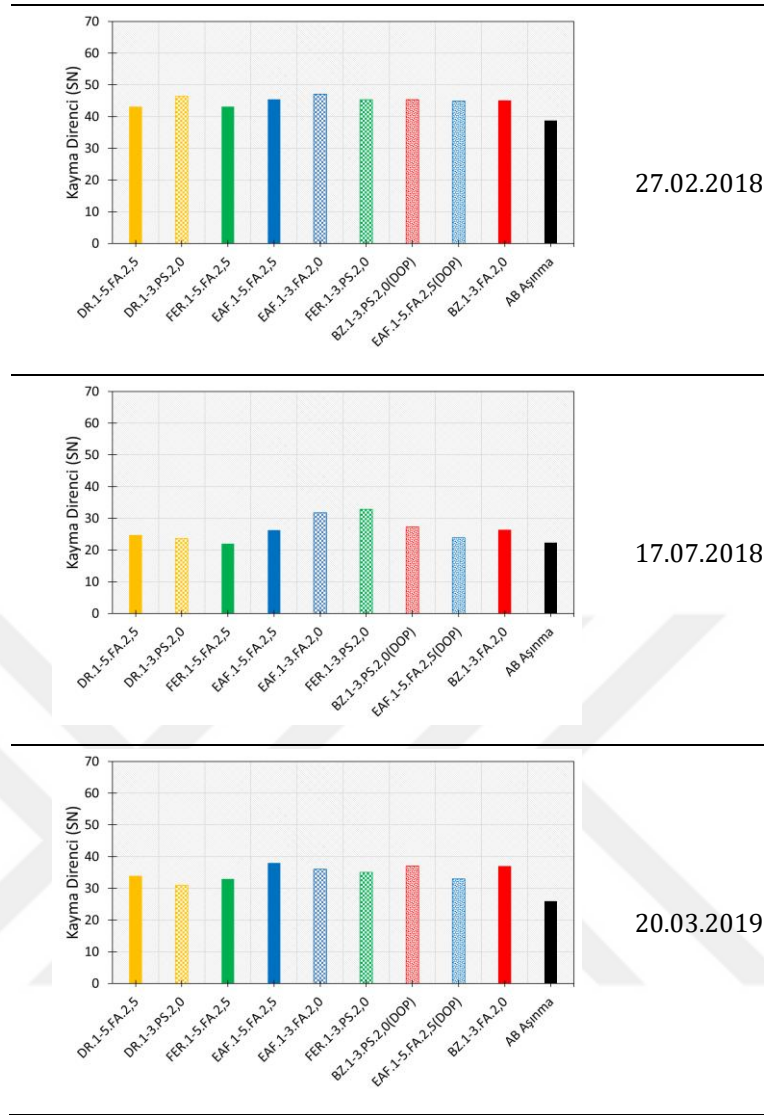
Şekil 4.16. Eşik değeri altında toplu DFT ölçüm sonuçları

Şekil 4.16' da verilen toplu DFT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin son ölçümlerinde FER.1-3.PS.2,0 kodlu uygulama haricinde kabul edilen 0,3 (μ) eşik değeri altında kaldığı görülecektir.

4.2.3. Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı ile yapılan ölçümler

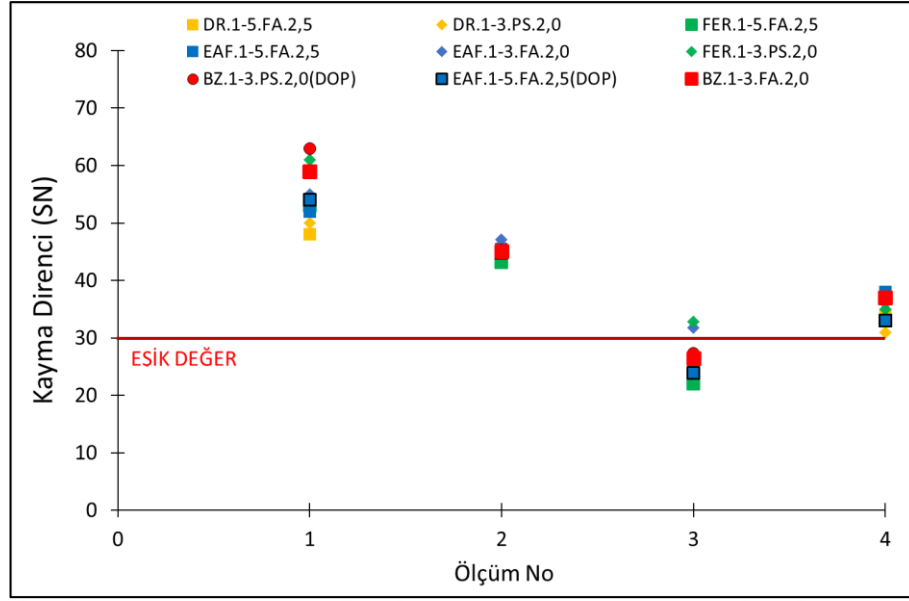
Aşınma tabakası üzerinde Kilitlenen tekerlek kayma direnci aracı –Locked-Wheel Skid Resistance Tester (LWSRT) ile yapılan ölçüm sonuçları Şekil 4.17' de verilmiştir.





Şekil 4.17. AB aşınma tabakası LWSRT ölçüm sonuçları

Şekil 4.17 incelendiğinde, AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde LWSRT testi ile sağ şerit için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 50-65 (SN) arasında, son ölçümlerinin de 30-40 (SN) arasında değiştiği görülecektir.

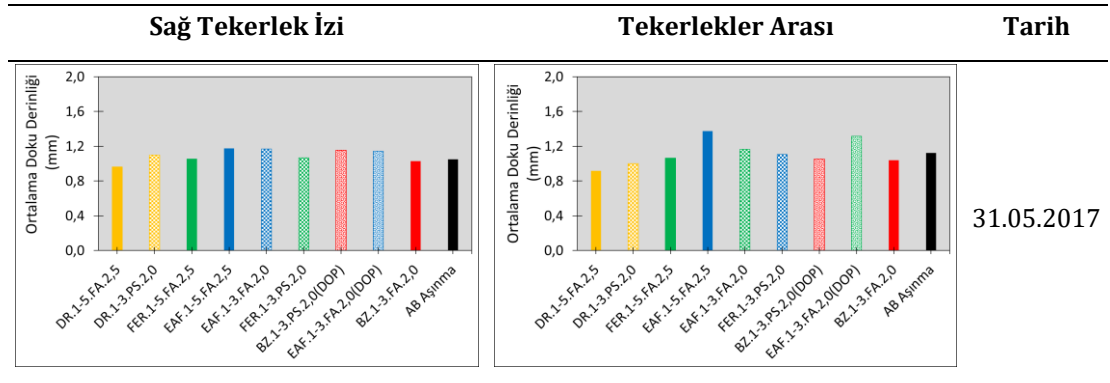


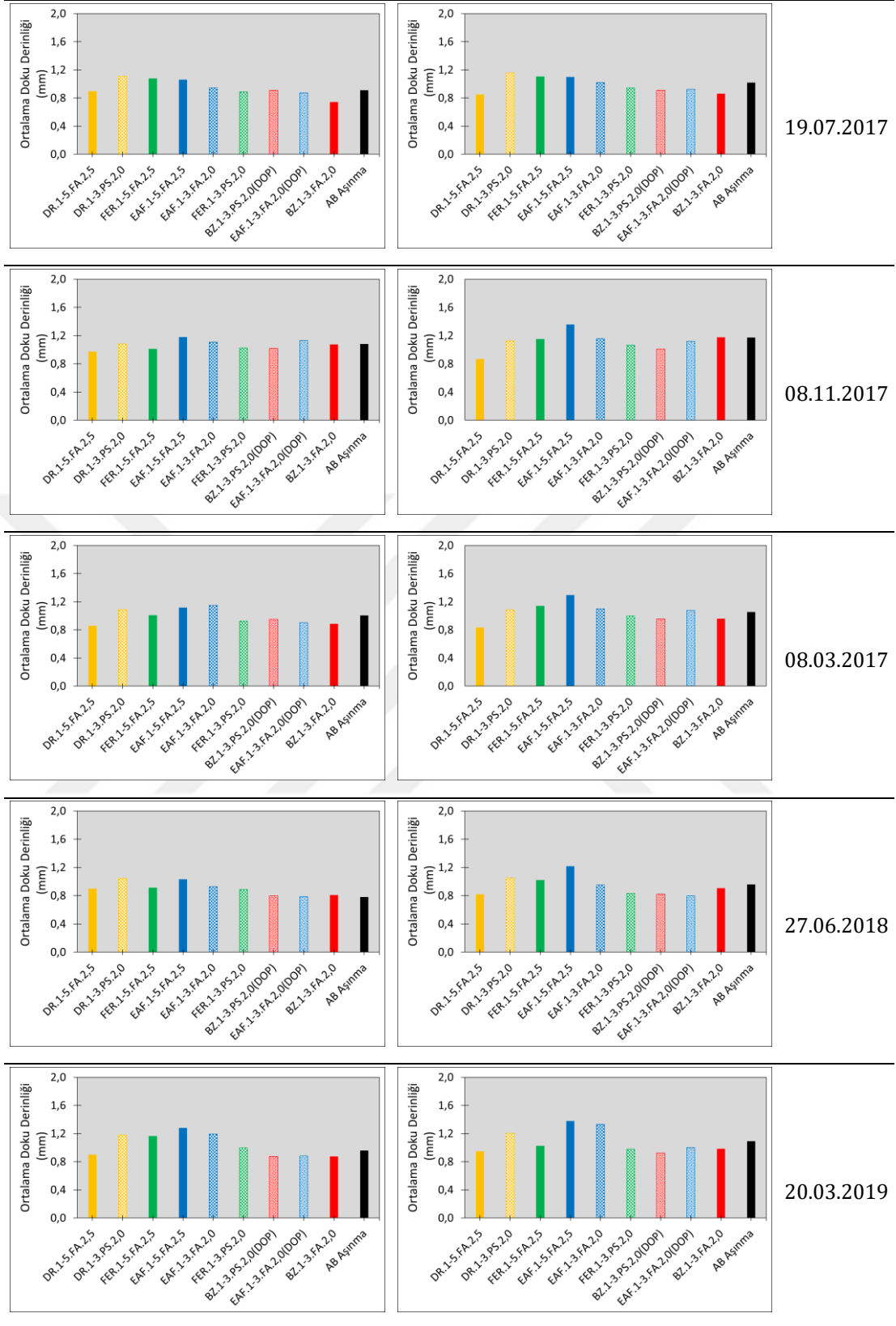
Şekil 4.18. Eşik değeri altında toplu LWSRT ölçüm sonuçları

Şekil 4.18’ de verilen toplu LWSRT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamalarının kayma direnci değerlerinin son ölçümlere istinaden kabul edilen 30 (SN) eşik değeri altında kaldığı görülecektir. Ancak, üçüncü ölçümde EAF.1-3.FA.2,0 ve FER.1-3.PS.2,0 kodlu uygulamalar haricinde 30 (SN) eşik değerinin altında ölçülmüştür. Bu durum, mevsimsel koşullar ve cihaz ölçüm prensibi ile ilişkilendirebilir.

4.2.4. Kum-yama ile yapılan ölçümler

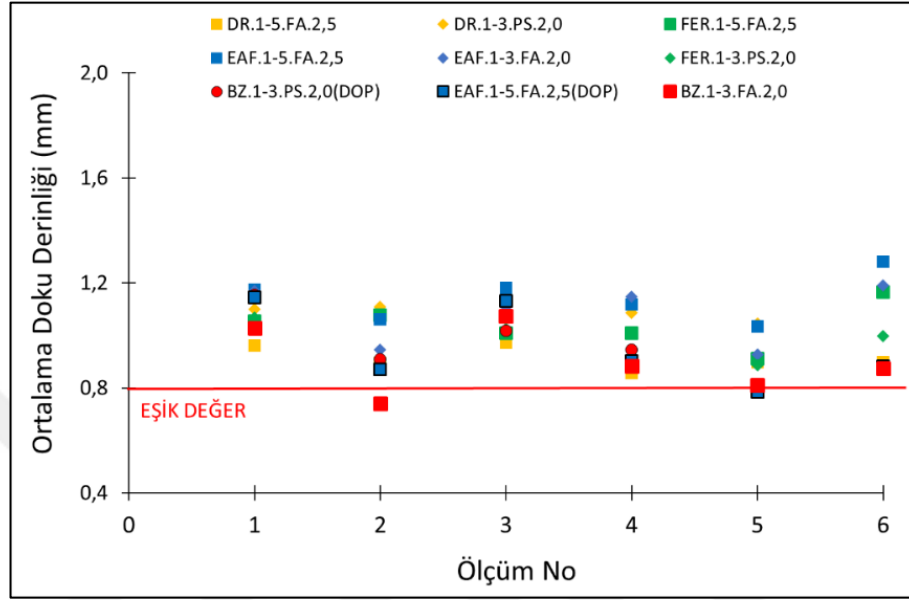
Aşınma tabakası üzerinde Kum-yama –Sand Patch Test (SPT)- ile yapılan ölçüm sonuçları hem sağ tekerlek izi hem de tekerlekler arası için verilmiştir (Şekil 4.19).





Şekil 4.19. AB aşınma tabakası SPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.19 incelendiğinde AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde SPT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 1,0-1,2 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 0,8-1,2 (mm) arasında değiştiği görülecektir.

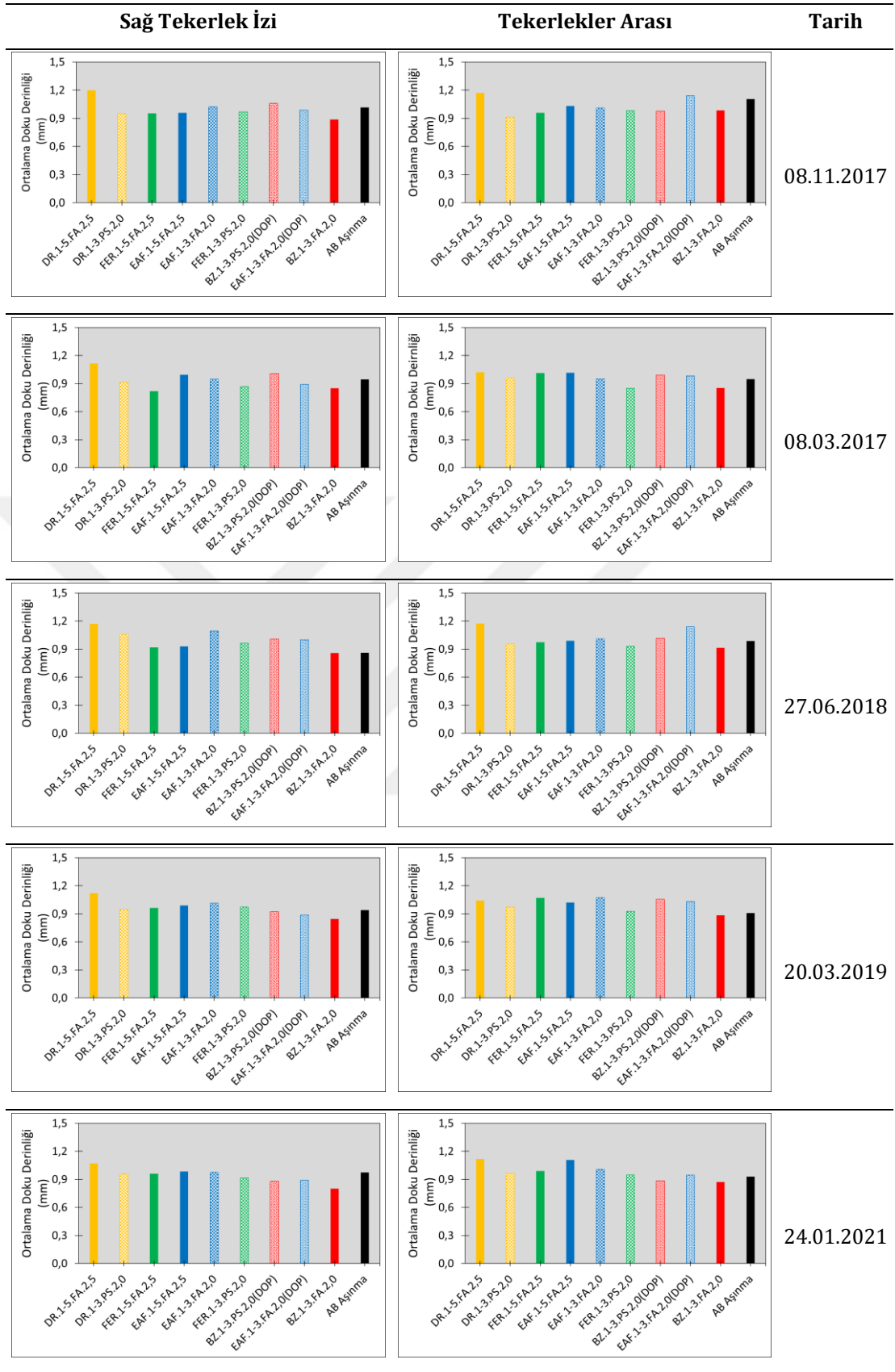


Şekil 4.20. Eşik değeri altında toplu SPT ölçüm sonuçları

Şekil 4.20' de verilen toplu SPT ölçüm sonuçları incelendiğinde, genel anlamda tüm pürüzlendirilmiş uygulamaların ortalama doku derinliği değerlerinin kabul edilen 0,8 (mm) eşik değeri üzerinde kaldığı görülecektir.

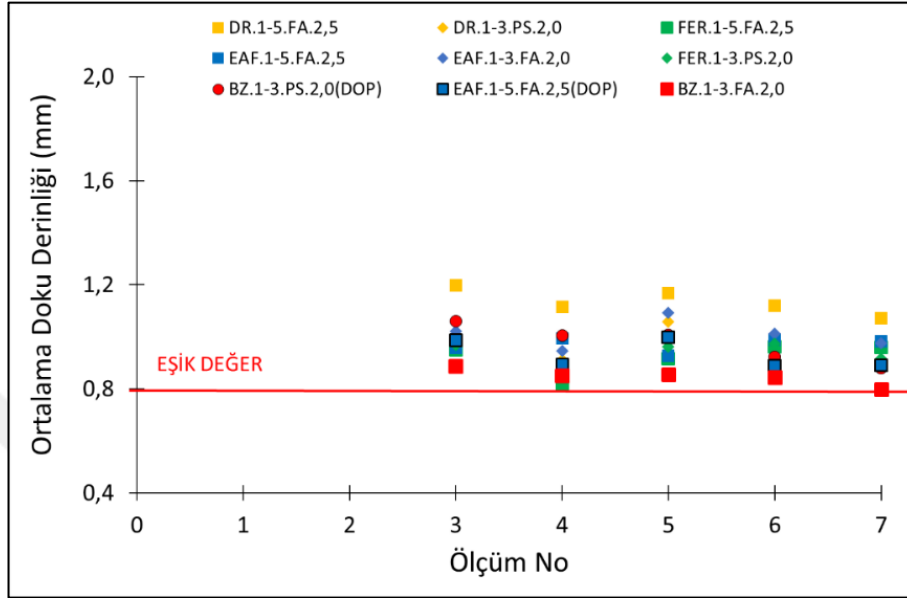
4.2.5. Akış-zaman ölçer ile yapılan ölçümler

Aşınma tabakası üzerinde Akış-zaman ölçer –Hydrotimer (HT)- ile yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir. Cihazın arızası nedeniyle 31.05.2017 ve 19.07.2017 tarihlerinde ölçüm alınamamıştır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. AB aşınma tabakası HT ölçüm sonuçları

Şekil 4.21 incelendiğinde AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde HT testi ile sağ tekerlek izi için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 1,0-1,2 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 0,8-1,0 (mm) arasında değiştiği görülecektir.

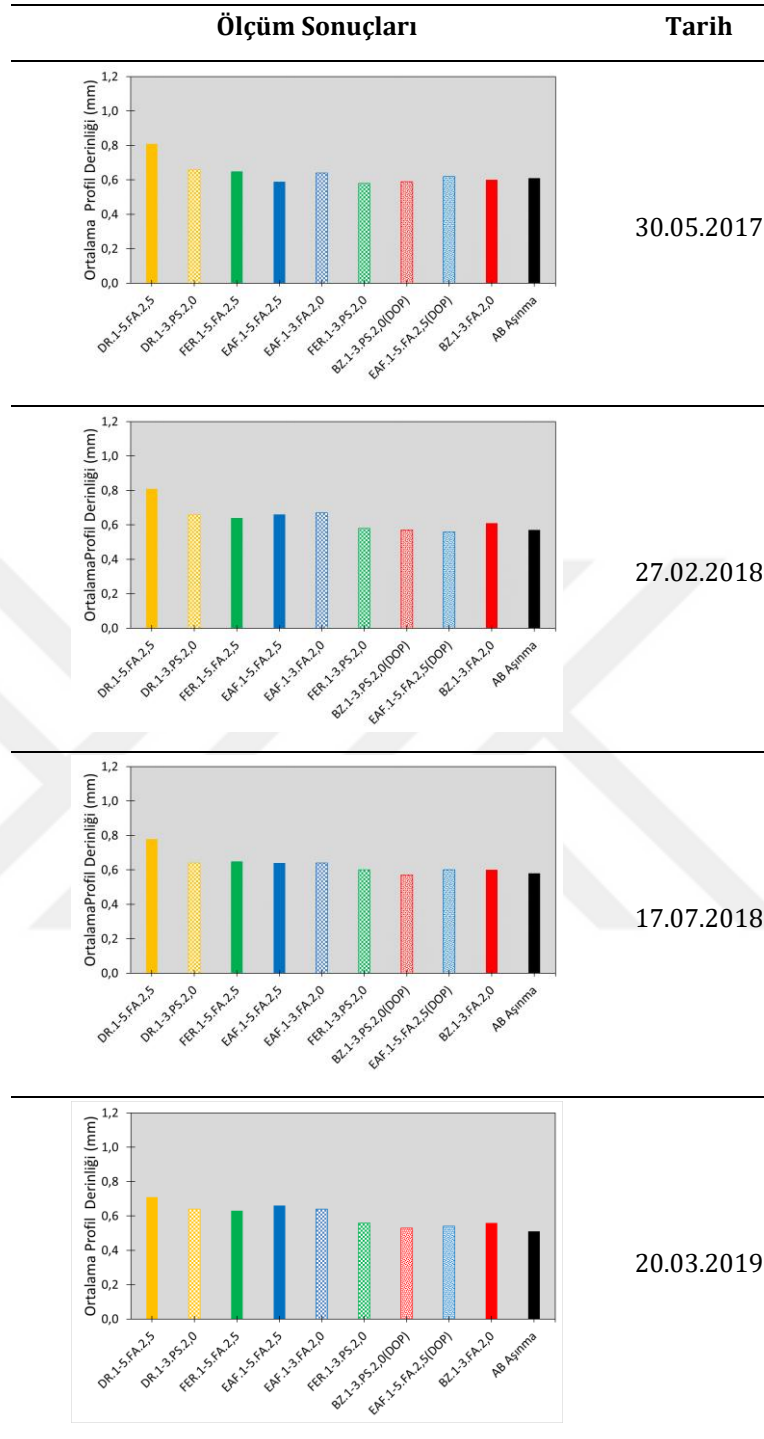


Şekil 4.22. Eşik değeri altında toplu HT ölçüm sonuçları

Şekil 4.22' de verilen toplu HT ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamaların ortalama doku derinliği değerlerinin kabul edilen 0,8 (mm) eşik değeri üstünde kaldığı görülecektir.

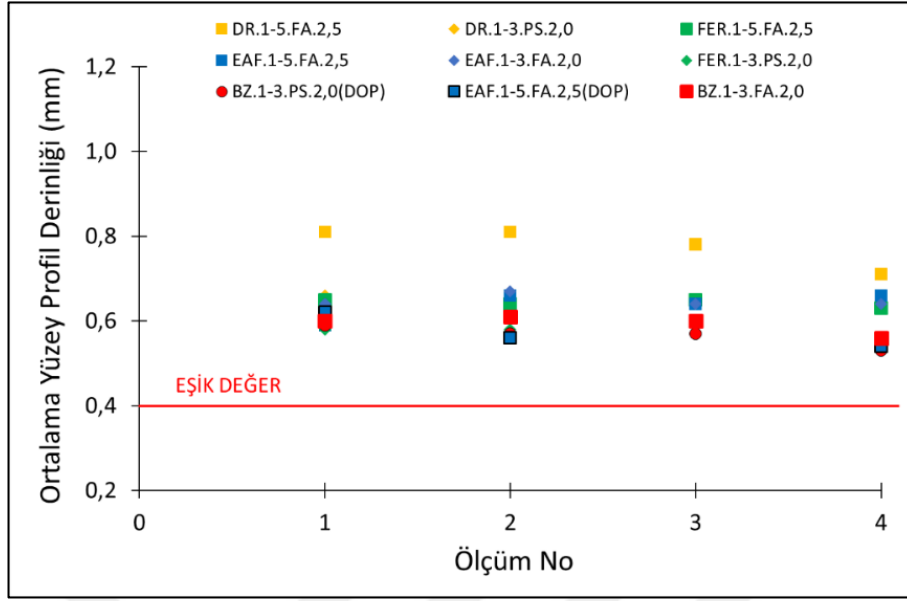
4.2.6. Lazer profilometre ile yapılan ölçümler

Aşınma tabakası üzerinde lazer profilometre –Laser Profilometer (LP)- ile yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.23. AB aşınma tabakası LP ölçüm sonuçları

Şekil 4.23 incelendiğinde AB aşınma tabakasına tatbik edilen pürüzlendirilmiş kesitler üzerinde LP testi ile sağ şerit için elde edilen ilk ölçüm sonuçlarının 0,6-0,8 (mm) arasında, son ölçümlerinin de 0,5-0,7 (mm) arasında değiştiği görülecektir.



Şekil 4.24. Eşik değeri altında toplu LP ölçüm sonuçları

Şekil 4.24’ de verilen toplu LP ölçüm sonuçları incelendiğinde, tüm pürüzlendirilmiş uygulamaların ortalama profil derinliği değerlerinin kabul edilen 0,4 (mm) eşik değeri üstünde kaldığı görülecektir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tezin bu bölümünde bulgular kısmında paylaşılan sağ tekerlek izi üzerinde elde edilen doku ve kayma direnci ölçüm sonuçları bütüncül bir bakış açısıyla incelenmiş ve her bir deneme kesiminden elde edilen ölçümlerin tekrar eden trafik yükleri ile değişimleri ortaya konmuştur. Tekrar eden trafik yükleri her iki deneme yolu için de Eşdeğer Standart Dingil Yüğü (ESDY) olarak ifade edilmiştir. Burada amaç, farklı trafik kompozisyonu ve yüklemelerine sahip farklı üstyapı tipleri için göreceli karşılaştırma yapma olanağı yakalamaktır.

5.1. Trafik Analizleri

Her iki deneme yolu (TMA ve AB aşınma) üzerinde seyreden trafik hacmi ve kompozisyonu birbirinden farklı niteliktedir. Standart bir trafik kavramı ile deneme kesimlerinin performans karşılaştırılmasını yapmak için ölçümler süresince deneme kesimleri üzerinden geçen trafik ESDY türünden tanımlanmıştır.

Her bir yol üzerinden geçen trafiğin ESDY türünden ortaya konması için ölçümlerin yapıldığı yıllara ait trafik verisi Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT) cinsinden KGM' nin web sitesinde (KGM, 2021) yayınlamış olduğu trafik hacim haritalarından elde edilmiştir. KGM web sitesi üzerinden yayınlanan trafik hacim haritalarında YOGT verileri devlet yolu için araç gruplarına göre veriliyorken otoyollar için ise YOGT hafif ve ağır taşıt olarak verilmektedir. Bu tez kapsamında farklı araç gruplarını ESDY tekerrür sayısı cinsinden ifade edebilmek için KGM Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberinde verilmiş olan taşıt eşdeğerlik faktörleri (TEF) kullanılmıştır. Otoyol için YOGT verileri yalnızca hafif ve ağır taşıt cinsinden verildiğinden daha detaylı bir analiz için KGM 5. Bölge Müdürlüğü Otoyol İşletmeler Biriminden alınan gişe verileri kullanılmıştır. 052 otoyoluna ait YOGT verileri Çizelge 5.1' de devlet yoluna (MEST) ait YOGT verileri ise Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.1. 052 otoyolu tek yönlü (Adana-Mersin) YOGT verisi

Yıl	Araç Türü					Toplam
	Otomobil	Orta Yüklü Taşıt	Otobüs	Kamyon	Tır	
2016	9948	985	444	1784	48	13209
2017	10492	1051	412	1642	62	13658
2018	11890	1331	475	2106	70	15872
2019	12120	1400	453	2184	66	16224

Çizelge 5.2. MEST devlet yolu iki yönlü YOGT verisi

Yıl	Araç Türü					Toplam
	Otomobil	Orta Yüklü Taşıt	Otobüs	Kamyon	Tır	
2017	11324	1614	211	1108	825	15082
2018	11523	1937	214	1021	819	15514
2019	11842	1898	209	943	802	15694

Pürüzlendirme uygulamasının yapıldığı yollardan birincisi iki yöndeki şerit sayısı altı (6) olan otoyol, diğer ise iki yöndeki şerit sayısı dört (4) olan devlet yoludur. KGM tarafından yayınlanan karayolları esnek üstyapı projelendirme rehberinde (KGM, 2008) üstyapı projelendirmesinde ağır taşıtların kullanıldığı şerit trafiği esas alınacağı ifade edilmektedir. Bu tez kapsamında da platform ölçümleri ağır taşıt trafiğinin seyrettiği sağ şerit üzerinde yapıldığından hesap şeridindeki trafik hesaplanırken Çizelge 5.3' teki şerit dağıtma faktörleri göz önünde tutulmuştur.

Çizelge 5.3. Şerit dağıtma faktörü

İki yöndeki şerit sayısı	Şerit dağıtma faktörü
2	1,0
4	0,90
6 veya daha fazla	0,80

Çizelge 5.3' te verilen şerit dağıtma faktörleri kullanılarak hafif taşıt ve ağır taşıt trafiğinin sağ şeritte ki dağılımı tayin edilmiştir. Buna göre 052 otoyolu için şerit dağıtma faktörü ağır taşıt için 0,8, hafif taşıtlar için 0,2 olarak ve MEST

güzergâhındaki devlet otoyolu için ise şerit dağıtma faktörü ağır taşıt için 0,9, hafif taşıtlar için ise 0,5 olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, farklı araç gruplarını ESDY tekerrür sayısı cinsinden ifade edebilmek için lodometre çalışmaları ve dingil yükü etütleri sonucunda belirlenen ve Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberinde (KGM, 2008) tanımlanan TEF değerleri kullanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan eş değerlik faktörleri Çizelge 5.4' te verilmiştir. TEF herhangi bir taşıt grubu için sayımı yapılan tüm dingil ağırlıklarının eşdeğerlik faktörleriyle çarpılıp toplamı alındıktan sonra, bu dingil ağırlığının ait olduğu taşıt sayısına bölünmesiyle bulunmaktadır.

Çizelge 5.4. Taşıt eşdeğerlik faktörleri

Taşıt Grubu	Taşıt eşdeğerlik faktörleri
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta yüklü ticari taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

KGM 5. Bölge Müdürlüğüne ait hacim haritalarından elde edilen ve iki yönlü olarak verilen devlet yolu trafiğinin yönsele olarak eşit dağıldığı kabul edilmiş ve yolun ölçüm yapılan istikametindeki trafiğin hesaplanmasında tüm araç sınıfları için değerlerin %50'si alınmıştır. Yukarıda belirtilen esaslar ve paylaşılan trafik verileri dikkate alınarak yapılan hesaplamalar neticesinde her bir deneme yolu için elde edilen yıllık ortalama günlük ESDY değerleri belirlenmiştir. 052 otoyolu için ESDY verileri Çizelge 5.5' te, MEST devlet yolu için ESDY verileri Çizelge 5.6' da verilmiştir.

Çizelge 5.5. 052 otoyoluna ait yıllık ortalama günlük ESDY verisi

Araç Grubu	Araç Sayısı (YOGT)	Şerit Dağıtım Faktörü	TEF	Ortalama Günlük ESDY
Otomobil	9948	0,20	0,0006	1
Orta yüklü ticari taşıt	985	0,20	0,6	118
Otobüs	444	0,80	3,2	1135
Kamyon	1784	0,80	2,9	4139
Tır	48	0,80	4,1	158
2016 Yılı için Günlük Toplam				5552
Otomobil	10492	0,20	0,0006	1
Orta yüklü ticari taşıt	1051	0,20	0,6	126
Otobüs	412	0,80	3,2	1054
Kamyon	1642	0,80	2,9	3809
Tır	62	0,80	4,1	204
2017 Yılı için Günlük Toplam				5194
Otomobil	11890	0,20	0,0006	1
Orta yüklü ticari taşıt	1331	0,20	0,6	160
Otobüs	475	0,80	3,2	1215
Kamyon	2106	0,80	2,9	4886
Tır	70	0,80	4,1	231
2018 Yılı için Günlük Toplam				6493
Otomobil	12120	0,20	0,0006	1
Orta yüklü ticari taşıt	1400	0,20	0,6	168
Otobüs	453	0,80	3,2	1160
Kamyon	2184	0,80	2,9	5066
Tır	66	0,80	4,1	217
2019 Yılı için Günlük Toplam				6613

Çizelge 5.6. MEST devlet yoluna ait yıllık ortalama günlük ESDY verisi

Araç Grubu	%50 Yönsel Dağıtım Araç Sayısı (YOGT)	Şerit Dağıtım Faktörü	TEF	Ortalama Günlük ESDY
Otomobil	5662	0,50	0,0006	2
Orta yüklü ticari taşıt	807	0,50	0,6	242
Otobüs	105,5	0,90	3,2	304
Kamyon	554	0,90	2,9	1446
Tır	412,5	0,90	4,1	1522
2017 Yılı için Günlük Toplam				3516
Otomobil	11523	0,50	0,0006	2
Orta yüklü ticari taşıt	1937	0,50	0,6	291
Otobüs	214	0,90	3,2	308
Kamyon	1021	0,90	2,9	1332
Tır	819	0,90	4,1	1511
2018 Yılı için Günlük Toplam				3444
Otomobil	11842	0,50	0,0006	2
Orta yüklü ticari taşıt	1898	0,50	0,6	285
Otobüs	209	0,90	3,2	301
Kamyon	943	0,90	2,9	1231
Tır	802	0,90	4,1	1480
2019 Yılı için Günlük Toplam				3298

Çizelge 5.5’ de ve Çizelge 5.6’ da sunulan verilere göre hem otoyol hem de devlet yolu üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamasının kaplama yüzey özelliklerine etkisinin araştırıldığı saha ölçümlerinin yapıldığı günlere karşılık gelen toplam ESDY değerleri O52 otoyolu için Çizelge 5.7’ de; MEST güzergahındaki devlet yolu için belirlenen ESDY değerleri Çizelge 5.8’ de verilmiştir. Covid-19 pandemisi nedeniyle sadece ülkemizde değil tüm dünyada ilan edilen kısıtlamalar nedeniyle olağanüstü bir durum oluşmuştur. Yol üzerinde seyreden araçların olağan akışı bu nedenle sekteye uğramıştır. KGM ve KGM 5. Bölge Müdürlüğü üzerinden 2020 yılına ait trafik verilerinin temin edilememiş olmasından dolayı ilgili yıla ait trafik verileri 2019 yılı referans alınarak günlük ortalama toplam ESDY değerleri üzerinden hesaplanmıştır.

Çizelge 5.7. 052 otoyolu için toplam ESDY değerleri

Ölçüm No	Ölçüm Tarihi	İki Ölçüm Arası Hizmet Süresi (Gün)	Toplam Hizmet Süresi (Gün)	Toplam ESDY (10 ³)
Trafiğe Açılış	26.10.2016	0	0	0
1 ^{AMC}	09.11.2016	14	14	78
2 ^{TC}	10.11.2016	15	15	83
3 ^{TC}	15.12.2016	35	50	278
4 ^{AMC}	09.03.2017	120	134	720
5 ^{TC}	16.03.2016	91	141	756
6 ^{TC}	22.05.2017	67	208	1104
7 ^{AMC}	30.05.2017	82	216	1146
8 ^{AMC}	27.09.2017	120	336	1769
9 ^{TC}	09.11.2017	171	379	1992
10 ^{TC+AMC}	28.02.2018	111	490	2645
12 ^{TC}	26.06.2018	118	608	3412
13 ^{AMC}	17.07.2018	139	626	3548
14 ^{TC+AMC}	19.03.2019	266	874	5148
15 ^{TC*}	23.01.2021	676	1550	9618
AMC: Araca monte cihazlar ile yapılan ölçümler TC: Taşınabilir cihazlar ile yapılan ölçümler * Ölçümler DFT ve HT ile yapılmıştır.				

Çizelge 5.7’ de görüldüğü üzere en son 23.01.2021 tarihinde yapılan ölçümlerle birlikte yolun 9,5 milyonu aşkın ESDY’ ye karşılık gelen trafik yüküne maruz kaldığı değerlendirilmiştir. Bu tezin “3.7. Saha Ölçüm Prensibi ve Planı” kısmında da ifade edildiği üzere, LWSRT ve LP cihazları KGM envanterinde yer aldığından ve ulusal iş planları çerçevesinde saha ölçümleri organize edildiğinden diğer ölçüm araçları ile yapılan saha ölçümlerine göre sayıca daha az ölçüm yapılabilmektedir.

Çizelge 5.8. MEST devlet yolu için toplam ESDY değerleri

Ölçüm No	Ölçüm Tarihi	İki Ölçüm Arası Hizmet Süresi (Gün)	Toplam Hizmet Süresi (Gün)	Toplam ESDY (10 ³)
Trafiğe Açılış	11.05.2017	0	0	0
1 ^{AMC}	30.05.2017	19	19	67
2 ^{TC}	31.05.2017	20	20	70
3 ^{TC}	19.07.2017	49	69	243
4 ^{TC}	08.11.2017	112	181	636
5 ^{TC+AMC}	27.02.2018	273	292	1022
6 ^{TC}	08.03.2018	120	301	1053
7 ^{TC}	27.06.2018	111	412	1436
8 ^{AMC}	17.07.2018	140	432	1505
9 ^{TC+ AMC}	20.03.2019	266	678	2340
10 ^{TC*}	24.01.2021	676	1358	4569
AMC: Araca monte cihazlar ile yapılan ölçümler TC: Taşınabilir cihazlar ile yapılan ölçümler * Ölçümler DFT ve HT ile yapılmıştır.				

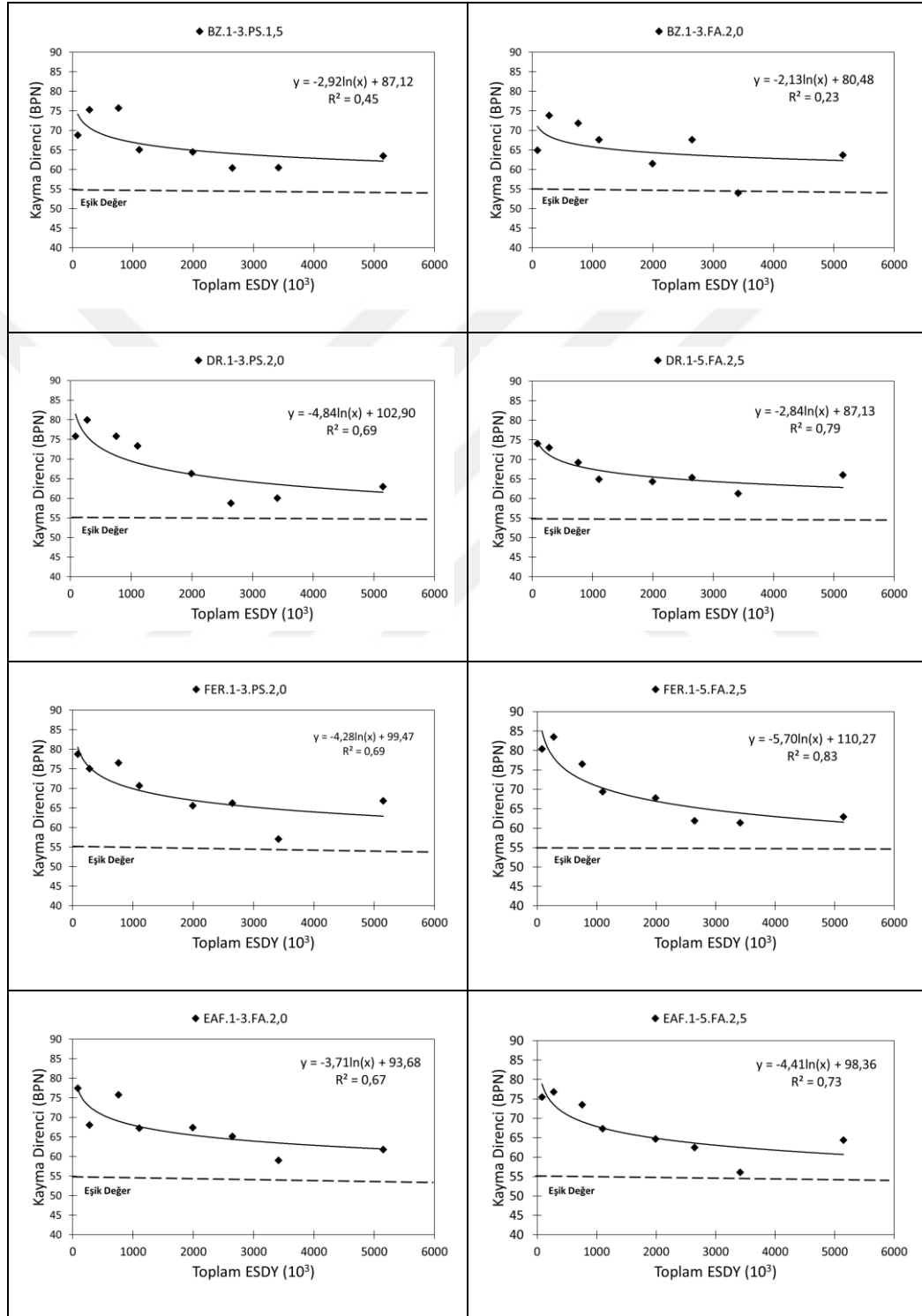
Çizelge 5.8’ de görüldüğü üzere en son 24.01.2021 tarihinde yapılan ölçümlerle birlikte yolun 4,5 milyonu aşkın ESDY’ ye karşılık gelen trafik yüküne maruz kaldığı yolun yüzey özellikleri bu tez kapsamında değerlendirilmiştir. Bu tezin **“3.7. Saha Ölçüm Prensipleri ve Planı”** kısmında da ifade edildiği üzere, LWSRT ve LP cihazları KGM envanterinde yer aldığından ve ulusal iş planları çerçevesinde saha ölçümleri organize edildiğinden diğer ölçüm araçları ile yapılan saha ölçümlerine göre sayıca daha az ölçüm yapılabilmektedir.

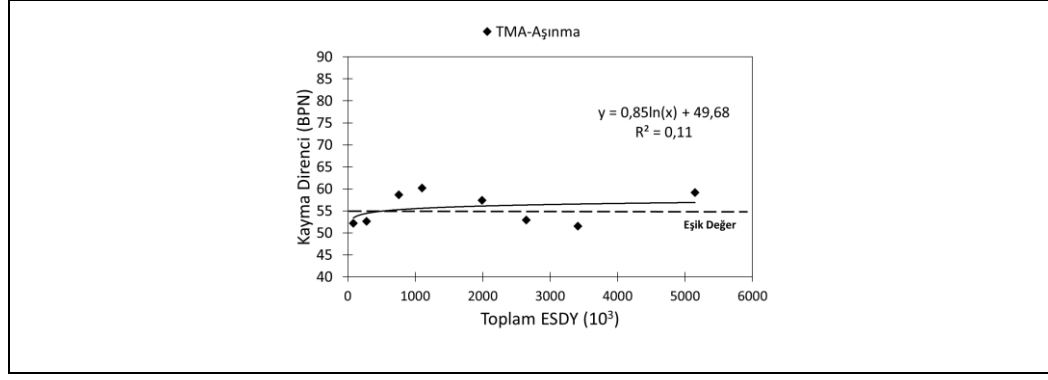
5.2. TMA Aşınma Tabakası Analizleri

Bu bölümde TMA aşınma tabakası üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının yapıldığı kesitler üzerinde toplam ESDY tabanlı analizler yapılmıştır. ESDY tabanlı analizler üzerinden pürüzlendirilmiş kesimlerde uygulanan test sonuçları ile ölçüm tarihi için hesaplanan toplam ESDY değeri arasında logaritmik fonksiyon ile belirlenen ölçüm modellerinden yararlanılarak eşik değere ulaşmak için gereken toplam ESDY değerleri belirlenmiştir.

5.2.1. BPT kayma direnci analizi

Elde edilen BPN ölçüm sonuçları ile ESDY arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler her bir kesim için Şekil 5.1 'de verilmiştir.





Şekil 5.1. TMA aşınma üzerinde BPN ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.1’ de TMA aşınma üzerinde her bir kesim için ESDY bağlı BPN kayma direnci değişimini veren grafik serisi incelendiğinde, kayma direnci değerlerinin 90 ile 50 BPN arasında değiştiği görülecektir. ESDY değerinin artışı ile kayma direnci değerleri beklendiği gibi düşmüştür. Ancak bazı kesimlerde ikinci bazı kesimlerde ise üçüncü ölçüm sonuçlarında kısmi artış gözlenmiştir. Bu durum, sıcak kaplama üzerinde serilen pürüzlendirme uygulaması malzemesinin etkisinin yanı sıra sıcak kaplama imalatındaki mastik kısmın parçalanarak agregalarının ortaya çıkması ile de ilişkilendirmek mümkündür. Zira birçok çalışmada (Do vd., 2009; Wang vd., 2013; Wang vd., 2017) bu husus ifade edilmiştir. Ayrıca ölçümlerde kayma direncine mevsimsel faktörlerin etkisi de görülmektedir. Öyle ki ölçüm alınan tarihlerde tarımsal hasat zamanı içerisinde tarlalardan yükünü alan ağır taşıtların yol yüzeyine çamur, toz vb. taşıdığı ayrıca yolun geçtiği kesimin tarımsal bölge olması sebebiyle de çevredeki toz vb. kaynaklı kirlilikten etkilendiği ve kayma direnci ölçümlerinde belirgin bir azalışa neden olduğu gözlenmiştir. Literatürde bu hususu destekleyen çalışmalara rastlanmaktadır (El-Desouky, 2018; Fwa, 2017; Kogbara vd., 2018; Yan vd., 2019). Kayma direncinin tekrar eden trafik yüklemeleri ile olan ilişkilerinin ortaya konmasında önceki çalışmalarda sıkça logaritmik fonksiyonlarla ifade edilmiştir. ESDY ve BPN arasındaki ölçüm modeli katsayıları pürüzlendirilmiş kesimler için (R^2) 0,22 ile 0,83 arasında değişmekte iken TMA aşınma için 0,11 olarak bulunmuştur. Ancak, ölçüm modeli katsayılarının çoğunluğu 0,65 ve üzerindedir. Düşük ölçüm modeli katsayı değerlerinin ölçümsel hatalardan, operatörden ve çevresel koşullardan etkilendiği düşünülmektedir.

Bu tezin “2.4.5. *Kaplama kayma direncinde eşik değerler*” bölümünde BPN ölçümleri için eşik değer olarak hem TS EN standardından hem de TRRL tarafından önerilen 55 BPN (BPN₅₅) değeri kabul edilmiştir. ESDY tabanlı BPT ölçüm sonuçlarının analizinde Şekil 5.1’ de verilen grafikler üzerinde belirtilmiş logaritmik denklemler kullanılarak BPN₅₅ değerine karşılık gelen ESDY hesaplanarak pürüzlendirilmiş deneme kesimlerinin ESDY cinsinden ömürleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan tahminler ile ilgili sonuçlar Çizelge 5.9’ da verilmiştir.

Çizelge 5.9. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan BPN tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	BZ.1-3.PS.1,5	$y = -2,92 \ln(x) + 87,12$	0,45	>20
2	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -2,13 \ln(x) + 80,48$	0,23	>20
3	FER.1-3.PS.2,0	$y = -4,28 \ln(x) + 99,47$	0,69	>20
4	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -3,71 \ln(x) + 93,68$	0,67	>20
5	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -4,41 \ln(x) + 98,36$	0,73	18,6
6	FER.1-5.FA.2,5	$y = -5,70 \ln(x) + 110,27$	0,83	16,3
7	DR.1-3.PS.2,0	$y = -4,84 \ln(x) + 102,90$	0,69	19,9
8	DR.1-5.FA.2,5	$y = -2,84 \ln(x) + 87,13$	0,79	>20

Çizelge 5.9’ da verilen ve pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY cinsinden yapılan analiz sonuçlarının, farklı pürüzlendirme uygulamaları için farklı ömür değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Saha ölçüm sonuçlarına istinaden her kesit için tanımlanan ölçüm modeli geçmiş çalışmalar referans alınarak logaritmik eğriler ile tayin edilmiştir. Ölüm modellerinin R² değerleri 0,23 ile 0,83 gibi geniş bir aralıkta değişmektedir. Bu uygulama kesimleri için BPN₅₅ eşik değerine karşılık hesaplanan ESDY değerlerinin çoğunlukla 20 milyonu aştığı, ancak 16 ile 20 milyon arasında değiştiği tahmin edilmiştir.

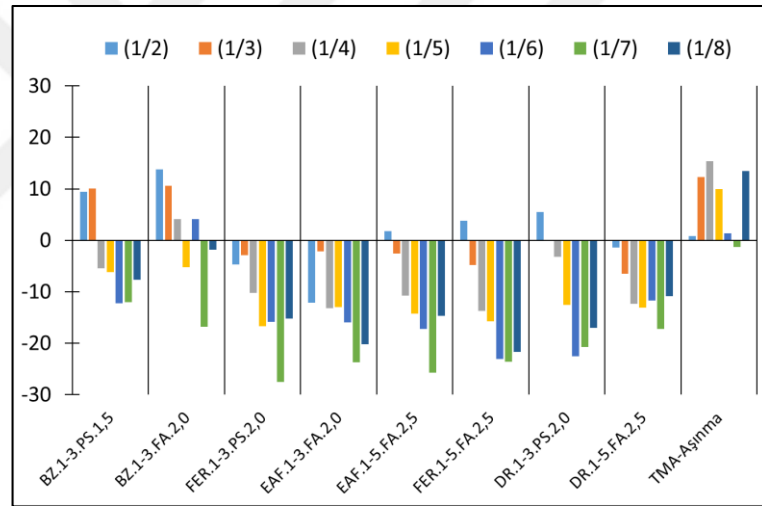
İlk ölçüm sonuçlarına kıyasla diğer ölçüm sonuçlarında nasıl bir değişim olduğu incelemek ve KTŞ’ de tanımlanan ve sahada uygulanan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu deneme kesimine göre diğer alternatif uygulamalar arasında farkın her ölçüm için analizi yapılmış ve analiz hesaplamalarında 3 nolu denklem kullanılmıştır.

$$D (\%) = ((S_i - S_R) / S_R) \times 100 \quad (3)$$

Burada,

D (%): Değişim oranı, S_i : Ölçümlerden alınan ölçüm sonuçları, S_R : Referans alınan ölçüm sonucu ifade etmektedir.

Saha çalışmalarında BPT ile toplamda sekiz defa kullanılmıştır. İlk saha ölçümü kaplama inşası ve pürüzlendirme uygulaması yapıldıktan yaklaşık iki hafta sonra yapılmıştır. Her bir kesim için belirlenen ilk ölçüm sonuçları referans alınarak diğer ölçümler sonuçlarının ilk ölçümüne göre nasıl değiştiği **“Değişim Oranı Analizi”** ile 3 numaralı denklem kullanılarak yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 5.2’ de verilmiştir.

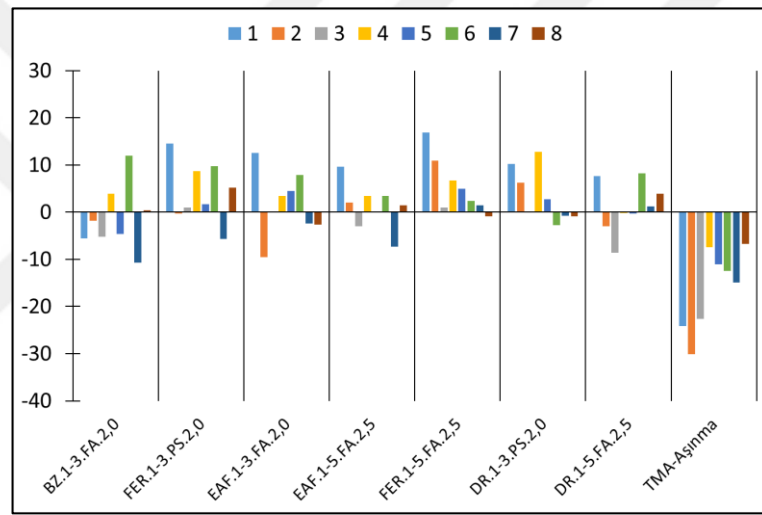


Şekil 5.2. İlk ölçüm sonuçlarına göre BPN değişim oranı

Şekil 5.2’ de hesaplanan değişim oranlarını incelemekten şunu ifade etmek gerekir ki tabloda pozitif değerlerin işaret ettiği ölçüm sonuçları ilk ölçüm sonucuna kıyasla diğer ölçümlerin daha yüksek olduğunu göstermektedir. İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplandığı değerlerde her bir kesimin ölçüm sonuçlarının artış ve azalışlarında düzenli bir eğilim görülmemektedir. Pürüzlendirilmiş kesimler için ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde, BZ.1-3.FA.2,0 kodlu deneme kesiminde yaklaşık %2 ile en az, FER.1-5.FA.2,5 kodlu denem kesiminde ise %20 ile en fazla olduğu

görülmektedir. TMA aşınma tabakasında için sonuçlarında ise yedinci ölçüm hariç ilk ilk ölçüme göre %15' e kadar çıkan daha pozitif değerler bulunmuştur.

BZ.1-3.PS.1,5 kodlu deneme kesimi, KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış kesimidir. Alternatif olarak bu tez kapsamında farklı agrega parametreleri ile denen uygulamaların kayma direnci performansı BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesim performansı ile karşılaştırmak amacıyla fark analizi yapılmıştır. Bu analizde de çözüm için 3 numaralı denklem sahada uygulanan alternatiflerin performansını her ölçüm için kendi içerisinde BZ.1-3.PS.1,5 kesimine ait performansa göre kıyaslaması yapılmıştır (Şekil 5.3).

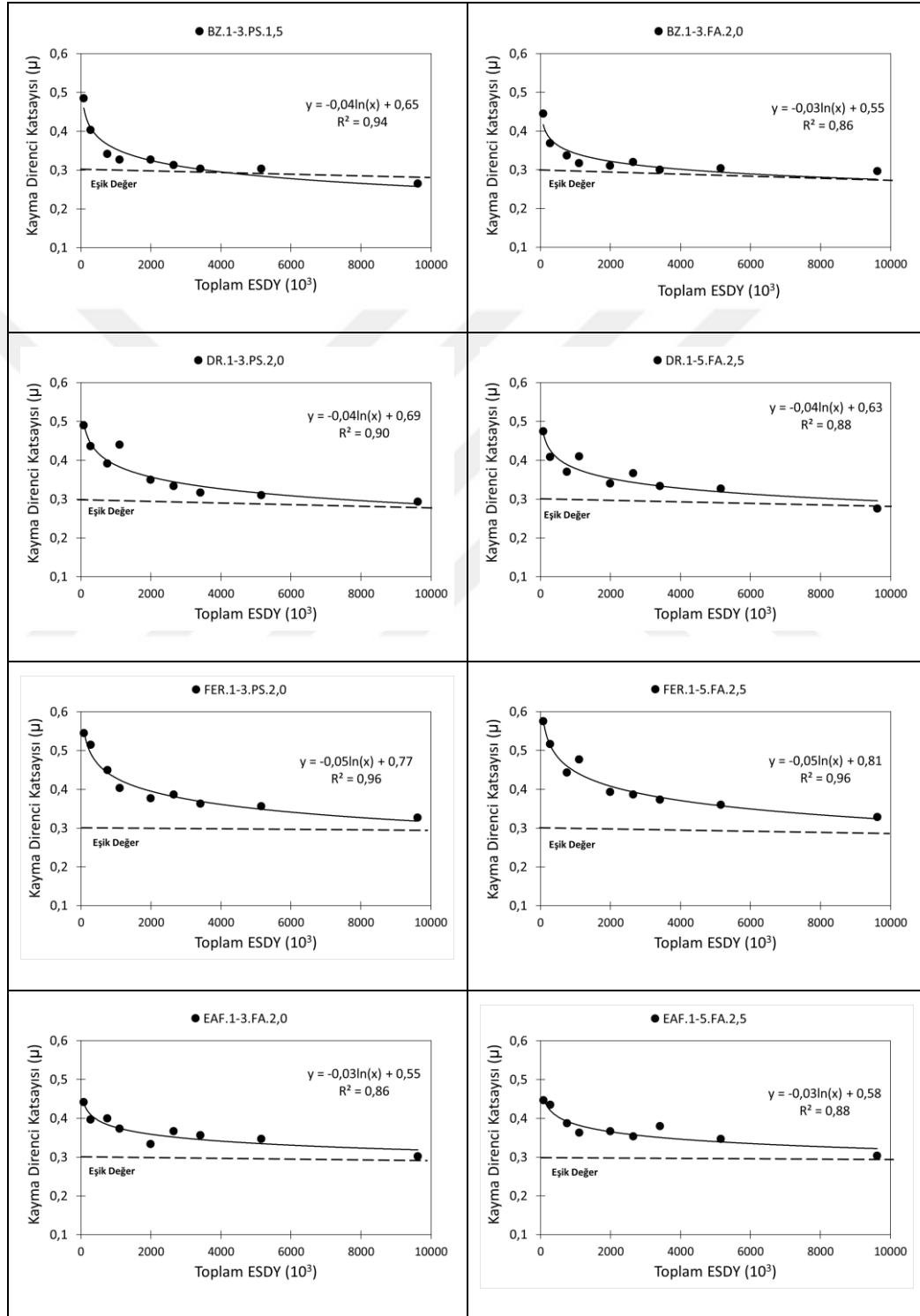


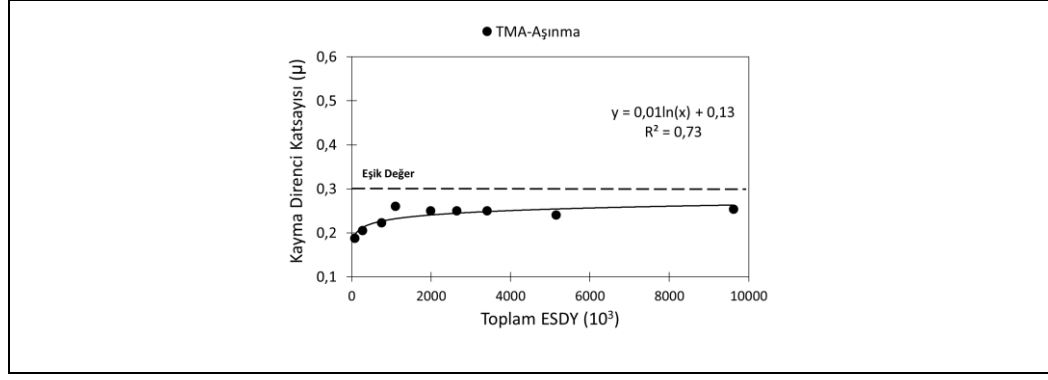
Şekil 5.3. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki BPN fark

Şekil 5.3' te verilen analiz sonuçları her ölçüm için ayrı ayrı yapılmış olup KTŞ' de tanımlanan uygulamanın performansı ile buna alternatif olarak araştırılan uygulamaların performansı arasındaki farkı ortaya koymaktadır. Pozitif farkların olduğu ölçüm tarihlerinde ilgili alternatif kesimlerin BPN tabanlı kayma direnci performansı KTŞ' de tanımlanan uygulamanın performansına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Hesaplanan değerlerin geneli incelendiğinde çoğunlukla pozitif değerlerin olduğu görülecektir. Ancak, KTŞ' de tanımlanan uygulama BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesimin üstün olduğunu gösteren negatif değerlerde mevcuttur. TMA aşınma kayma direnci performansının KTŞ' de tanımlanan şartlara göre sahada uygulaması yapılan pürüzlendirilmiş kesime göre %30'u aşkın bulunan değerlerde daha düşük olduğu belirlenmiştir.

5.2.2. DFT kayma direnci analizi

Elde edilen 60 km/s hızında alınan DFT ölçüm sonuçları ile ESDY arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler her bir kesim için Şekil 5.4 'te verilmiştir.





Şekil 5.4. TMA aşınma üzerinde μ ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.4' te verilen grafikler incelendiğinde pürüzlendirilmiş kesimlere ait DFT kayma direnci kat sayısı (μ) değerlerinin artan ESDY ile birlikte 0,6 değerlerinden 0,3' e kadar düştüğü görülecektir. Ancak TMA aşınma tabakasının ise 0,2 ile 0,3 arasında değiştiği görülmüştür. Grafiklerden deneme kesimlerde farklı zaman dilimine tekabül eden ölçüm verilerinde artış görülecektir. Bu durum, sıcak kaplama üzerinde serilen pürüzlendirme uygulaması malzemesinin etkisinin yanı sıra sıcak kaplama imalatındaki bitümün soyularak agregalarının ortaya çıkması ile de ilişkilendirilebilir (Rado ve Kane, 2014). Ayrıca, DFT cihazının çalışma prensibinden kaynaklı olarak BPT ölçümlerinde olduğu gibi kayma direncine mevsimsel faktörlerin etkisi kısmen görülmektedir (Chu vd., 2019). ESDY ve DFT arasındaki ilişki ortaya koyan ölçüm modeli katsayıları pürüzlendirilmiş kesimler için 0,86-0,96 arasında değişmekte iken TMA-aşınma için 0,73 olarak bulunmuştur.

Yol yüzeyinin kayma direnci güvenliğini temin etmekte kullanılan eşik değerler farklı çalışmalardan ve ülke şartnamelerden derlenmiş ve bu tezin "**2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler**" kısmında açıklanmıştır. İlgili kısımda DFT ile elde edilen kayma direnci katsayısının eşik değerinin farklı yol kesimleri yolda izin verilen hız limitine göre değişkenlik gösteriyor olsa da hem önceki çalışmalar hem ulaştırma daireleri tarafından önerilen eşik değer in çoğunlukla 0,30 olduğu görülmektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak ESDY tabanlı ömür tahmin analizinde eşik değer olarak 0,30 ($DFT_{0,30}$) kullanılmıştır. Şekil 5.4' deki grafikler üzerinde verilen logaritmik denklemler kullanılarak $DFT_{0,30}$ değerine karşılık gelen ESDY hesaplanmıştır (Çizelge 5.10).

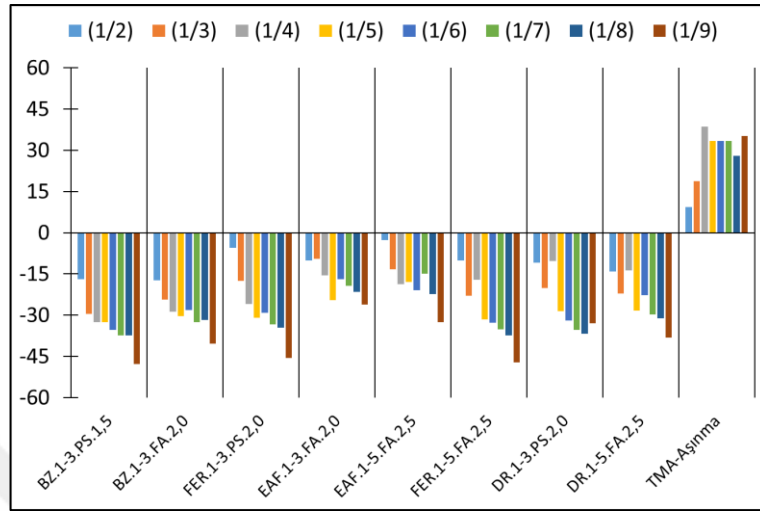
Çizelge 5.10. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan μ tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm ModeliS	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	BZ.1-3.PS.1,5	$y = -0,04 \ln(x) + 0,65$	0,94	6,3
2	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,03 \ln(x) + 0,55$	0,86	4,2
3	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,05 \ln(x) + 0,77$	0,96	12,1
4	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,03 \ln(x) + 0,55$	0,86	4,2
5	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -0,03 \ln(x) + 0,58$	0,88	11,3
6	FER.1-5.FA.2,5	$y = -0,05 \ln(x) + 0,81$	0,96	>20,0
7	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,04 \ln(x) + 0,69$	0,90	17,5
8	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,04 \ln(x) + 0,63$	0,88	3,8

Çizelge 5.10' da verilen DFT tabanlı ESDY ömür analizi sonuçları DFT kayma direnci kat sayısı (μ) ile ESDY arasındaki ölçüm modeli katsayılarının 0,88 ile 0,96 gibi yüksek değerleri değerlerde olduğunu ve ESDY tabanlı tahmin edilen ömrün her bir uygulamanın için farklı olduğunu göstermektedir. Doğal agregalar ile yapılan pürüzlendirme uygulamalarından olan BZ.1-3.PS.1,5 ve BZ.1-3.FA.2,0 kesimleri tahmin edilen ESDY değerleri sırasıyla 6,3 ile 4,2 milyon olarak bulunmuştur. DR.1-3.PS.2,0 ve DR.1-5.FA.2,5 kesimleri için ise hesaplanan ESDY değerleri sırasıyla 17,5 ve 3,8 milyondur. Buna göre doğal agregalar ile 1-3 mm boyutunda 1.Pas sonrasında yapılan uygulamaların daha yüksek ESDY ömrüne sahip olduğu görülmektedir. FER ve EAF cürufı ile üretilen kesimlerde 1-5 mm boyutunda agregaların finişer arkasında yapılan pürüzlendirme uygulamalarının ESDY ömrü, 1-3 mm FER için 1. pas EAF için finişer arkasın uygulamalarına kıyasla daha yüksektir. Yanı sıra EAF cürufunun kullanıldığı ve finişer arkası 1-3 mm malzeme ile yapılan pürüzlendirme FER cürufunun kullanıldığı 1. pas sonrası 1-3 mm malzeme ile yapılan kesiminkinden daha yüksek ESDY ömrüne sahiptir. Bu durum malzeme uygulama zamanının ve kullanılan malzemenin karakteristik özelliklerinin önemli olduğunu göstermektedir.

Saha çalışmalarında DFT ile yapılan ölçüm sayısı toplamda 23.01.2021 tarihinde yapılan son ölçüm ile BPT' den farklı olarak birlikte dokuz adettir. BPT ölçüm sonuçları için yapılan ve ilk ölçüme göre her kesim için meydana gelen değişimi

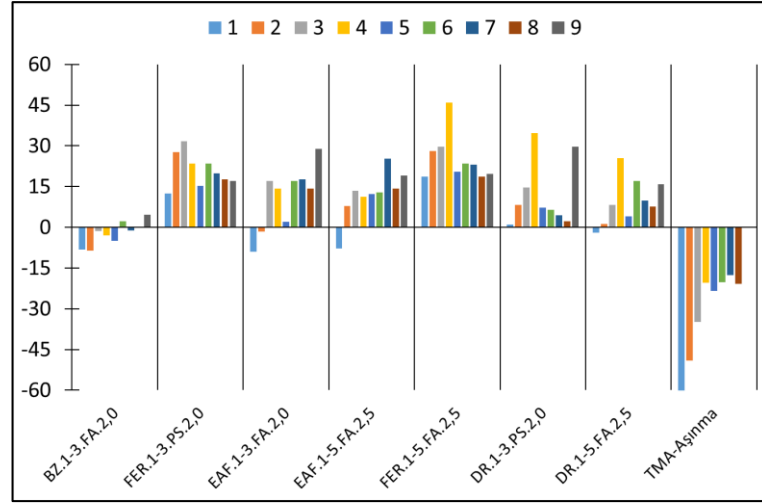
ortaya koyan analiz DFT ölçüm sonuçları içinde uygulanmış olup ilgili analize dair sonuçlar Şekil 5.5' te verilmiştir.



Şekil 5.5. İlk ölçüm sonuçlarına göre DFT değişim oranı

Şekil 5.5' te pürüzlendirilmiş kesimlerde ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının her bir kesim için düzenli bir azalış eğilimi görülmemektedir. İlk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde değişim oranının BZ.1-3.PS.1,5 kodlu deneme kesiminde yaklaşık % 50 ile en yüksek KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasını temsil eden EAF.1-3.FA.2,0 kodlu deneme kesiminde ise % 25 ile en az olduğu görülecektir. TMA aşınma tabakasında ise ilk ölçüme göre diğer ölçüm sonuçlarının daha yüksek olduğu ve değişim oranının %40' a kadar çıktığı belirlenmiştir.

KTŞ' de tanımlanan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesimin kayma direnci performansını diğer alternatif uygulamaların performansı ile karşılaştırmak amacıyla BPN tabanlı yapılan fark analizlerinde olduğu gibi DFT tabanlı sonuçlar içinde aynı esaslar takip edilerek yapılmış, hesaplanan değerlerden oluşturulan grafik Şekil 5.6' da verilmiştir.

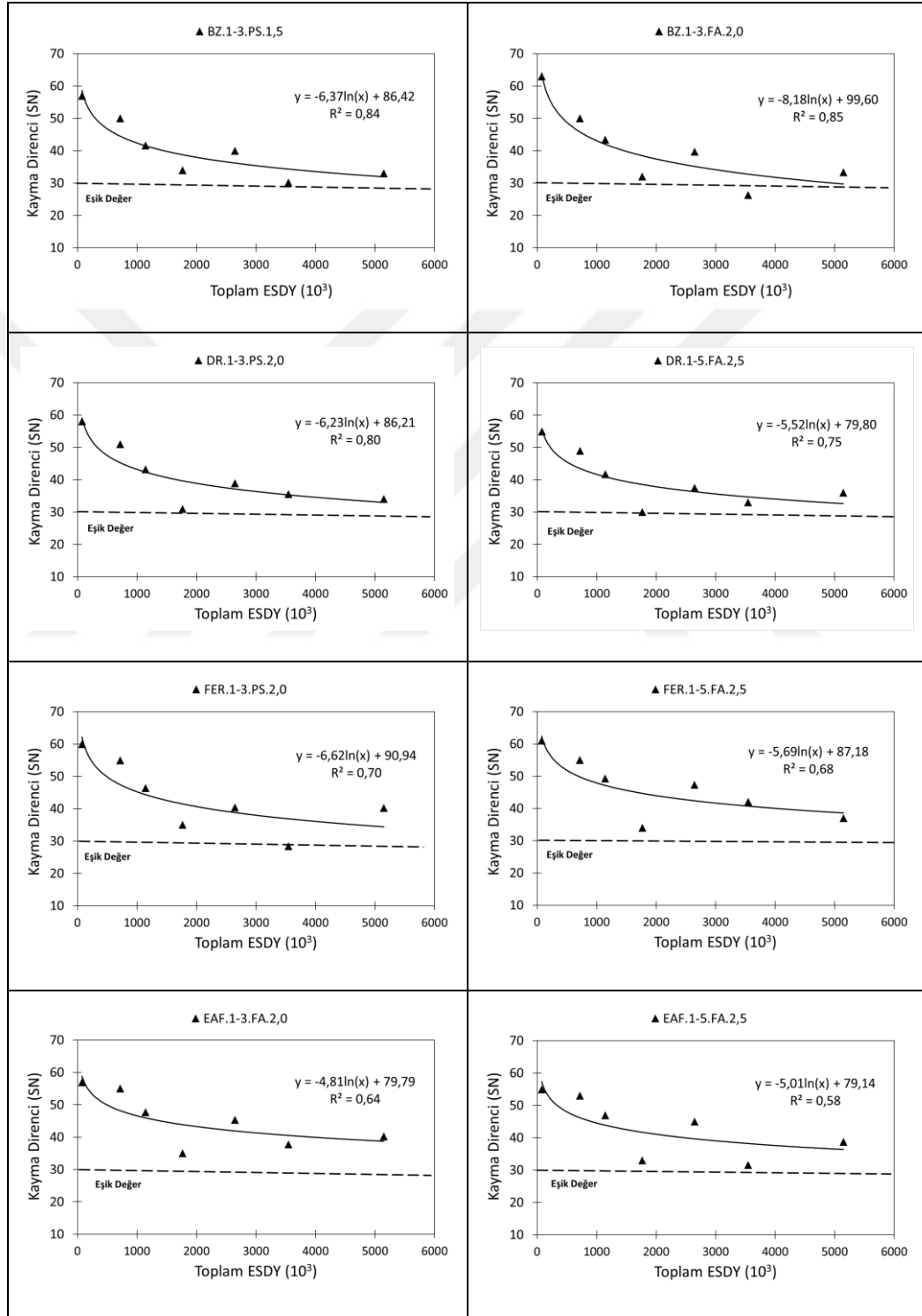


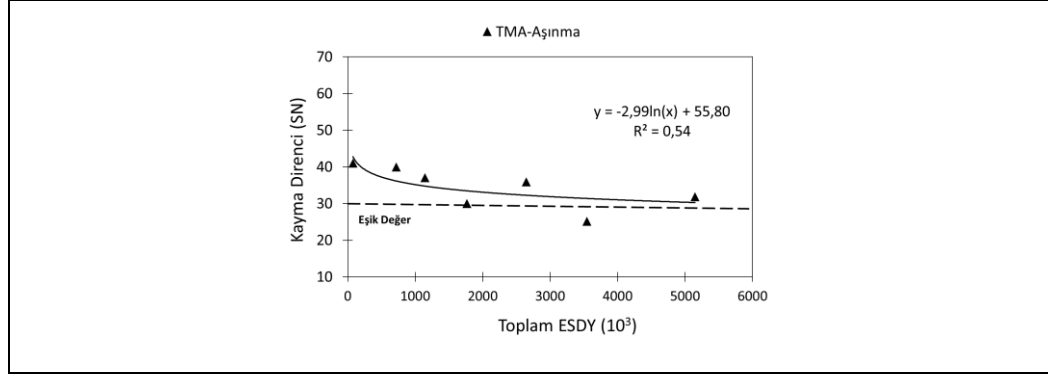
Şekil 5.6. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki fark

Şekil 5.6' da verilen analiz sonuçlardan hesaplanan değerlerin neredeyse tümünün pozitif değerler olduğu görülecektir. Bu da alternatif uygulamaların KTŞ' de tanımlanan uygulamaya oranla daha yüksek performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. EAF cürufu tabanlı uygulamalarının ilk ölçümlerde KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre düşük performans göstermiş olsa da sonraki ölçümler EAF ilişkili uygulamaların kayma direnci açısından daha iyi olduğu ortaya koymuştur. FER cürufu tabanlı uygulamalar ise tüm uygulamalar içinde en iyi performansı göstermiştir. Son iki ölçüm hariç, KTŞ' de tanımlı agrega türü olan bazalt ile Finişer arkası yapılan uygulamanın KTŞ' de tanımlı pürüzlendirme uygulamasına kıyasla daha düşük kayma direnci performansı göstermiştir. Genel anlamda KTŞ' de tanımlı uygulama ile alternatifler arasında en yüksek fark FER.1-5.FA.2,5 kodlu kesimde lehine %45 belirlenmiştir. Son saha ölçümlerinde ise BZ.1-3.PS.1,5'ye göre %30 daha üstün kayma direnci performansı gösteren DR.1-3.PS.2,0 kodu kesim için en yüksek fark bulunmuştur. Kireçtaşı ile inşa edilen TMA aşınma tabakasının kayma direnci performansı KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasına göre %60'ı aşkın oranda daha düşüktür. Bu durum pürüzlendirme uygulamasının kayma direncine olan etkisini ortaya koymaktadır. Aynı zaman da son ölçümlerde BZ.1-3.PS.1,5 kesimi ile TMA aşınma tabakası ölçüm sonuçları arasındaki farkın sıfırlanmış olması ama diğer alternatif uygulamaların BZ.1-3.PS.1,5 kesimine kıyasla hala (%45 ile %30 arasında) yüksek olması alternatiflerin daha iyi sonuçlara doğurduğunu göstermektedir.

5.2.3. LWSRT kayma direnci analizi

ESDY ve LWSRT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi her bir kesim için gösteren grafikleri serisi Şekil 5.7' de verilmiştir.





Şekil 5.7. TMA aşınma üzerinde SN ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.7' de TMA aşınma üzerinde her bir kesim için ESDY bağlı 64 km/s hızı karşılık gelen LWSRT kayma direnci değişimini veren grafikler, pürüzlendirilmiş kesimlere ait kayma direnci (SN) değerlerinin 30 ile 60 arasında değiştiği göstermektedir. Ancak, kireçtaşı ile imal edilen TMA aşınma tabakasında SN değerlerinin 30 ile 40 arasındadır. ESDY değerinin artışı ile kayma direnci değerlerinin. Verilen grafiklerden deneme kesimlerinde farklı zaman dilimine tekabül eden ölçüm verilerinde düzenli bir düşüş görülmektedir. Bu durum nedeni önceki çalışmalarda da dile getirildiği üzere (Bazlamit ve Reza, 2005; Gökalp ve Uz, 2017a; Mccullough ve Hankins, 1966; Schulze vd., 1977). LWSRT aracı ile operatörün ölçüm alınma sırasında karar alma zamanına bağlılığı, yolun herhangi bir yerinde boyuna ölçümlerin yapılması, sürücü koordinasyonu vb. gibi faktörlerin etkisi altında ölçüm prensibinden kaynaklanmasıdır. Diğer neden mevsimsel faktörlerin etkisidir. Otoyolun tarımsal arazileri arasında geçiyor olması, ölçüm zamanında hasat vakti nedeniyle ağır taşıtların tarım arazilerinden çıkarak yola bıraktığı çamur veya hasadı yapılmış ürünleri taşıma sırasında yüklendikleri araçlarda düşerek yol üzerinde bıraktığı kirliliğin ölçüm sonuçları üzerinde etkisinin olduğunu ifade etmek mümkündür. Bir başka deyişle pürüzlendirilmiş kesimlerin kayma direnci performans değerlendirmelerini yapmak için seçilmiş üç farklı metot içerisinde LWSRT' in ölçüm belirsizliğine sahip olduğu söylenebilir. En iyi ölçüm modeli katsayısı (R^2) logaritmik fonksiyonla temin edildiğinden ESDY ve LWSRT ile tüm kesimler elde edilen SN değerleri arasındaki için de bu fonksiyon kullanılmıştır. Pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY ve SN arasındaki ölçüm modeli katsayıları 0,58 ile 0,85

arasında değişmektedir. Ancak, TMA aşınma için bu değer 0,54 olarak bulunmuştur.

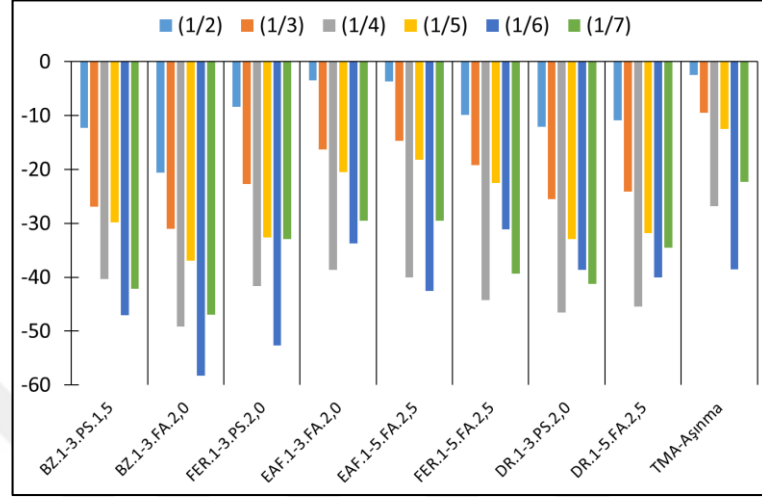
LWSRT ölçümleri için de tezin “**2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler**” bölümünde verilen yol yüzeyinin kayma direnci güvenliğini temini için tanımlanan eşik değerler farklı çalışmalardan ve ülke şartnamelerinden alınmıştır. Kayma direnci açısından yol güvenliği sağlayacak SN eşik değerinin 30 ile 40 arasında değiştiği görülmektedir. Bu bilgi ışığında tez kapsamında ESDY tabanlı ömür döngüsü analizinde SN 30 kayma direnci (SN₃₀) değeri kullanılmıştır ve buna karşılık gelen ESDY’ ler hesaplanmıştır (Çizelge 5.11).

Çizelge 5.11. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SN tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kod	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	BZ.1-3.PS.1,5	$y = -6,37 \ln(x) + 86,42$	0,84	7,0
2	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -8,18 \ln(x) + 99,60$	0,85	5,0
3	FER.1-3.PS.2,0	$y = -6,62 \ln(x) + 90,94$	0,70	10,
4	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -4,81 \ln(x) + 79,79$	0,64	>20,0
5	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -5,01 \ln(x) + 79,74$	0,58	>20,0
6	FER.1-5.FA.2,5	$y = -5,69 \ln(x) + 87,18$	0,68	>20,0
7	DR.1-3.PS.2,0	$y = -6,23 \ln(x) + 86,21$	0,80	8,3
8	DR.1-5.FA.2,5	$y = -5,52 \ln(x) + 79,80$	0,75	8,3

Çizelge 5.11’ de verilen ESDY tabanlı ömür döngüsü analiz sonuçları her bir uygulamanın ömür tayininde SN₃₀ eşik değerine karşılık gelen ESDY değerlerinin diğer iki test metodunda olduğu gibi birbirinden farklı olduğunu göstermektedir. En düşük ESDY ömrüne sahip uygulamanın 5,0 milyon ESDY’ ye ile BZ.1-3.FA.2,0 kodlu kesim iken ikincisi ise KTŞ’ de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasını işaret eden ve 7,0 milyon ESDY’ ye ile BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesim olduğu görülmektedir. DR kodlu uygulamaların ömür döngülerinin birbirine benzer seyrettiği ve BZ kodlu uygulamalara kıyasla daha yüksek bir ömre sahip olduğu belirlenmiştir. FER.1-3.PS.2,0 kodlu uygulama hariç, diğer cürufklar ile yapılan uygulamaların ömürlerinin 20 milyon ESDY’ yi aşacağı tahmin edilmektedir.

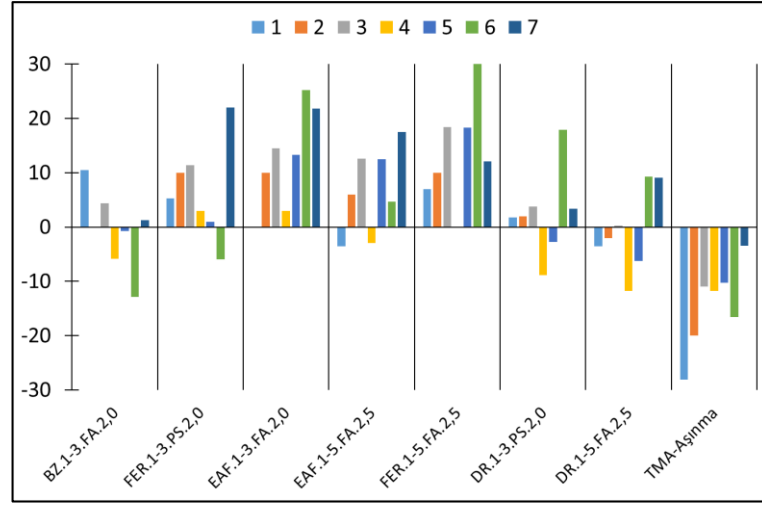
İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre değişim oranı ortaya koyan analiz ve BPT ve DFT' de olduğu gibi LWSRT tabanlı SN sonuçları içinde yapılmıştır (Şekil 5.8)



Şekil 5.8. İlk ölçüm sonuçlarına göre SN değişim oranı

Şekil 5.8' de ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplanan değerlerinde her bir kesimin ölçüm sonuçlarının tümünde azalış görülmektedir. İlk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde değişim oranının BZ.1-3.FA.2,0 kodlu deneme kesiminde %45 ile en yüksek azalış, EAF.1-3.FA.2,0 ve EAF.1-5.FA.2,5 kesimlerinde ise %30 ile en düşük azalış görülmektedir. KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasını temsil eden BZ.1-3.PS.1,5 kodlu deneme kesiminde ise %40 olarak hesaplanmıştır. Yanı sıra diğer kökenli agregalar ile karşılaştırıldığında BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamanın azalış oranı daha yüksektir. TMA aşınma tabakasında ise ilk ve son ölçüm sonuçları arasında fark %20 azalış yönündedir.

KTŞ' de tanımlanan ve bu tez kapsamında BZ.1-3.PS.1,5 kodu ile sahada tatbik edilen pürüzlendirme uygulamasına oranla diğer alternatif uygulamaların farkını ortaya koyan fark analizi BPT ve DFT tabanlı ölçümlerde yapıldığı gibi LWSRT tabanlı SN ölçümleri için de yapılmış sonuçlar Şekil 5.9' da verilmiştir.

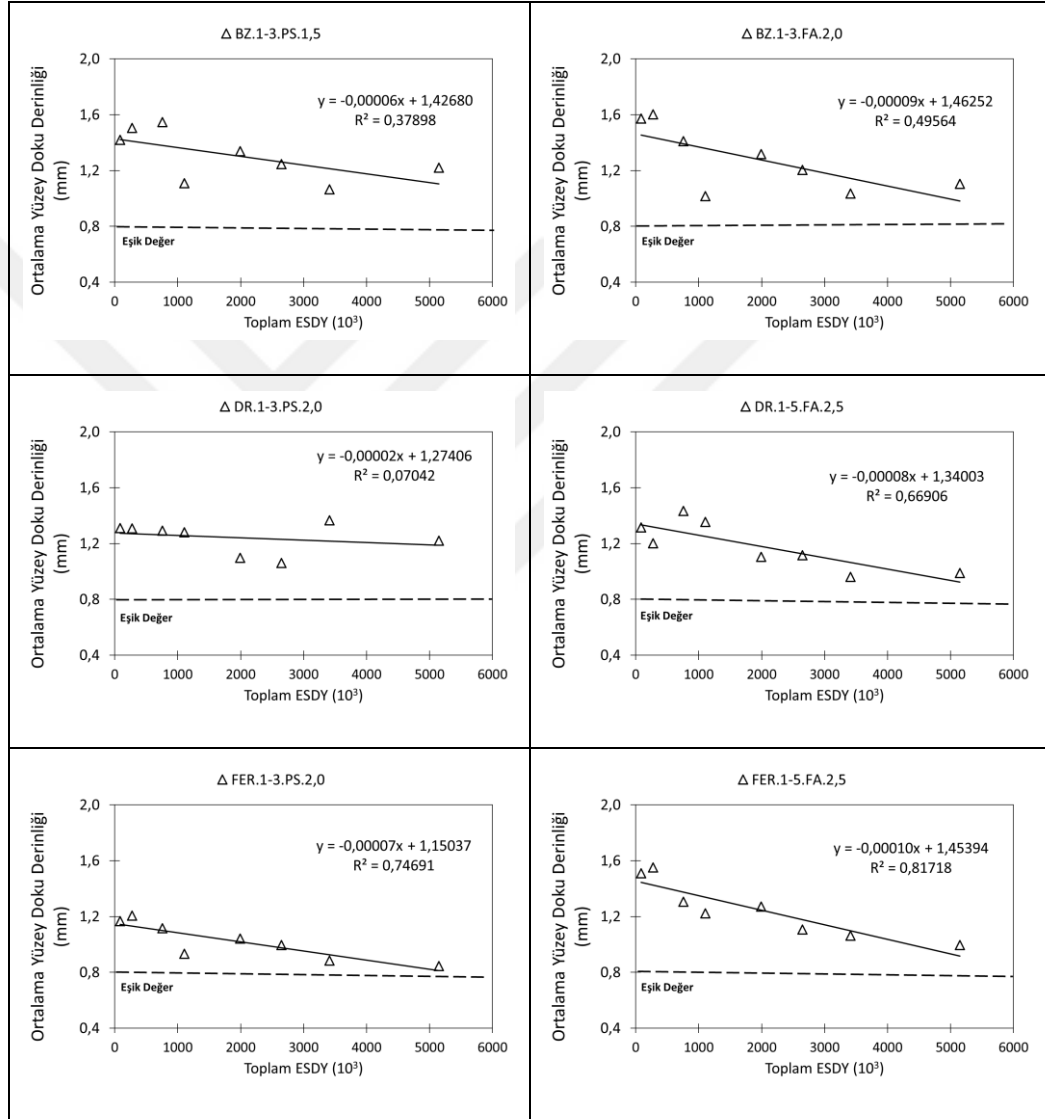


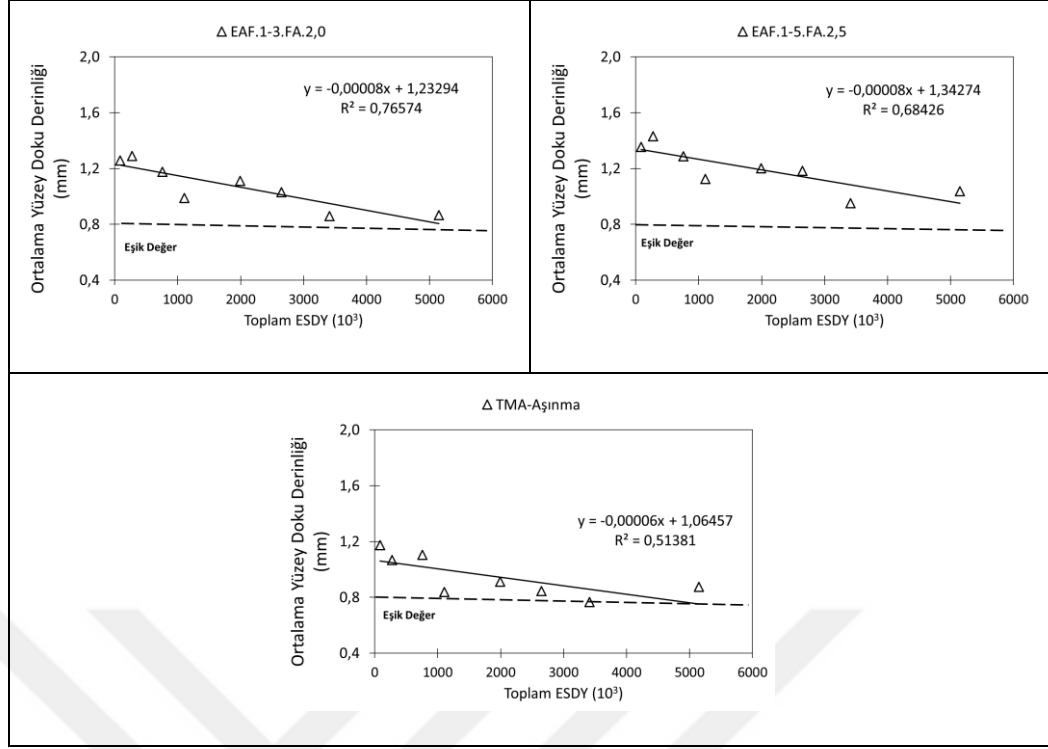
Şekil 5.9. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki fark

Şekil 5.9’ da her bir ölçüm için KTŞ’ de tanımlanan ve sahada yapılan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya göre diğer uygulamaların farkının çoğunlukla pozitif değer alması, alternatif uygulamaların kayma direnci performansının KTŞ’ de tanımlanan uygulamaya göre daha iyi olduğu göstermektedir. Alternatif pürüzlendirme uygulamalarında FER.1-5.FA.2,5 altıncı ölçümde BZ.1-3.PS.1,5 kodlu KTŞ’ de tanımlanan kesime göre % 40 daha iyi kayma direnci performansı göstererek en yüksek fark değerine sahip olmuştur. Diğer taraftan DR.1-5.FA.2,5 kodlu kesim dördüncü ölçümde BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesime göre % 10 daha düşük performans göstererek, KTŞ’ de tanımlanan uygulamanın en yüksek oranda üstün değerine karşılık gelmiştir. TMA aşınma tabakasının BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya göre ilk ölçüm itibari ile %30 oranında daha az kayma direnci performansı sergilediği, son ölçüm itibari ile de performans farklarının azaldığı görülmektedir. Son ölçüm sonuçlarına göre alternatif uygulamaların KTŞ’ de tanımlanan uygulamaya kıyasla tüm pürüzlendirilmiş kesimler için yüksek olduğu Şekil 5.9’ dan çıkarılabilir. BZ.1-3.FA.2,0 kodlu uygulama %2 ile en düşük oranda daha iyi iken DR kodlu agregalar ile üretilen yol kesimlerinin katkısı % 3 ile % 10’dur. Ferrokrom cürufu ile yapılan kesimler yaklaşık olarak %15 ile %25 oranında daha üstün iken EAF cürufu kesimler yaklaşık %20 ile 25 oranında daha yüksek kayma direnci performansına sahiplerdir.

5.2.4. SPT yüzey doku derinliği analizi

ESDY ve SPT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi her bir kesim için gösteren kayma direncinde logaritmik fonksiyon üzerinden yapılan analizden farklı olarak daha iyi ölçüm modeli katsayıları veren doğrusal eğriler kullanılmıştır. Bu yönde çizilen grafik serisi Şekil 5.10' da verilmiştir.





Şekil 5.10. TMA üzerinde SPT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.10' da TMA aşınma üzerinde uygulana farklı agrega parametreleri ile pürüzlendirilmiş her bir kesim için ESDY tabanlı SPT yüzey doku derinliği analiz grafiklerinden ortalama yüzey doku derinlik değerlerinin 1,6 ile 0,8 mm arasında TMA yüzeyi için ise 1,2 ile 0,8 mm olduğu görülecektir. ESDY değerinin artışı ile ortalama yüzey doku derinlik değerlerinde düşüş yaşanmıştır. Deneme kesimlerde farklı zamanlardaki ölçüm verilerinde kısmi artışlar da gözlenmiştir. Bu artışların kaynağı, ölçüm sürecinde farklı operatörlerin SPT uygulamasını sahada tatbik etmesinden kaynaklanabileceği öngörülmektedir. Zira KGM 5. Bölge'de çalışan teknik personelin eğitim amacı da yapılan saha ölçümlerinde güdüldüğünden farklı operatörler ile ölçümler alınmıştır. Ayrıca zorlayıcı çevresel ve trafik koşullarından kaynaklı ölçüm hatalarının mümkün olabileceğini ifade etmek gerekir. Zira operatör bağımlı olan bu test yöntemi aynı zamanda çevresel faktörlere karşı oldukça hassas bir ölçüm yöntemidir (Hao vd., 2016; Uz ve Gökalp, 2017a). SPT sonuçları ile ESDY arasında da iyi ölçüm modeli katsayısı (R^2) veren fonksiyonun doğrusal fonksiyon olduğu belirlenmiştir. İlgileşim katsayıları 0,38 ile 0,82 arasında değişmektedir. TMA aşınma için bulunan ölçüm modeli katsayısı 0,50 dolaylarındadır.

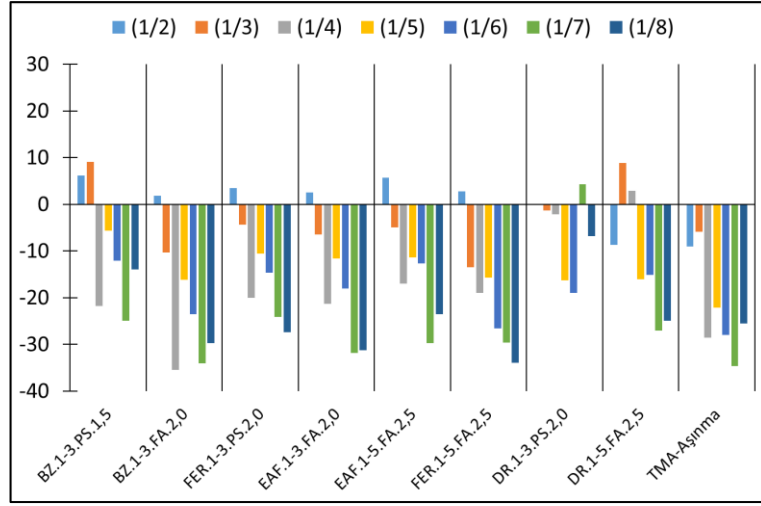
Tezin “2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler” bölümünde yüzey doku derinliği analizlerinde yolun kayma direnci ile ilişkilendirilen ve kullanıcıların güvenli içerisinde seyahat etmelerini destekleyecek olan ortalama yüzey doku derinliği için eşik değerler tanımlanmıştır. İlgili kısımda verilen çalışmalardan ortalama yüzey doku derinliği eşik değerinin çoğunlukla 0,4 ile 0,8 mm arasında olduğu görülmektedir. Bu bilgi ışığında tez kapsamında ESDY tabanlı ömür döngüsü analizinde üst sınır olan 0,8 mm doku derinliği ($SPT_{0,8}$) eşik değeri tanımlanmıştır. Şekil 5.10’ deki grafiklerde verilen doğrusal denklemler kullanılarak $SPT_{0,8}$ değerine karşılık gelen ESDY’ ler hesaplanmıştır (Çizelge 5.12).

Çizelge 5.12. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SPT tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	BZ.1-3.PS.1,5	$y = -0,00006x + 1,42680$	0,38	10,4
2	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,00009x + 1,46252$	0,50	7,4
3	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,00007x + 1,15037$	0,75	5,0
4	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,00008x + 1,23294$	0,77	5,4
5	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -0,00008x + 1,34274$	0,68	6,8
6	FER.1-5.FA.2,5	$y = -0,00010x + 1,45394$	0,82	6,5
7	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,00002x + 1,27406$	0,07	> 20,0
8	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,00008x + 1,34003$	0,67	6,7

Çizelge 5.12’ de verilen pürüzlendirilmiş kesimler için $SPT_{0,8}$ eşik değerlerine karşılık tahmin edilen ESDY tabanlı ömür, düşük R² değerine sahip DR.1-3.PS.2,0 deneme kesimi için aşırı yüksek değerde bulunmuş bu durumu ifade etmek için 20 yılı aşkın (>20) ifadesi kullanılmıştır. Diğer uygulamalara bakıldığında SPT tabanlı ölçümlerde 0,8 mm doku derinliğine ulaşmak için tahmin edilen ESDY değerleri yaklaşık olarak 10,4 milyona kadar bulunmuştur.

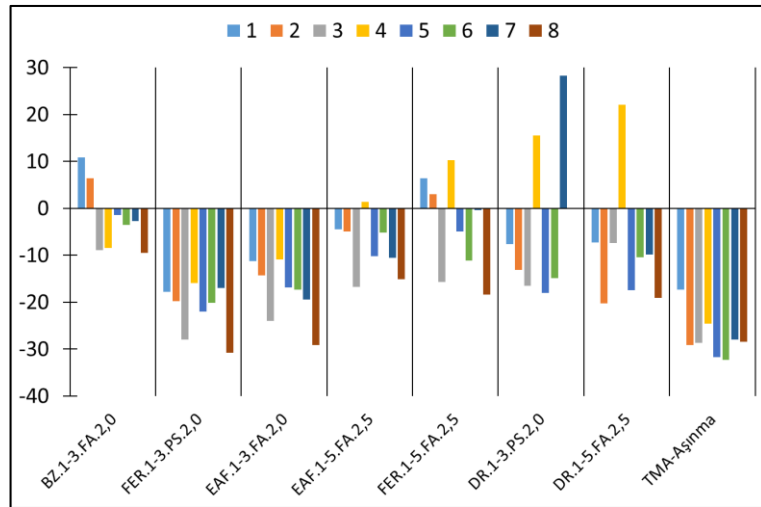
İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre değişim oranı belirten analiz yapılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. İlk ölçüm sonuçlarına göre SPT doku derinliği değişim oranı

Şekil 5.11’ de ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplanan değerlerinde düzenli olmayan artış veya azalışlar görülmektedir. Pürüzlendirilmiş kesimlerde ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim incelendiğinde %10’ kadar yüksek %40’ lara kadar düşük doku derinliği görülmektedir.

KTŞ’ de tanımlanan ve sahada tatbik edilen BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesime oranla diğer alternatif uygulamaların ve TMA’ nın farkını ortaya koymak için Şekil 5.12 hazırlanmıştır.

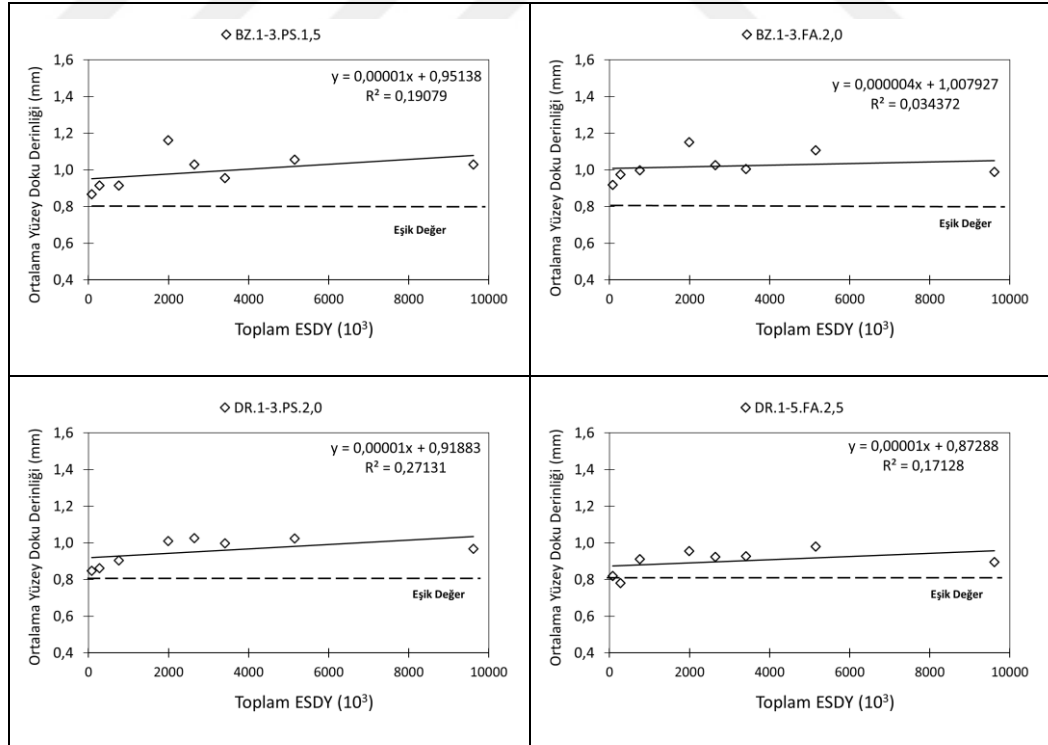


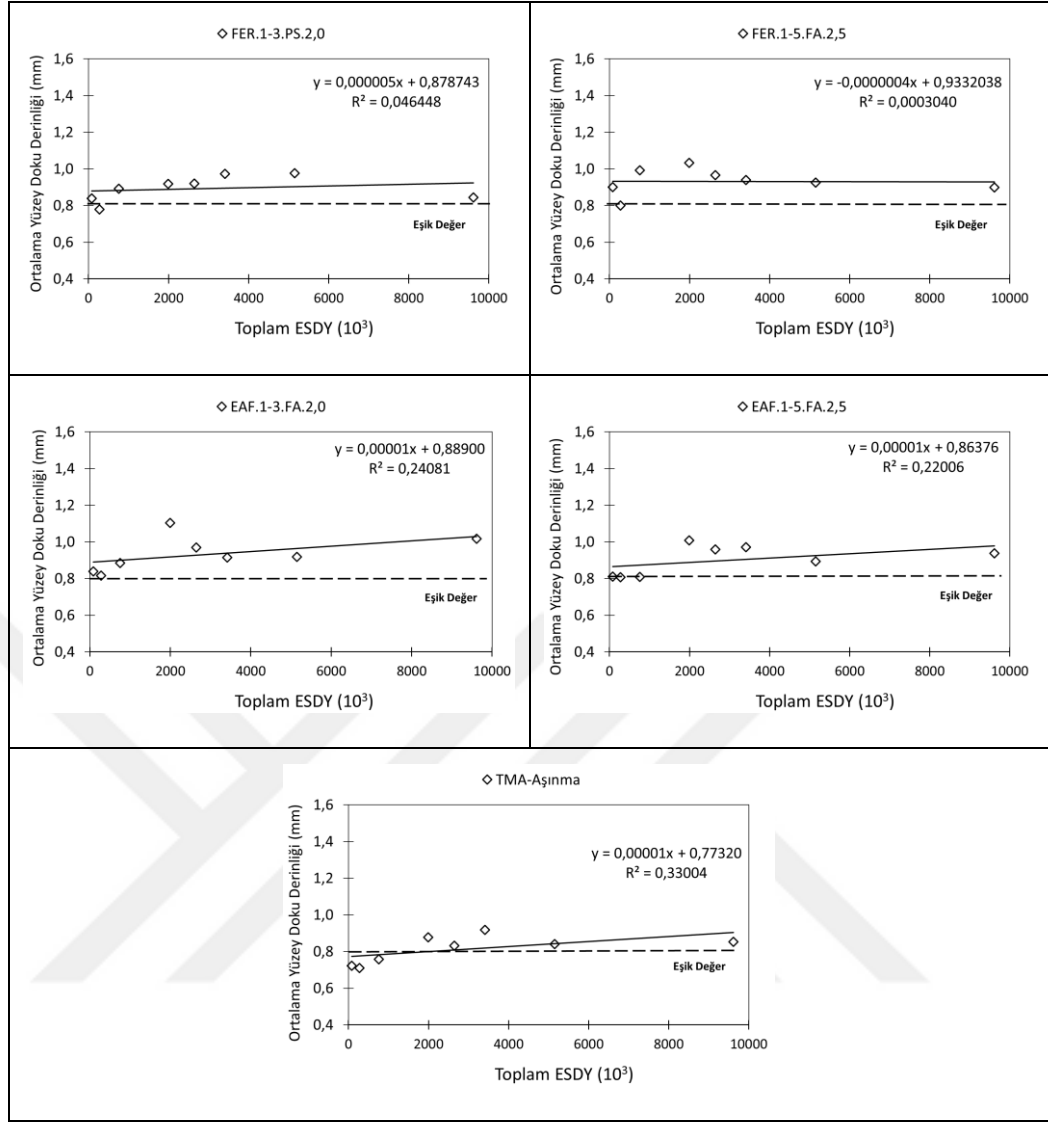
Şekil 5.12. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasında SPT doku derinliği farkı

Şekil 5.12' de verilen sonuçlar incelendiğinde KTŞ' de tanımlanan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu kesime göre diğer uygulamaların farkının çoğunlukla negatif değer aldığı görülmektedir. Bu durum alternatif uygulamaların yüzey doku derinliklerinin KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Ancak, aynı kesim için farklı tarihlerde yapılan ölçüm sonuçları birbirinde farklı olmakla beraber düzenli bir artış veya azalış belirlenmemektedir. BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya kıyasla %30'ları aşkın düzeyde daha düşük yüzeysel dokuya sahip olduğu görülmektedir. 1-5 boyutlu malzemelerin kullanıldığı kesimlerde doku derinliğinin daha yüksek olduğu çıkarılabilecek diğer sonuçlardandır.

5.2.5. HT yüzey makro doku derinliği analizi

ESDY ve HT ile elde edilen ölçüm sonuçları üzerinde yapılacak analizler için SPT' de analizlerinde olduğu gibi doğrusal eğriler kullanılmıştır. Bu yönde çizilen grafik serisi Şekil 5.13' te verilmiştir.



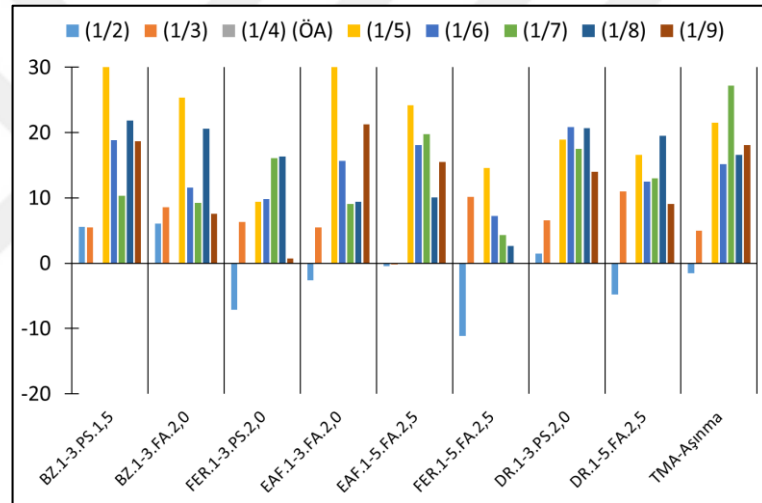


Şekil 5.13. TMA aşınma üzerinde HT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.13’ te TMA aşınma üzerinde her bir kesim için ESDY bağlı ESDY tabanlı HT yüzey doku derinliği analiz grafiklerinden ortalama yüzey doku derinlik değerlerinin 1,2 ile 0,8 mm arasında seyrettiği görülecektir. HT sonuçları ile ESDY arasında pürüzlendirilmiş kesimler için bulunan ölçüm modeli katsayıları (R^2) 0,0003 ile 0,27 arasında değişmektedir. TMA aşınma için ise bulunan değer 0,33’ tür. ESDY artıkça doku derinliğinin artma meydana geldiği ilgili grafikten görülmektedir. Bu neden olan esas durum ölçüm alınan noktalarda değişmemesi ve ilgili noktada maruz kalınan trafik yükleri altında zaman içerisinde pürüzlendirme malzemelerinin sökülerek yüzey dokusunda boşluklar oluşturmaya dayandırılabilir.

SPT ile elde edilen doku derinliği ölçüm sonuçlarının tersi bir durum HT ile doku derinliği ölçüm sonuçlarının ile ESDY arasında bir ilişkide gözlenmiştir. Azalan bir eğilim olmadığı için SPT ile yapılan ölçümlerde trafik güvenliğini risk altında bırakabilecek tanımlanan eşik bir doku derinliği için ESDY tabanlı ömür analizi yapmak mümkün olmamıştır. Ancak, sadece FER.1-5.FA.2,5 kodlu kesim için yapılabilen ESDY tabanlı ömür analizinin sonucunda 20 milyon üzere bir ESDY ömrü belirlenmiştir.

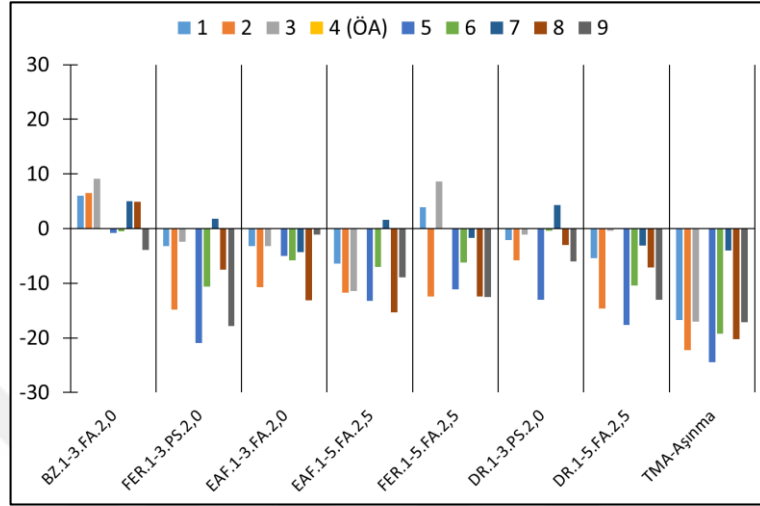
İlk ölçüm sonuçlarının diğer ölçüm sonuçlarına göre nasıl değiştiğini gösteren değişim oranı analizi SPT’ de olduğu gibi HT tabanlı ölçüm sonuçları içinde yapılmıştır (Şekil 5.14).



Şekil 5.14. İlk ölçüm sonuçlarına göre HT doku derinliği değişim oranı

Şekil 5.14’ te ilk ölçüm sonuçlarına göre ikinci ölçüm sonuçlarında doku derinliğinde azalmalar görülmektedir. Sonraki ölçümlerde değişim oranlarında düzenli olmayan artış ve azalışlar görülmektedir. Dördüncü saha çalışmasında, cihazdaki arıza nedeniyle ölçüm alınamadığını (AÖ) belirtmek gerekir. Beşinci ölçüm sonuçlarının ilk ölüm sonuçlarına göre tüm ölçümler içerisinde en yüksek doku derinliği değerleri belirlendiğini yüksek değişim oranlarından çıkarılabilir. Son ölçüm ile birinci ölçüm sonuçları arasındaki doku derinliği artışında en yüksek yaklaşık olarak % 20 oranında bir artış EAF.1-3.FA.2,0 kodlu kesim için belirlenmiştir.

KTŞ' de tanımlanan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu pürüzlendirme uygulamasına kıyasla diğer alternatif pürüzlendirme uygulamaları arasındaki farkı ortaya koymak için yapılan analize dair sonuçlar Şekil 5.15' te verilmiştir.

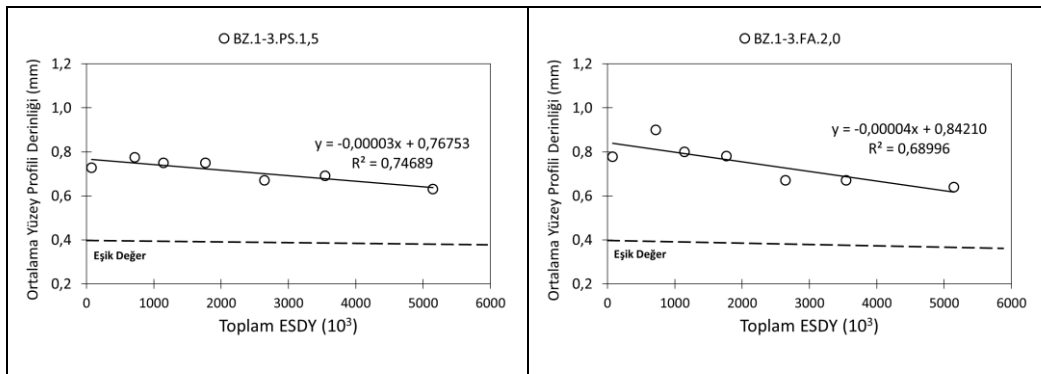


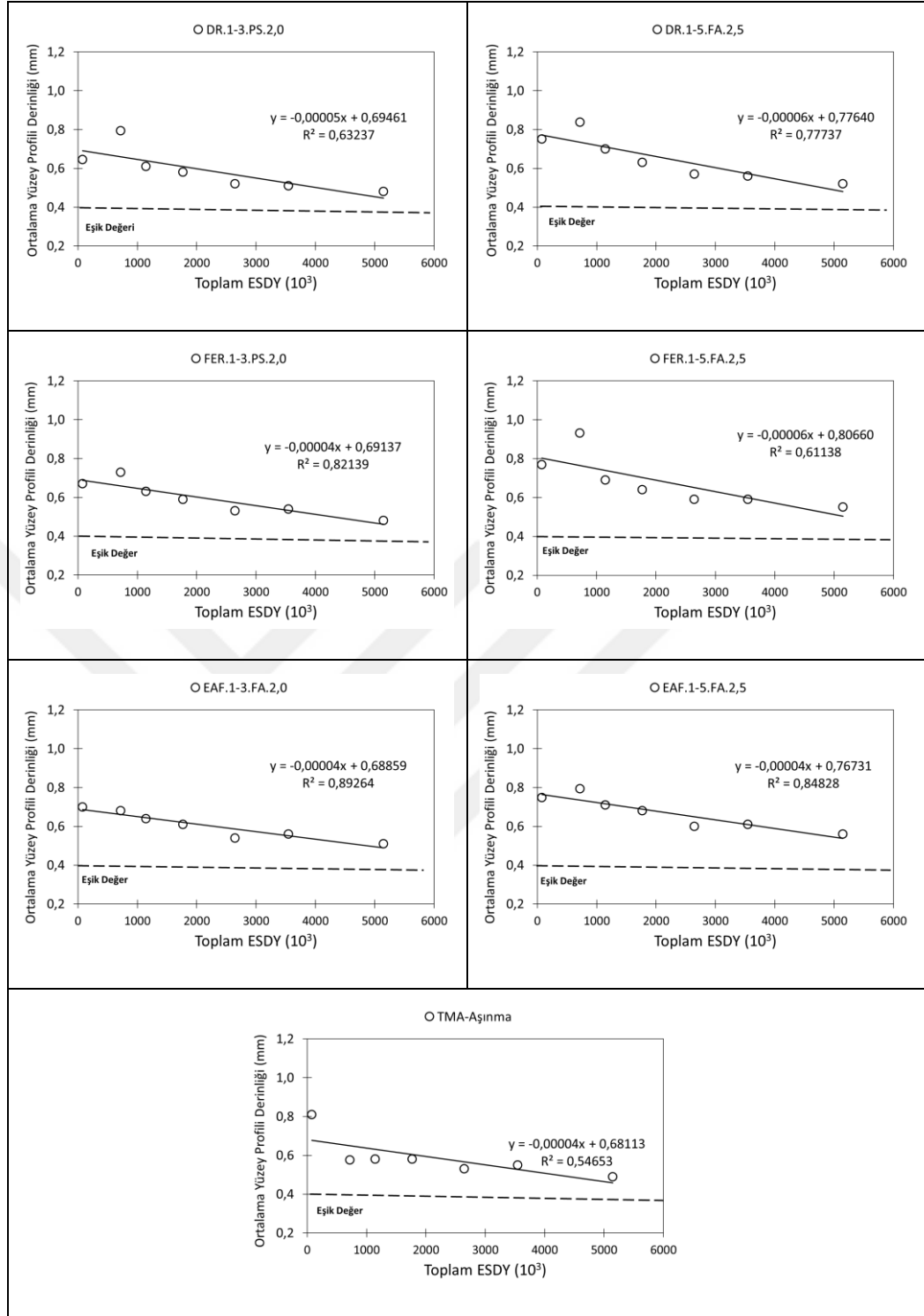
Şekil 5.15. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasında HT doku derinliği farkı

Şekil 5.15' te verilen analiz sonuçları BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya göre diğer uygulamaların farkının çoğunlukla negatif değer alması, tez kapsamında araştırılan alternatif pürüzlendirme uygulamalarına dair yüzey doku derinliklerinin KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

5.2.6. LP yüzey profil derinliği analizi

ESDY ve LP ile elde edilen ölçüm sonuçları üzerinde yapılan analizlerde SPT ve HT tabanlı analizlerde olduğu gibi doğrusal eğriler(Şekil 5.16) kullanılmıştır.





Şekil 5.16. TMA aşınma üzerinde LP profil derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.16' da verilen grafiklerinden ortalama yüzey profili derinlik değerlerinin 0,8 ile 0,4 mm arasında seyrettiği görülecektir. Pürüzlendirilmiş kesimlerden elde edilen LP sonuçları ile ESDY arasında bulunan ölçüm modeli katsayıları (R^2) 0,61 ile 0,89 arasında değişmektedir. Ancak, TMA aşınma için ise 0,55 gibi bir

değer bulunmuştur. ESDY artıkça yüzey profil derinliğinde SPT ölçüm sonuçlarındaki eğilime benzer şekilde azalma meydana gelmiştir.

Tezin “2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler” bölümünde yüzey profil derinliği analizlerinde yolun kayma direnci ile ilişkilendirilen ve kullanıcıların güven içerisinde seyahat etmelerini destekleyen ortalama yüzey profil derinliği için eşik değerler tanımlanmıştır. İlgili kısımda verilen çalışmalardan ortalama yüzey profil derinliği eşik değerinin kaplama türü, yol kesimi ve sınıfı ve araç hızlarına bağlı olarak 0,3 ile 0,9 mm arasındadır. Ancak, önceki çalışmalarda ve teknik şartnamelerde 0,4 ile 0,8 mm eşik değerlerinin çoğunlukla önerildiği görülen bir husustur. Bu nedenle tez kapsamında LP ölçüm sonuçları için ESDY ömür analizinde kullanılacak eşik değer 0,4 mm ($LP_{0,4}$) olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.16’ da verilen grafiklerden elde edilen doğrusal denklemler kullanılarak $LP_{0,4}$ karşılık gelen ESDY’ ler hesaplanmış sonuçlar Çizelge 5.13’ te verilmiştir.

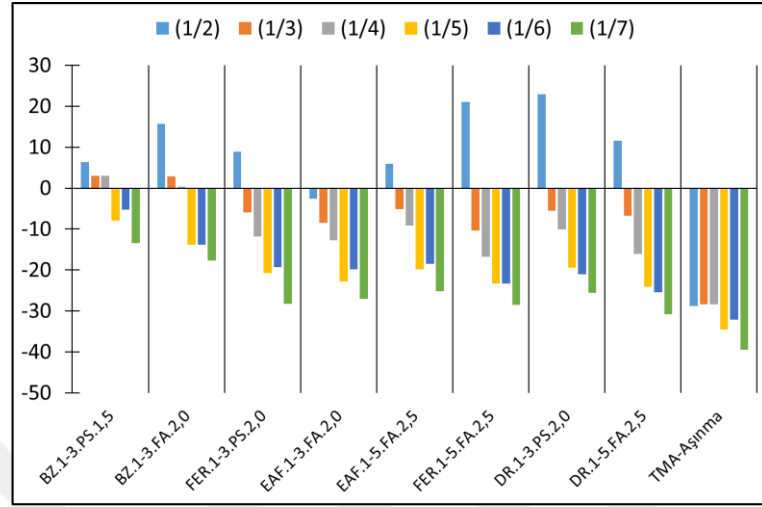
Çizelge 5.13. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan LP tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	BZ.1-3.PS.1,5	$y = -0,00003 x + 0,76753$	0,75	12,3
2	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,00004 x + 0,84210$	0,69	10,1
3	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,00004 x + 0,69137$	0,82	7,3
4	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,00004 x + 0,68859$	0,89	7,2
5	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -0,00004 x + 0,76731$	0,85	9,2
6	FER.1-5.FA.2,5	$y = -0,00006 x + 0,80660$	0,61	6,8
7	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,00005 x + 0,69461$	0,63	5,9
8	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,00006 x + 0,77640$	0,78	6,3

Çizelge 5.13’ te paylaşılan $LP_{0,4}$ eşik değeri için her bir kesim için belirlenen ölçüm modeli katsayıları 0,61 ile 0,89 arasında değişmektedir. Tüm pürüzlendirilmiş kesimler için tahmin edilen ESDY tabanlı ömür 5,9 ile 12,3 milyon ESDY arasında değişmektedir.

İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre nasıl değiştiğini ortaya koyan değişim oranı analizi önceki kayma direnci ve doku

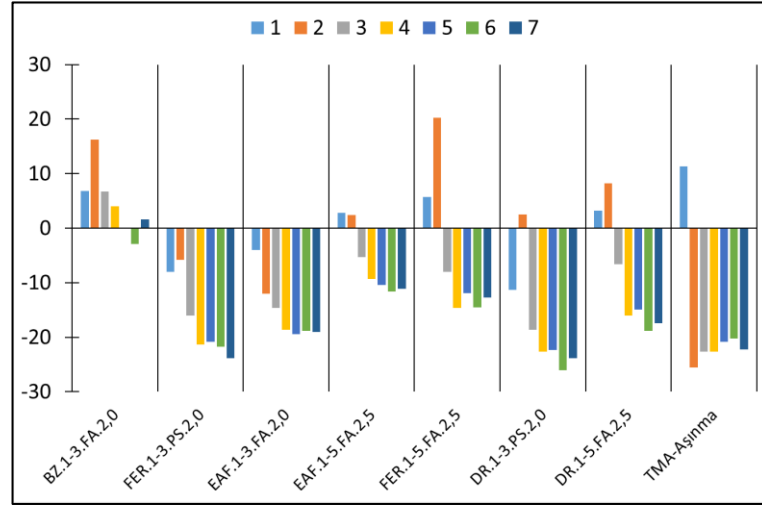
derinliği analizlerinde olduğu gibi LP profil derinliği ölçümleri içinde yapılmış, sonuçlar Şekil 5.17’ de verilmiştir.



Şekil 5.17. İlk ölçüm sonuçlarına göre LP yüzey profil derinliği değişim oranı

Şekil 5.17’ de ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplanan değerlerinde ikinci ölçümlerde EAF.1-3.FA.2,0 ve TMA aşınma hariç tüm kesimlerde yüzey profil derinliğinde artış görülmektedir. Bunun nedeni olarak yol yüzeyi üzerinde tutunamayan ve yüzey doku boşluklarını dolduran pürüzlendirme malzemelerinin çevre ve trafik yükü altından sökülmesi olarak ifade edilebilir. İlk ölçüme göre diğer ölçüm sonuçlarını karşılaştırıldığında ise azalışlar belli oranlarda olmamak suretiyle devamlı görülmektedir. İstisnai olarak bazı kesimler için altıncı ölçüm sonuçları beşinci ölçüm sonuçlarına göre % 5’ e yakın yüzey profil derinliklerinde artış kaydedildiğini belirtmek gerekir. Pürüzlendirilen kesimlerin ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki azalışta en yüksek oran % 30 ile DR.1-5.FA.2,5, en düşük ise % 15 ile BZ.1-3.PS.1,5 kesimleri için belirlenmiştir. TMA aşınma tabakası yüzey profil derinliklerinde değişim oranı ise yaklaşık % 30 ile 40 arasında bulunmuştur.

Önceki kayma direnci ve yüzey doku ölçüm sonuçları üzerinde yapıldığı gibi bu tez kapsamında sahada tatbik edilen BZ.1-3.PS.1,5 kodlu KTŞ’ de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasına kıyasla diğer alternatif uygulamaların farkını ortaya koyan analiz yapılmış, hesaplamalar neticesinde elde edilen sonuçlar Şekil 5.18’ de paylaşılmıştır.



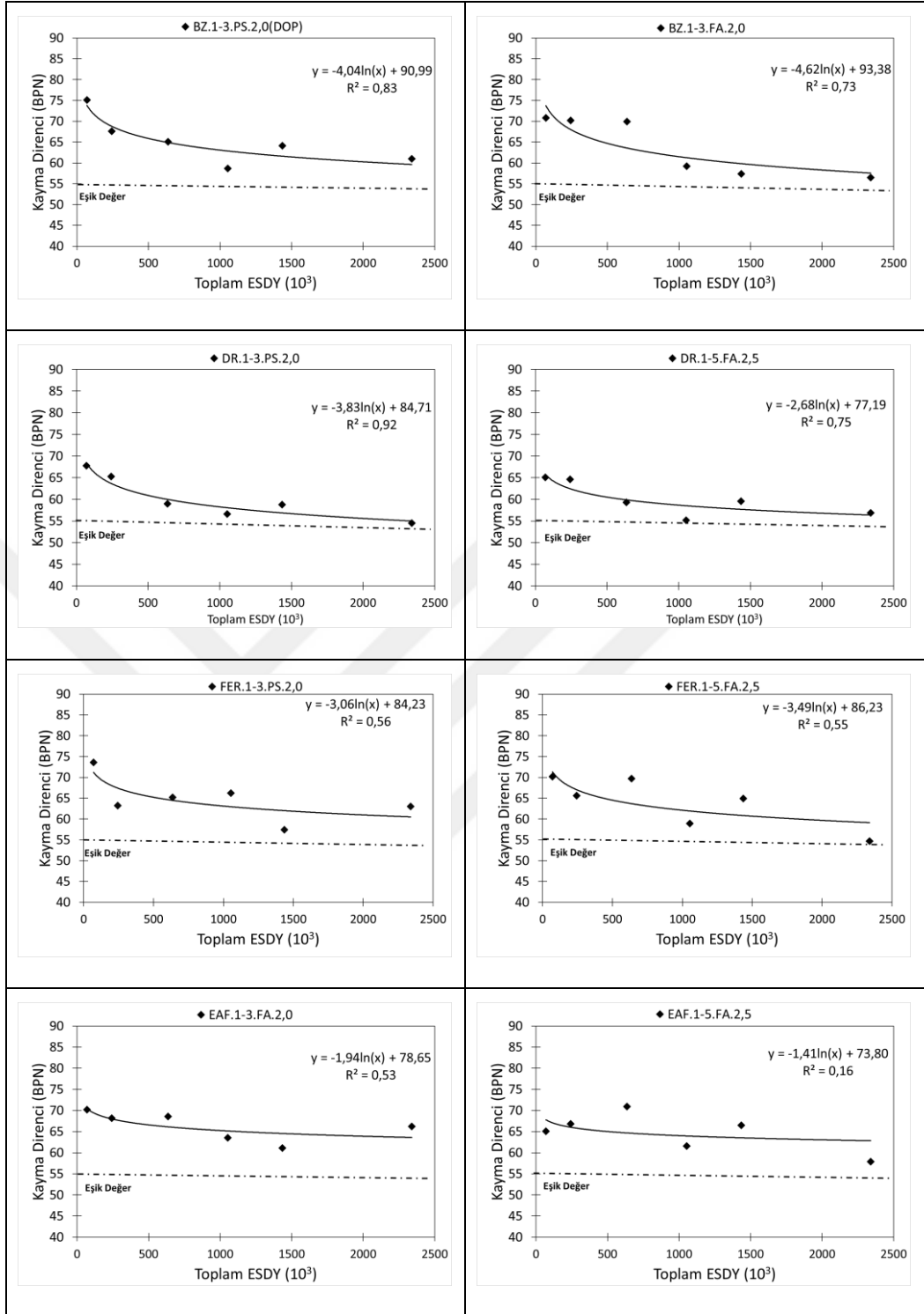
Şekil 5.18. BZ.1-3.PS.1,5 ile alternatifler arasındaki LP doku derinliği fark

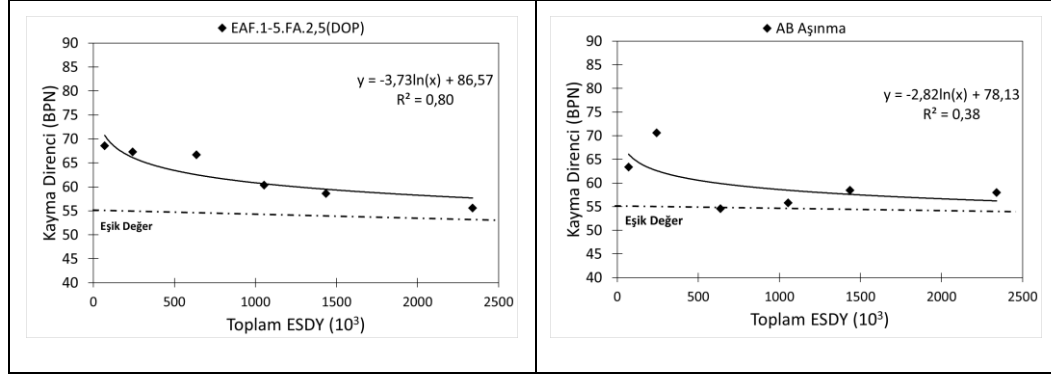
Şekil 5.18’ de verilen grafikler KTŞ’ de tanımlanan ve sahada yapılan BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya göre diğer uygulamaların farkının çoğunlukla negatif değer alması, alternatif uygulamaların yüzey doku derinliklerinin KTŞ’ de tanımlanan uygulamaya göre daha düşük olduğunu göstermektedir. TMA-aşınma tabakasında ilk ölçüm sonuçları yaklaşık %10 oranında BZ.1-3.PS.1,5 kodlu uygulamaya göre daha fazla belirlenmişken sonraki uygulamalarda ise %30’ lara varan azalmalar görülmüştür.

5.3. AB Aşınma Tabakası Ölçüm Sonuçları Analizleri

5.3.1. BPT kayma direnci analizi

ESDY ve BPT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.19’ da verilmiştir.





Şekil 5.19. AB aşınma üzerinde BPN ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.19' da AB aşınma üzerinde her bir kesim için BPN kayma direnci değişiminin ESDY artışı ile nasıl değiştiğini veren grafik serisi incelendiğinde, kayma direnci değerlerinin 80 ile 50 BPN arasında olduğu görülecektir. ESDY değerinin artışı ile kayma direnci değerleri azalma meydana gelmiştir. Ancak bazı kesimlerde ölçüm sürecinde artışlar görülmüştür. Özellikle cüruf kullanılan ve BZ.1-3.FA.2,0 kodlu kesimlerde üçüncü ölçümde bu artış görülürken, dere malzemesi kullanılan ve BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimlerde ise kesimler görülen artış beşinci ölçümde gözlenmiştir. AB aşınmada ise artış ikinci ve beşinci ölçümlerde oluşmuştur. Bu duruma esas olan nedenler sıcak kaplama üzerinde serilen pürüzlendirme uygulaması malzemesinin etkisinin yanı sıra sıcak kaplama imalatındaki mastik kısmın parçalanarak agregalarının ortaya çıkması olarak ifade edilebilir (Do vd., 2009; Wang vd., 2013; Wang vd., 2017). Ayrıca ölçümlerde kayma direncine mevsimsel faktörlerin etkisi de görülmektedir. Zira ölçüm alınan tarihlerde tarımsal faaliyette hizmet veren ağır taşıtların yol yüzeyinde çamur, toz, araç kasalarından düşen ürünlerden kaynaklı kirliliğe neden olmaktadır. Yol yüzeyinde oluşan kirlilikler yol üzerinden alınan ölçüm sonuçlarını önemli miktarlarda etkilemektedir (El-Desouky, 2018; Fwa, 2017; Kogbara vd., 2018; Yan vd., 2019). ESDY ve BPN arasındaki ölçüm modeli katsayıları pürüzlendirilmiş kesimler için 0,16 ile 0,92 arasında değişmekte iken AB aşınma için 0,38 olarak bulunmuştur. Ancak, ölçüm modeli katsayılarının çoğunluğu 0,50 ve üzerindedir. 0,50'nin altında görülen düşük katsayı değerlerinin ölçümsel hatalardan, operatörden ve çevresel koşullardan etkilendiği bilinmektedir.

Bu tezin “2.4.5. *Kaplama kayma direncinde eşik değerler*” bölümünde BPN ölçümleri için eşik değer olarak hem TS EN ve diğer uluslararası çalışmalarda önerilen 55 BPN (BPN₅₅) değeri kabul edilmiştir. ESDY tabanlı BPT ölçüm sonuçlarının analizinde Şekil 5.19’ da verilen grafikler üzerinde belirtilmiş logaritmik denklemler kullanılarak BPN₅₅ eşik değerine karşılık gelen ESDY değerleri hesaplanarak pürüzlendirilmiş deneme kesimlerinin ESDY cinsinden ömürleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yapılan tahminler ile ilgili sonuçlar Çizelge 5.14’ te verilmiştir.

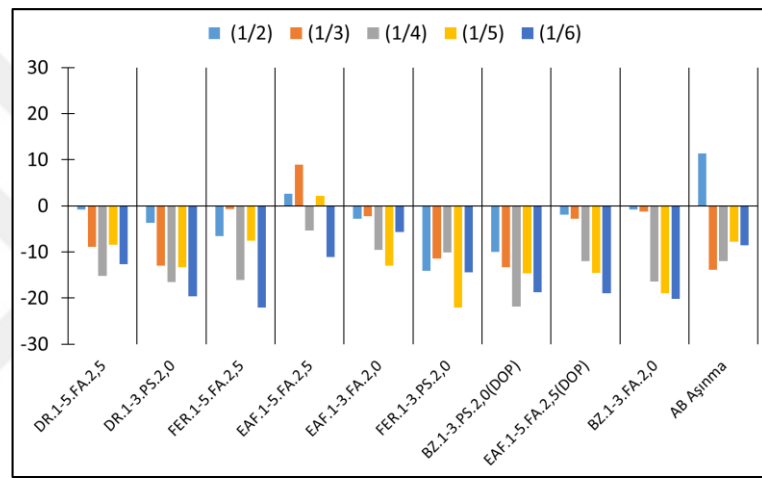
Çizelge 5.14. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan BPN tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -2,68 \ln(x) + 77,19$	0,75	3,9
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = -3,83 \ln(x) + 84,71$	0,92	2,3
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = -3,49 \ln(x) + 86,23$	0,55	7,7
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -1,41 \ln(x) + 73,80$	0,16	>20,0
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -1,94 \ln(x) + 78,65$	0,53	>20,0
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -3,60 \ln(x) + 84,23$	0,56	3,4
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -4,04 \ln(x) + 90,99$	0,83	7,4
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -3,73 \ln(x) + 86,57$	0,80	4,7
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -4,62 \ln(x) + 93,38$	0,73	4,1

Çizelge 5.14’ te verilen ve pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY cinsinden yapılan analiz sonuçlarının, farklı pürüzlendirme uygulamaları için farklı ömür değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Doğal agregalar ile yapılan pürüzlendirme uygulamalarından olan düşük R² (0,16) değerine sahip EAF.1-5.FA.2,5 kesimi için tahmin edilen ESDY değerinin 20 milyonu üzerinde belirlenmiştir. Aynı malzeme ile yapılan ve R² değeri 0,53 olan EAF.1-3.FA.2,0 kesimi için 20 milyon aştığı görülmektedir. Ancak, 0,92 gibi yüksek R² değerine sahip DR.1-3.PS.2,0 kesimi için tahmin edilen ESDY değerinin ise 2,3 milyon olarak bulunmuştur. Diğer taraftan FER kodlu cüruf kullanılarak tatbik edilen pürüzlendirme uygulamaları FER.1-5.FA.2,5 ve FER.1-3.PS.2,0 kesimleri için sırasıyla için 7,7 ve 3,4 milyon ESDY ömrü tahmin edilmiştir. %0,2 DOP katkısı ile yapılan uygulamalardan BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesim için tahmin edilen ESDY

ömrü EAF.1-5.FA.2,5(DOP) kesimine göre 3 milyon ESDY kadar daha yüksek bulunmuştur.

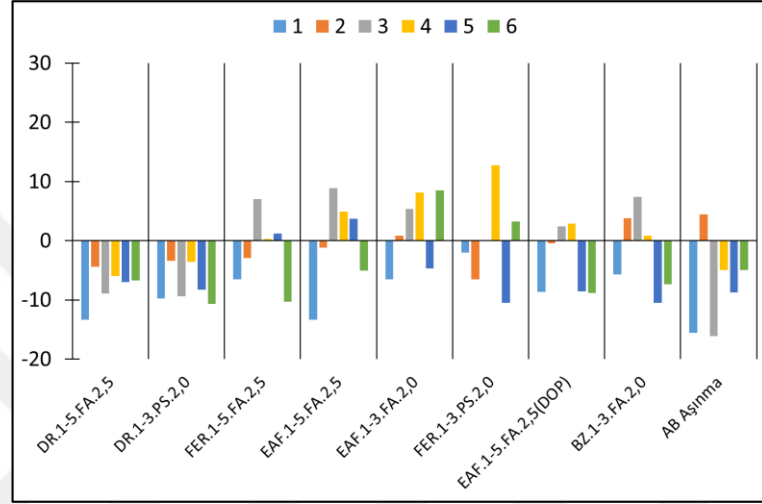
TMA aşınma tabakalarındaki her ölçüm yöntemi için yapılan ve ilk ölçüm sonuçlarına kıyasla diğer ölçüm sonuçlarında nasıl değiştiğini ortaya koyan analiz benzer analizler AB aşınma üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamaları içinde yapılmıştır. Deneme kesimlerinden alınan ilk BPN ölçüm sonuçlarına göre değişim oranı diğer ölçümlerin hangi oranda değiştiğini gösteren analiz sonuçları Şekil 5.20' de verilmiştir.



Şekil 5.20. İlk ölçüm sonuçlarına göre BPN değişim oranı

Şekil 5.20' de ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplandığı değerler de her bir kesimin ölçüm sonuçlarının artış ve azalışlarında düzenli bir eğilim görülmemektedir. Pürüzlendirilmiş kesimler için ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde, FER.1-5.FA.2,5 kodlu deneme kesiminde yaklaşık % 20 ile en yüksek, EAF.1-3.FA.2,0 kodlu deneme kesiminde ise %5,7 ile en az azalma yönünde değişim görülecektir. AB aşınma tabakası için ise ikinci ölçümde yaklaşık % 10 oranında artış yönünde değişim görülürken diğerlerinde ise BPN değerlerinde % 15' e kadar azalma bulunmuştur. AB aşınma tabakasına ait ilk ve son ölçümler arasında değişim oranı azalış yönünde yaklaşık % 10 olarak hesaplanmıştır.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimi, KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış hali olmakla beraber TMA aşınma tabaksında uygulananndan farklı olarak bitümü % 0,2 oranında DOP katılarak elde edilmiştir. Alternatif olarak denenen uygulamaların kayma direnci performanslarının BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesim performansı ile karşılaştırmak amacıyla fark analizi yapılmıştır. İlgili analize dair veriler Şekil 5.21' de sunulmuştur.

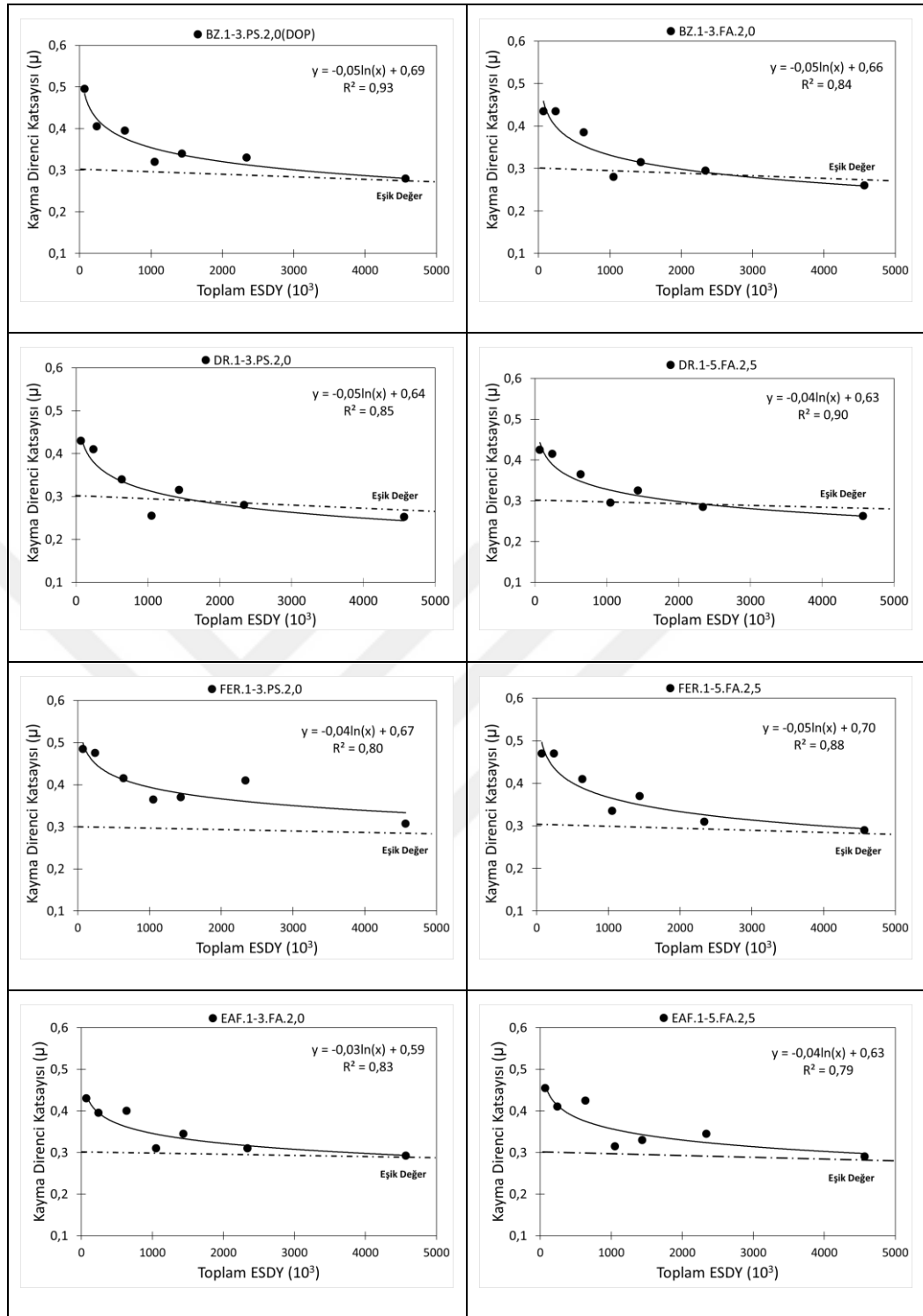


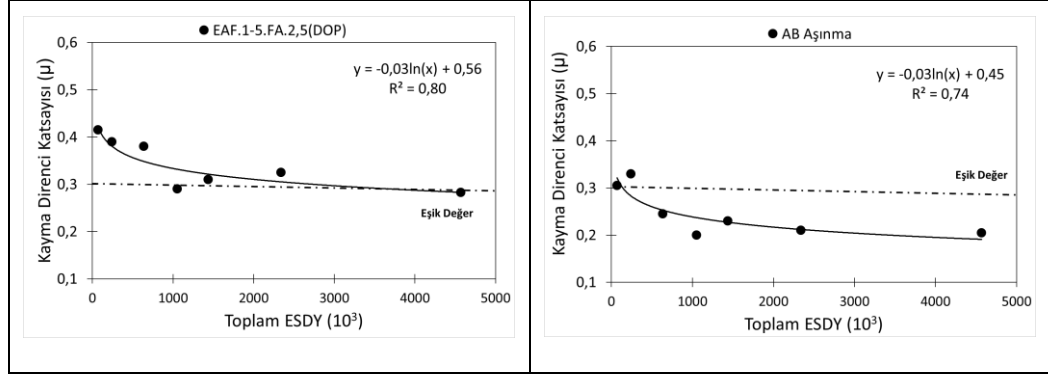
Şekil 5.21. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın performansı ile buna alternatif olarak araştırılan uygulamaların performansı arasındaki farkı ortaya koyan ve Şekil 5.21' de verilen analiz sonuçları her ölçüm için ayrı ayrı yapılmıştır. Pozitif farkların olduğu ölçüm tarihlerinde ilgili alternatif kesimlerin kayma direnci performansı KTŞ' de tanımlanan uygulamanın performansına göre daha yüksek olduğunu göstermektedir. Hesaplanan değerlerin geneli incelendiğinde çoğunlukla pozitif ve negatif değerlerin yani KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulama kesiminin performansının diğerlerine kıyasla daha yüksek ya da daha düşük olduğunu görülmektedir.

5.3.2. DFT kayma direnci analizi

ESDY ve DFT ile 60 km/s hızda elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.22' de verilmiştir.





Şekil 5.22. AB aşınma üzerinde μ ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.22’ de verilen grafikler incelendiğinde pürüzlendirilmiş kesimlere ait DFT kayma direnci kat sayısı (μ) değerlerinin artan ESDY ile birlikte 0,5 değerinden 0,3’ e kadar düştüğü görülecektir. Ancak AB aşınma tabakasının ise 0,2 ile 0,35 arasında görülmüştür. Grafiklerde sunulan verilerden deneme kesimlerinde farklı zaman dilimine ait ölçümlerde artışlar görülmüştür. Bu durum, sıcak kaplama üzerinde serilen pürüzlendirme uygulaması malzemesinin etkisinin yanı sıra sıcak kaplama imalatındaki mastik asfaltın çatlaması veya bitümün soyularak kaplamanın iskeletini oluşturan agregalarının ortaya çıkması ile de ilişkilendirilebilir (Rado ve Kane, 2014). Ayrıca, DFT cihazının çalışma prensibinden kaynaklı olarak BPT ölçümlerinde olduğunun tersine operatörden kaynaklı ve/veya mevsimsel faktörlerin etkisi daha az görülmektedir (Chu vd., 2019). ESDY ve DFT arasındaki ilişki ortaya koyan ölçüm modeli katsayıları pürüzlendirilmiş kesimler için 0,79-0,93 arasında değişmekte iken AB-aşınma tabası için 0,74 olarak bulunmuştur.

Kayma açısından yol güvenliğini temin etmekte için kayma direnci ölçümlerinde farklı cihaz ve yöntemlere bağlı olarak çeşitli eşik değerler farklı çalışmalardan ve ülke şartnamelerde tanımlanmıştır. Bunlarda bazıları bu tezin “**2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler**” kısmında verilmiştir. Bu kısımda DFT tabanlı kayma direnci katsayısının eşik değerinin farklı yol kesimleri yolda izin verilen hız limitine göre değişkenlik gösteriyor olsa da çoğunlukla 0,30 olduğu görülmektedir. Bu bilgiden yola çıkılarak ESDY tabanlı ömür tahmin analizinde eşik değer olarak 0,30 ($DFT_{0,30}$) kullanılmıştır Şekil 5.22’ deki

grafiklerde verilen logaritmik denklemler kullanılarak $DFT_{0,30}$ değerine karşılık gelen ESDY hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.15' te verilmiştir.

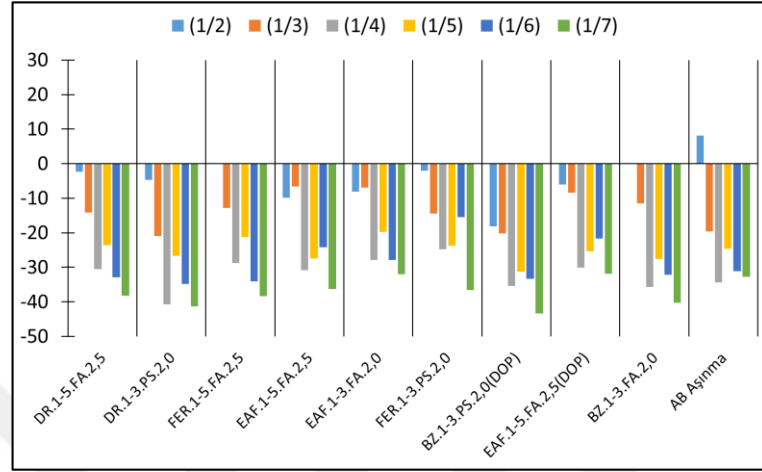
Çizelge 5.15. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan μ tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,04 \ln(x) + 0,63$	0,90	3,8
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,05 \ln(x) + 0,64$	0,85	0,9
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = -0,05 \ln(x) + 0,70$	0,88	3,0
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -0,04 \ln(x) + 0,63$	0,79	3,8
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,03 \ln(x) + 0,59$	0,83	15,8
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,04 \ln(x) + 0,67$	0,80	10,4
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -0,05 \ln(x) + 0,69$	0,93	2,4
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -0,03 \ln(x) + 0,56$	0,80	5,8
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,05 \ln(x) + 0,66$	0,84	1,3

Çizelge 5.15' te verilen ve pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY cinsinden yapılan analiz sonuçlarının, farklı pürüzlendirme uygulamaları için farklı ömür değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Doğal agregalar ile yapılan pürüzlendirme uygulamaları için tahmin edilen ESDY değerinin 0,9 ile 3,8 milyon aralığında kaldığı görülmüştür. Diğer taraftan cüruf kullanılarak tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarına ait ESDY değerleri ise 3,0 ile 15,8 milyon aralığındadır. Cüruflardan EAF ile yapılan pürüzlendirme uygulamalarında 1-5 boyutunun finişer arkası uygulamaları; 1-3 boyutlu birin pas sonrası uygulamalara göre daha yüksek ömre sahip olduğu belirlenmiştir. Ferrokrom cüruflarının kullanıldığı deneme kesimlerinde ise 1-3 boyutunun birinci pas sonrası uygulamaları; 1-5 boyutlu finişer arkası uygulamalara göre daha yüksek ömre sahiptir. Bu durum EAF ile yapılan deneme kesimlerinde elde edilen sonucun tam tersi bir uygulamanın söz konusu olduğunu gösterir ve pürüzlendirme uygulamalarında kullanılan malzemenin önemini ortaya çıkaran bir sonuç olarak görülmesi gerekir.

İlk ölçüm sonuçlarına kıyasla diğer ölçüm sonuçlarında nasıl değiştiğini ortaya koyan analiz benzer analizler AB aşınma üzerinde yapılan pürüzlendirme

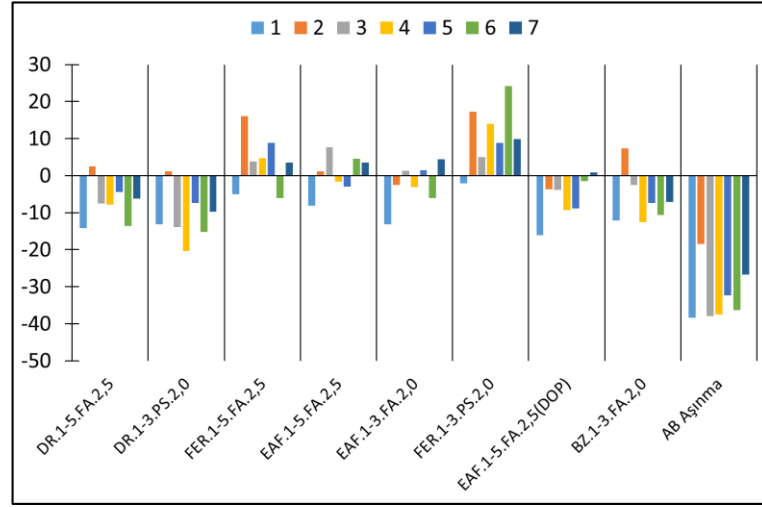
uygulamaları içinde yapılmıştır. Deneme kesimlerinden alınan ilk DFT ölçüm sonuçlarına göre değişim oranı diğer ölçümlerin hangi oranda değiştiğini gösteren analiz sonuçları Şekil 5.23' te verilmiştir.



Şekil 5.23. İlk ölçüm sonuçlarına göre DFT değişim oranı

Şekil 5.23' te ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarının hesaplandığı değerler de her bir kesimin (AB aşınma hariç) ölçüm sonuçlarının tümünde düzenli olmayan azalış görülmektedir. Pürüzlendirilmiş kesimler için ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde, BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu deneme kesiminde yaklaşık % 45 ile en yüksek, EAF.1-5.FA.2,5(DOP) kodlu deneme kesiminde ise % 30 ile en az azalma yönünde değişim oranı görülecektir. AB aşınma tabakası için ise ikinci ölçümde % 10 oranında bir artış yönünde değişim görülmüş, diğer ölçümlerdeki DFT kayma direnci katsayılarında değerlerinde % 35' e kadar düşüş belirlenmiştir. AB aşınma tabakasına ait ilk ve son ölçümler arasında değişim oranı azalış yönünde yaklaşık % 30 olarak hesaplanmıştır.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimi, KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış hali ve bu kesimin inşasında kullanılan bitümün % 0,2 oranında DOP katkılı olduğu daha önce ifade edilmişti. Bu tez kapsamında farklı agrega parametreleri ile sahada uygulanan alternatiflerin kayma direnci performanslarının BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesim performansı ile karşılaştırmak için yapılan fark analizi sonuçları Şekil 5.24' te sunulmuştur.

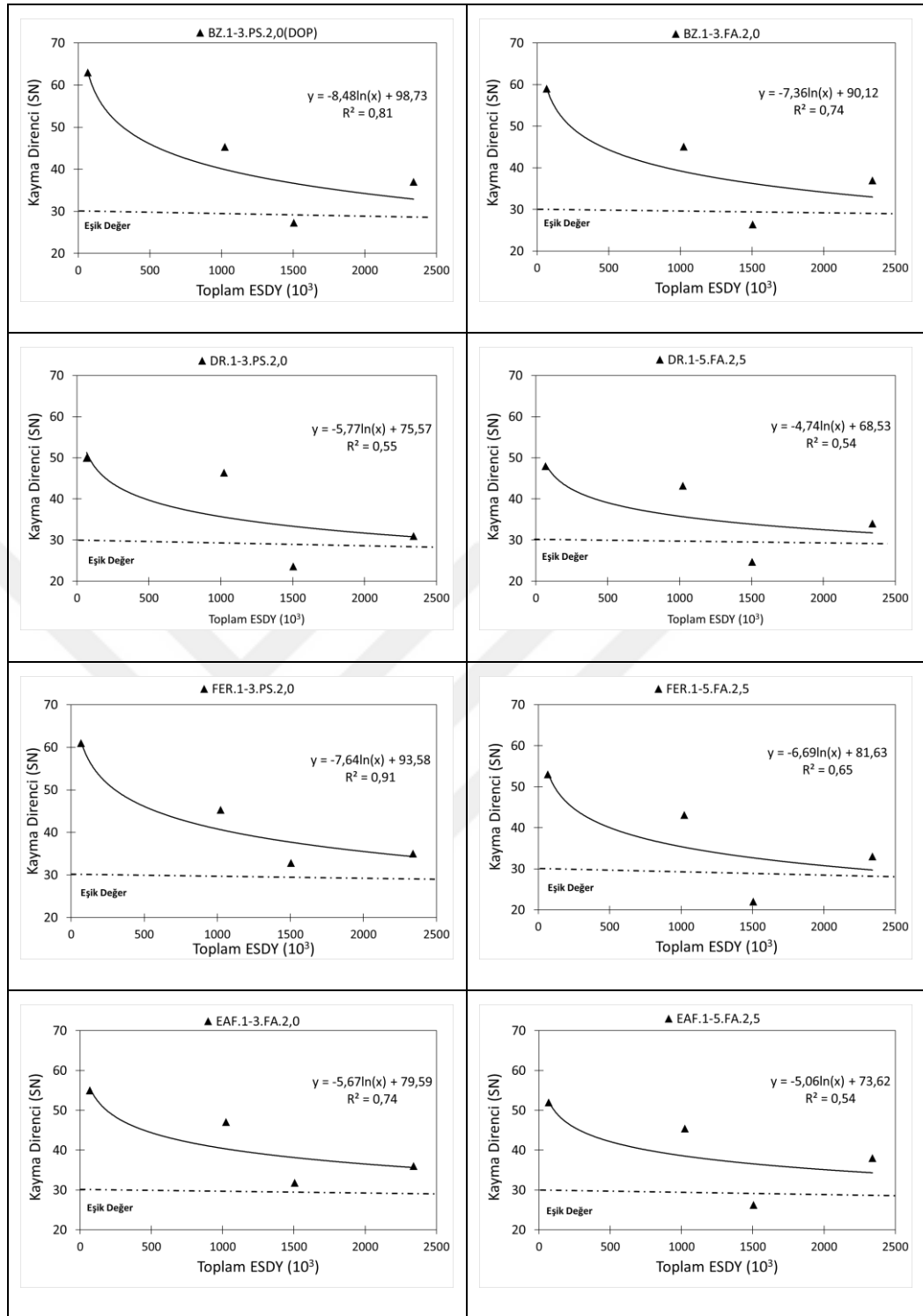


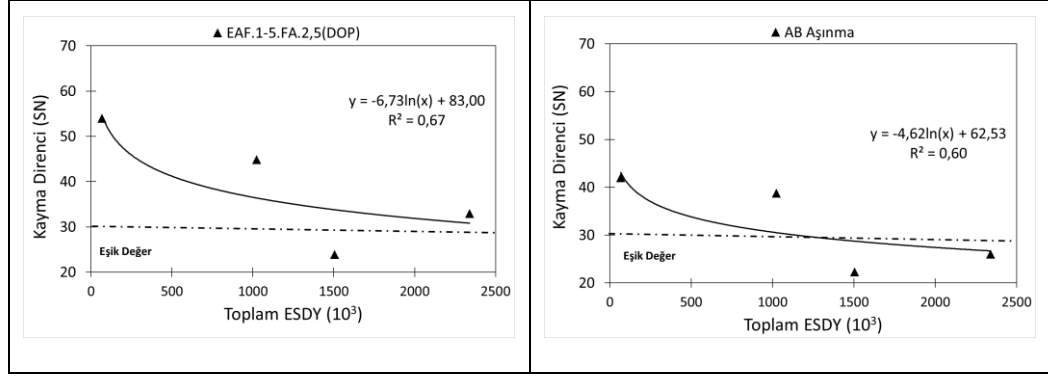
Şekil 5.24. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın performansı ile buna alternatif olarak araştırılan uygulamaların performansı arasındaki farkı gösteren ve Şekil 5.24' te verilen analiz sonuçları BPN' de olduğu gibi her ölçüm için ayrı ayrı yapılmıştır. KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamaya kıyasla diğer tüm alternatifler uygulamaların birkaç farklı saha ölçümünde üstün performans gösterdiği görülmüştür. İlk ölçüm haricinde FER.1-3.PS.2,0 kodlu deneme kesimi KTŞ' de tanımlana DOP' lu uygulamaya % 5 ile % 25 arasında değişen oranlarda daha yüksek kayma direncine sahip olduğunu belirtmek yerinde olacaktır. AB aşınma tabakasının kayma direnci performansının KTŞ' de tanımlanan kıstaslar uygun yapılmanın yanı sıra DOP katkılı bitüm ile kaplaması hazırlanmış ve pürüzlendirilmiş kesime göre % 40' a kadar daha düşük olduğu söylenebilir.

5.3.3. LWSRT kayma direnci analizi

ESDY ve LWSRT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.25' te verilmiştir.





Şekil 5.25. AB aşınma üzerinde SN ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.25’ teki grafiklerden AB aşınma üzerinde her bir kesim için ESDY bağlı 64 km/s hıza karşılık gelen LWSRT kayma direnci değişimini veren grafikler, pürüzlendirilmiş kesimlere ait kayma direnci (SN) değerlerinin TMA aşınma tabakası üzerinde olduğu gibi yaklaşık olarak 30 ile 70 arasında değiştiği görülmektedir. Ancak, AB aşınma tabakasında SN değerleri ise 20 ile 40 arasındadır. Verilen grafiklerden deneme kesimlerinde farklı zaman dilimine tekabül eden ölçüm sonuçlarında yükselişler olmuştur. Bu durumun nedeni önceki çalışmalarda da dile getirildiği üzere (Bazlamit ve Reza, 2005; Gökalp ve Uz, 2017a; Mccullough ve Hankins, 1966; Schulze vd., 1977) operatörün ölçüm alınma sırasında karar alma zamanına bağlılığı, yolun herhangi bir yerinde boyuna ölçümlerin yapılması, sürücü koordinasyonu vb. gibi faktörlerin etkisi altında ölçümden kaynaklanmasıdır. Diğer neden mevsimsel faktörlerin etkisidir. Yolun yapıldığı güzergâh tarım arazilerinin arasından geçmekte ve ölçüm zamanında hasat vakti nedeniyle tarım araçlarının arazilerinden çıkarak yola bıraktığı çamur, toz veya tarım ürünlerinin yüklendikleri araçlardan düşerek yol üzerinde bıraktıkları ile oluşan kirliliğin etkisi olduğudur. Bir başka deyişle pürüzlendirilmiş kesimlerin kayma direnci performans değerlendirmelerini yapmak için seçilmiş üç farklı metot içerisinde LWSRT’ in en yüksek ölçüm belirsizliğine sahip metot olduğu söylenebilir. En iyi ölçüm modeli katsayısı (R^2) logaritmik fonksiyonla temin edildiğinden ESDY ve LWSRT ile tüm kesimler elde edilen SN değerleri arasındaki için de logaritmik fonksiyon kullanılmıştır. Pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY ve SN arasındaki ölçüm modeli katsayıları 0,54 ile 0,91 arasında değişmektedir. Ancak, AB aşınma için bu değer 0,60 olarak bulunmuştur.

BPT, DFT ölçümlerinde olduğu gibi LWSRT ölçümleri içinde tezin “**2.4.5. Kaplama kayma direncinde eşik değerler**” bölümünde verilen yol güvenliğini temini edecek yüzeyinin kayma direnci eşik değerleri farklı çalışmalarda tanımlandığı gibi başka ülke şartnamelerinden yer bulmuştur. Burada, kayma direnci açısından yol güvenliği temin edecek SN eşik değerinin çoğunlukla 30 ile 40 arasında seyrettiği görülmektedir. Bu tez kapsamında ESDY tabanlı ömür analizinde SN 30 kayma direnci (SN₃₀) değeri eşik değer kabul edilmiş ve buna karşılık gelen tahmini ESDY değerleri her bir kesim için belirlenmiştir (Çizelge 5.16).

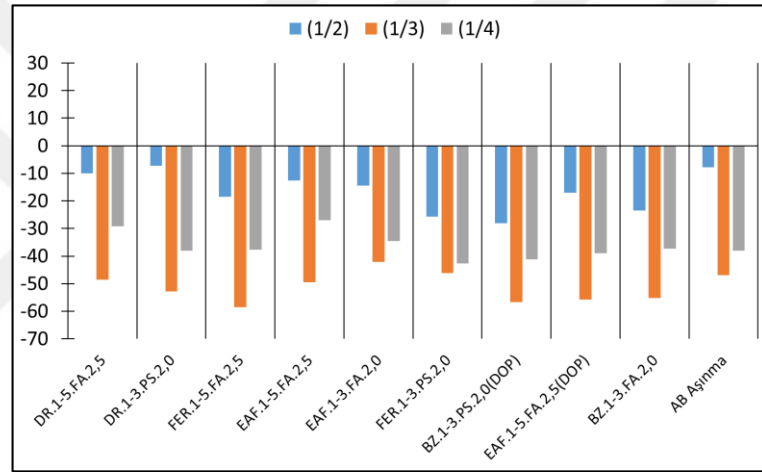
Çizelge 5.16. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan SN tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -4,74 \ln(x) + 68,53$	0,54	3,4
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = -5,77 \ln(x) + 75,57$	0,55	2,7
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = -6,69 \ln(x) + 81,63$	0,65	2,5
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = -5,06 \ln(x) + 73,62$	0,54	5,5
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -5,67 \ln(x) + 79,59$	0,74	6,3
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -7,64 \ln(x) + 93,58$	0,91	4,1
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -8,48 \ln(x) + 98,73$	0,81	3,3
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -6,73 \ln(x) + 83,00$	0,67	2,6
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -7,36 \ln(x) + 90,12$	0,74	3,5

Çizelge 5.16’ da verilen ve pürüzlendirilmiş kesimler için ESDY cinsinden yapılan analiz sonuçlarının, farklı pürüzlendirme uygulamaları için farklı ömür değerlerine sahip olduğu aşikârdır. Doğal agregalar ile yapılan pürüzlendirme uygulamaları için tahmin edilen ESDY değerinin 2,7 ile 3,5 milyon aralığında kaldığı görülmüştür. Diğer taraftan cüruf kullanılarak tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarına ait ESDY değerleri ise 2,5 ile 6,3 milyon aralığındadır. DFT sonuçlarının tersine EAF ile yapılan pürüzlendirme uygulamalarında 1-5 boyutunun finişer arkası uygulamaları; 1-3 boyutlu birin pas sonrası uygulamalara göre daha düşük bir ömre sahip olduğu görülmüştür. Ferrokrom cüruflarının kullanıldığı deneme kesimlerinde DFT ölçümlerinde

belirlendiği üzer 1-3 boyutunun birinci pas sonrası uygulamaları; 1-5 boyutlu finişer arkası uygulamalara göre daha yüksek ömre sahiptir. Bu durum pürüzlendirme uygulamalarında kullanılan malzemenin ve değerlendirme yapılacak deney yönteminin önemini ortaya koymaktadır.

İlk ölçüm sonuçlarına kıyasla diğer ölçüm sonuçlarında nasıl değiştiğini ortaya koyan analiz benzer analizler AB aşınma üzerinde yapılan pürüzlendirme uygulamaları içinde yapılmıştır. Deneme kesimlerinden alınan ilk SN ölçüm sonuçlarına göre değişim oranı diğer ölçümlerin hangi oranda değiştiğini gösteren analize dair sonuçlar Şekil 5.26' da verilmiştir.

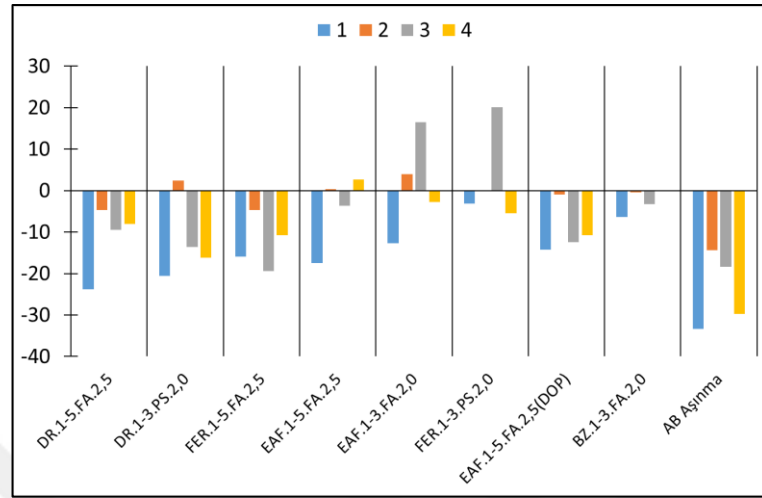


Şekil 5.26. İlk ölçüm sonuçlarına göre SN değişim oranı

Şekil 5.26' da ilk ölçüm sonuçlarına göre deneme kesimlerinin değişim oranlarının hesaplandığı değerlerde her bir kesimin (AB aşınma hariç) ölçüm sonuçlarının tümünde düzenli olmayan azalış görülmektedir. Pürüzlendirilmiş kesimler için ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde, değişim oranının yaklaşık % 10 ile %60 arasında görülecektir.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimi, KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış hali olmakla beraber kaplama inşaatında kullanılan bitümün % 0,2 oranında DOP katkısı ile karıştırılmıştır. Bu tez kapsamında sahada uygulanan alternatiflerin SN tabanlı kayma direnci performanslarının BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesime göre performanslarının

ortaya konulup bir karşılaştırmak yapmak için fark analizi yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.27' de sunulmuştur.

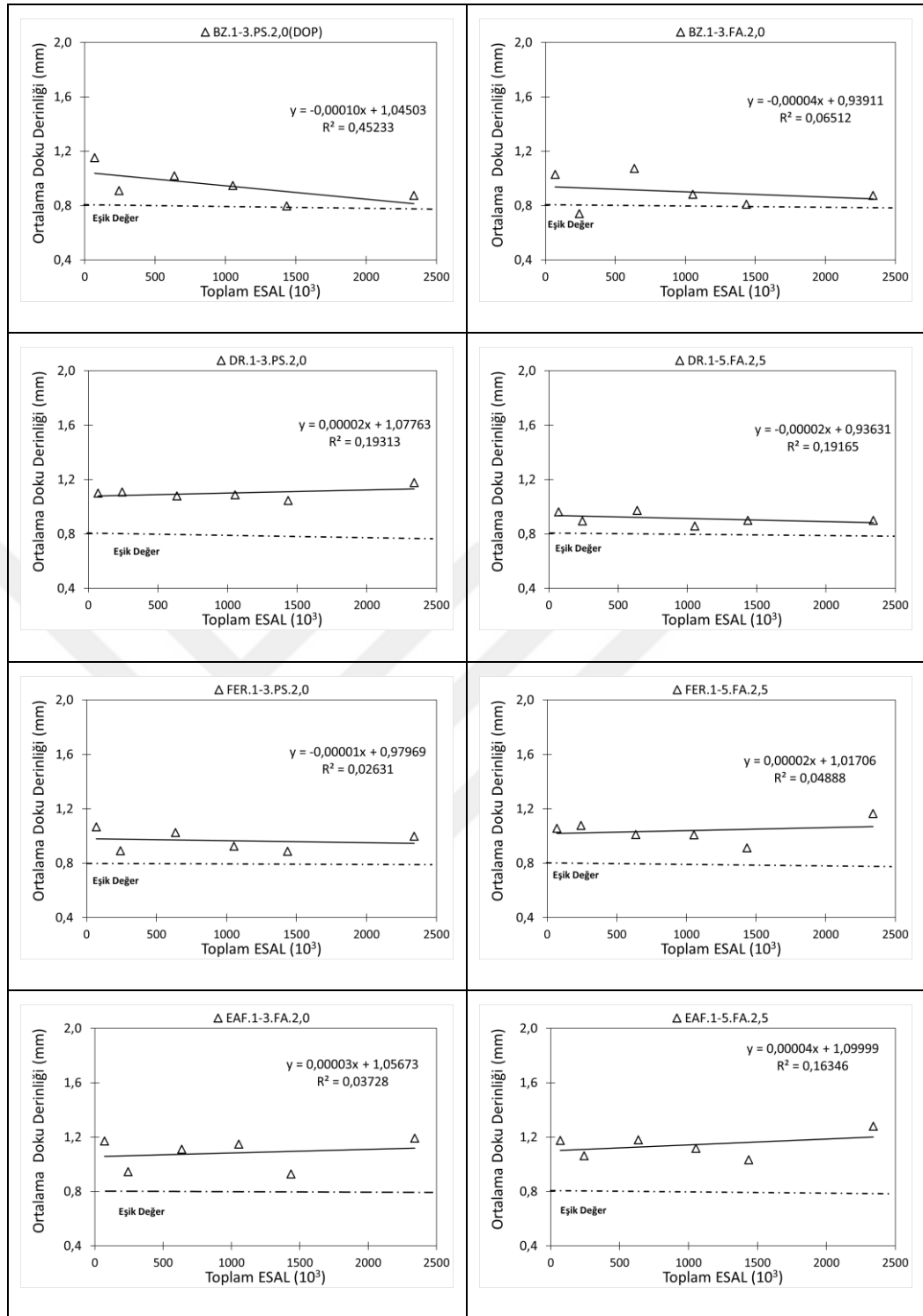


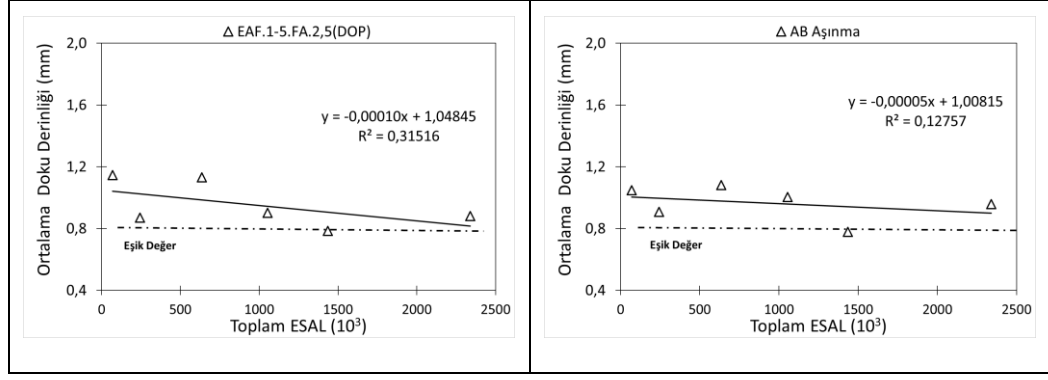
Şekil 5.27. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın ile alternatif olarak araştırılan pürüzlendirme uygulamalarının performansı arasındaki farkı ortaya koyan Şekil 5.27' deki analiz sonuçları negatif farkların çokluğunu göstermekte bu da KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre alternatifler daha düşük performanslı olduğunu ifade etmektedir. Diğer taraftan pozitif farkların olduğu ölçümlerde ise alternatif kesimlerin kayma direnci performansı KTŞ' de tanımlanan uygulamanın performansına göre daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Pürüzlendirilmiş uygulamalar içerisinde negatif farkların en yüksek değeri yaklaşık % 25, pozitif farkların en yüksek değeri ise yaklaşık % 20 olarak görülmektedir. AB aşınma tabakasının kayma direnci performansının KTŞ' de tanımlanan kıstaslar uygun yapılmanın ancak kaplama imalatında DOP katkılı bitüm kullanılan kesim de ise tümüyle negatif farklar oluşmuş ve en yüksek negatif fark yaklaşık olarak % 35 belirlenmiştir.

5.3.4. SPT yüzey doku derinliği analizi

ESDY ve SPT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.28' de verilmiştir.





Şekil 5.28. AB aşınma üzerinde SPT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.28’ de AB aşınma üzerinde uygulanan farklı agrega parametreleri ile pürüzlendirilmiş her bir kesim ve AB aşınma yüzeyi için ESDY tabanlı SPT yüzey doku derinliği analiz grafiklerinden ortalama yüzey doku derinlik değerlerinin 1,2 ile 0,8 mm arasında olduğu görülmektedir. ESDY değerinin artışı ile deneme kesimlerinin yarısında ortalama yüzey doku derinlik değerlerinde düşüş, kesimlerin diğeri yarısında da hemen hemen ortalama yüzey dokusunun sabit kaldığıdır. Bu durumunun kaynağı nedeni, **5.2. TMA Aşınma Tabakası Analizleri** başlığı altında verilen **5.2.4. SPT yüzey doku derinliği analizi** kısmında ifade edildiği üzere ölçüm sürecinde farklı operatörlerin SPT testini sahada tatbik etmesi olarak öngörülmektedir. Yanı sıra zorlayıcı çevresel ve trafik koşullarından kaynaklı ölçüm hatalarının mümkün olabileceğini ifade etmek gerekir. Zira operatör bağımlı olan bu test yöntemi aynı zamanda çevresel faktörlere karşı oldukça hassas bir ölçüm yöntemidir (Hao vd., 2016; Uz ve Gökalp, 2017a).

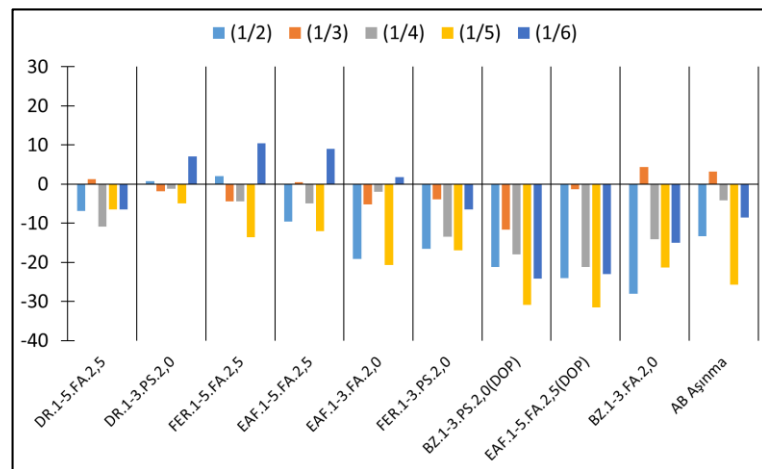
Tezin “**2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler**” bölümünde yüzey doku derinliği analizlerinde yolun kayma direnci ile ilişkilendirilen ve kullanıcıların güven içerisinde seyahat etmelerini destekleyecek ortalama yüzey doku derinliği için tanımlanan eşik değerleri 0,4 ile 0,8 mm arasında olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında ESDY tabanlı ömür döngüsü analizinde üst sınır olan 0,8 mm doku derinliği ($SPT_{0,8}$) eşik değeri tanımlanmıştır. Şekil 5.28’ deki grafiklerde verilen doğrusal denklemler kullanılarak $SPT_{0,8}$ değerine karşılık gelen tahmini ESDY’ ler Çizelge 5.17’ de olduğu gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.17. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan $SPT_{0,8}$ tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,00002x + 0,93631$	0,19	6,8
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = 0,00002x + 1,077763$	0,19	HUD
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = 0,00002x + 1,01706$	0,05	HUD
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = 0,00004x + 1,09999$	0,16	HUD
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = 0,00003x + 1,05673$	0,04	HUD
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,00001x + 0,97697$	0,03	17,7
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -0,00010x + 1,04503$	0,45	2,5
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -0,00010x + 1,04845$	0,32	2,5
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,00004x + 0,93911$	0,07	3,5
HUD: Hesaplamaya Uygun Değil				

Çizelge 5.17’ de verilen pürüzlendirilmiş kesimler için tahmin edilen ESDY tabanlı ömür sonuçlarından ESDY değeri kimi kesimler için hesaplanamadığı görülmektedir. Hesaplama yapılamayan kesimlerin pozitif yönlü bir modele sahip olduklarından eşik değere doğru bir eğilimi olmamaktadır. Bunların dışında kalan kesimler için tahmini ESDY değerleri 2,5 ile 17,7 milyon arasında değişmektedir.

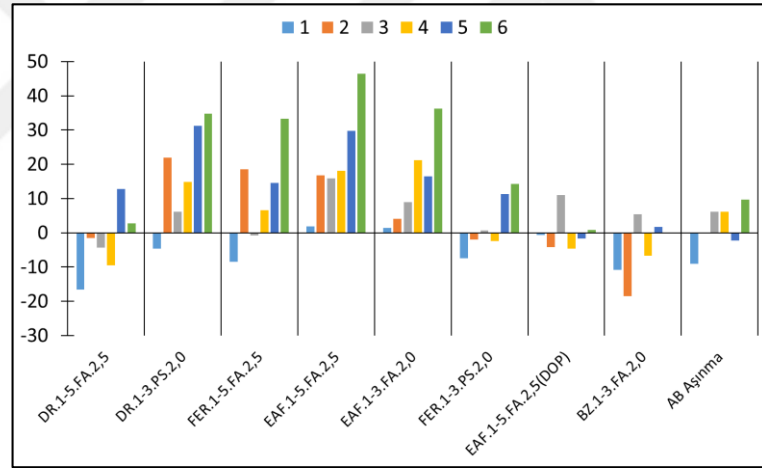
İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre değişim oranı belirten analiz sonuçları Şekil 5.29’ da verilmiştir.



Şekil 5.29. İlk ölçüm sonuçlarına göre SPT doku derinliği değişim oranı

Şekil 5.29' da ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarında düzenli olmayan artış veya azalışlar görülmektedir. Ancak genel olarak sürekli olmayan negatif değerler yani doku derinliğinin azalma yönünde değişim söz konusudur. Pürüzlendirilmiş kesimlerde ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde değişimi artış yönünde %10 azalış yönünde de %30'lara kadar bir aralıkta seyrettiği görülmektedir.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimi, KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış hali olmakla kaplama karışımında kullanılan bitüm % 0,2 oranında DOP katılarak elde edilmiştir. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesime göre alternatif uygulamaların yüzey doku derinliği değişimlerinin ortaya koymak için fark analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.30' da verilmiştir.

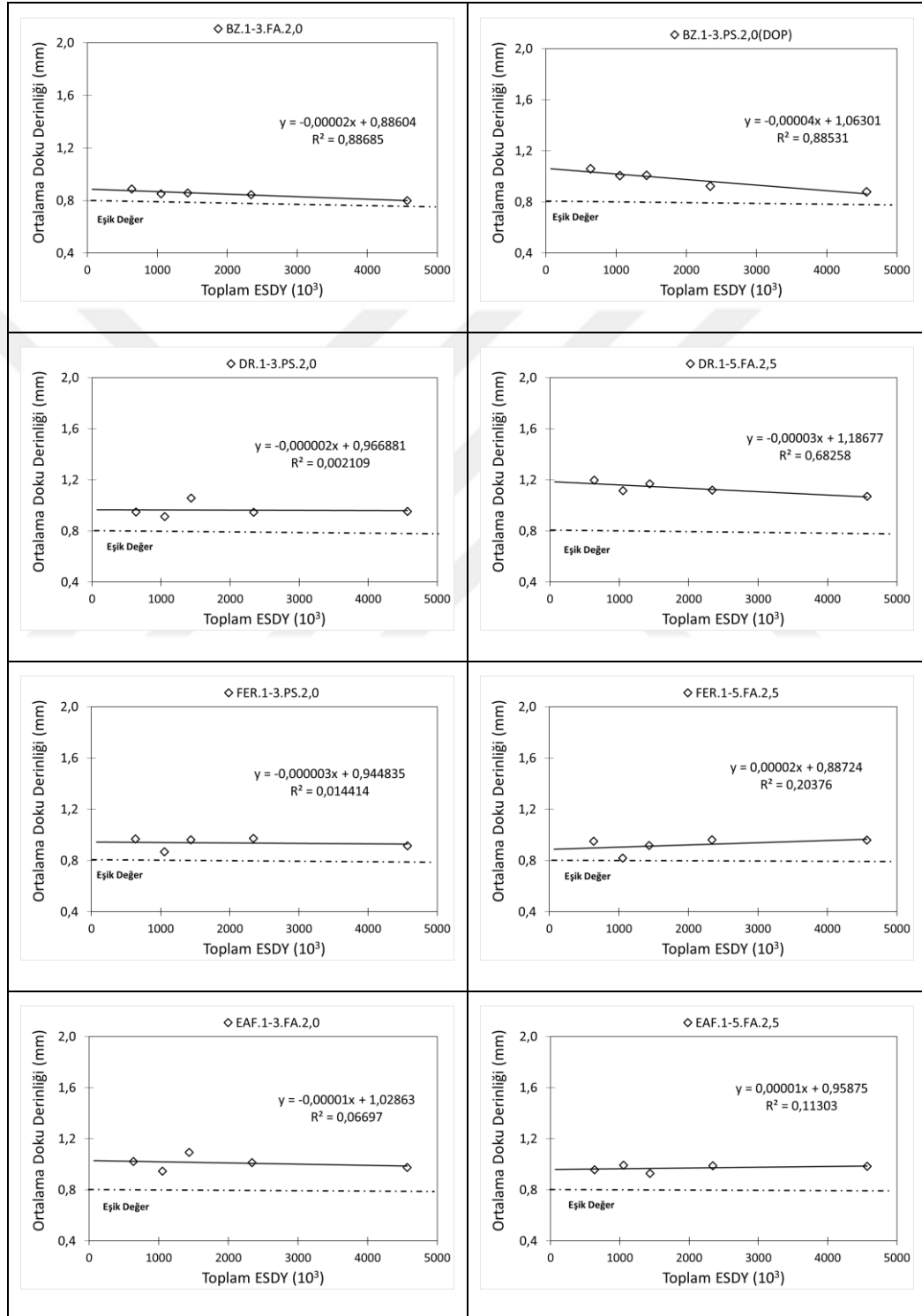


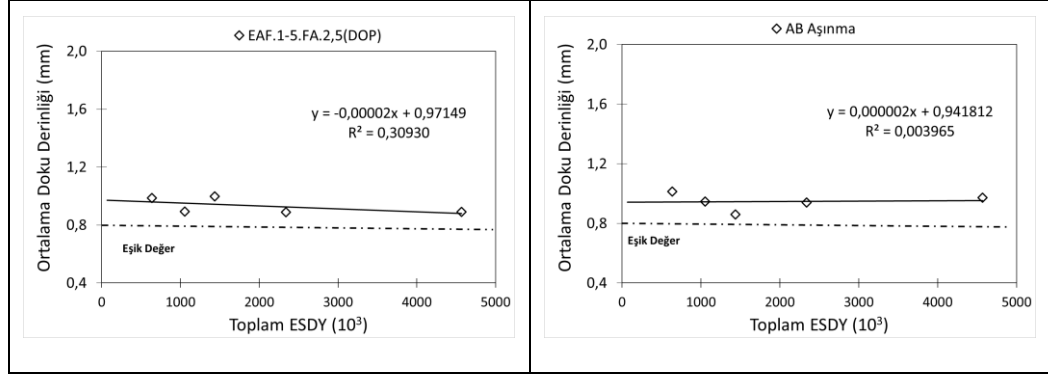
Şekil 5.30. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın ile buna alternatif olarak araştırılan pürüzlendirme uygulama kesimlerinin yüzey dokuları arasındaki farkları gösteren ve Şekil 5.30' da verilen analiz sonuçları pozitif farkların olduğu ölçüm tarihlerinde ilgili alternatif kesimlerin yüzey dokularının daha yüksek olduğunu göstermektedir. Artış oranının % 50' lere kadar çıkmakta iken azalış oranının ise en yüksek % 20' ler civarındadır. AB aşınma tabakasının yüzey dokusu üzerinde yapılan ölçümlerde, farklı ölçüm dönemlerinde olmak üzere, KTŞ' de pürüzlendirilmiş kesime göre % 10 artış ve % 10 azalış görülmüştür.

5.3.5. HT yüzey doku derinliği analizi

ESDY ve HT ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.31’ de verilmiştir.





Şekil 5.31. AB aşınma üzerinde HT doku derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.31' de AB aşınma üzerinde uygulanan farklı agrega parametreleri ile pürüzlendirilmiş her bir kesim ve AB aşınma yüzeyi için ESDY tabanlı HT yüzey doku derinliği analiz grafiklerinden SPT ölçüm sonuçlarında olduğu gibi ortalama yüzey doku derinlik değerlerinin 1,2 ile 0,8 mm arasında değiştiği görülmektedir. ESDY değerinin artışı ile deneme kesimlerinin yüzey dokularında artış, azalış ve durağanlık görmek mümkündür. Bu durumunun kaynağı nedeni, operatörlerin işaretlenmiş noktadan ölçümleri alamamasına veya cihazın kullanma prensibine göre operatörün testi sahada tatbik etmemesi olarak öngörülmektedir. SPT' de olduğu üzere zorlayıcı çevresel ve trafik koşulları altında alınan ölçümsel hataların mümkün olabileceğini ifade etmek gerekir (Hao vd., 2016; Uz ve Gökalp, 2017a). HT sonuçları ile ESDY arasındaki ölçüm modeli ortaya koymak için doğrusal eğriler kullanılmış ve eğrilerin ölçüm modeli katsayı (R^2) değerlerinin 0,89 ile 0,003 arasında belirlenmiştir.

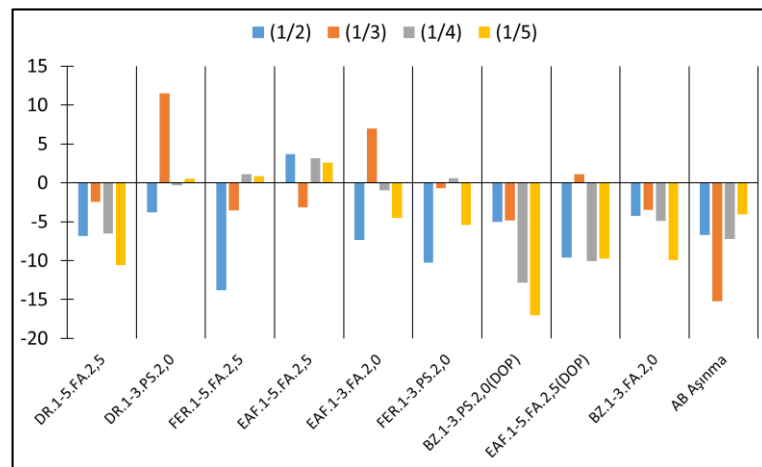
Tezin "**2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler**" bölümünde yüzey doku derinliği analizlerinde yolun kayma direnci ile ilişkilendirilen ve kullanıcıların güven içerisinde seyahat etmelerini destekleyecek ortalama yüzey doku derinliği için tanımlanan eşik değerleri 0,4 ile 0,8 mm arasında olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında SPT' de uygulandığı gibi ESDY tabanlı ömür döngüsü analizinde üst sınır olan 0,8 mm doku derinliği ($HT_{0,8}$) eşik değeri tanımlanmıştır. Şekil 5.31' deki grafikler üzerinde verilen ve doğrusal eğrilerle elde edilen denklemler kullanılarak $HT_{0,8}$ değerine karşılık gelen ESDY' ler Çizelge 5.18' de olduğu gibi hesaplanmıştır

Çizelge 5.18. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan $HT_{0,8}$ tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,00003x + 1,18677$	0,68	12,9
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,000002x + 0,966881$	0,002	>20,0
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = 0,00002x + 0,88724$	0,20	HUD
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = 0,00001x + 0,95875$	0,11	HUD
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,00001x + 1,02863$	0,07	>20,0
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,000003x + 0,944835$	0,14	>20,0
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -0,00002x + 0,88604$	0,89	4,3
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -0,00002x + 0,97149$	0,31	8,6
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,00004x + 0,93911$	0,07	3,5
HUD: Hesaplamaya Uygun Değil				

Çizelge 5.18’ de verilen pürüzlendirilmiş kesimler için tahmin edilen ESDY tabanlı ömür sonuçlarından ESDY değeri kimi kesimler için hesaplanamadığı görülmektedir. Hesaplama yapılamayan kesimlerin pozitif yönlü bir modele sahip olduklarından eşik değere doğru bir eğilimi olmamaktadır. Bazı kesimlerde 20 milyon ESDY’ yi aşan sonuçlar da görülmektedir. 20 milyonun altında değerler sahip kesimler için ESDY değerleri 3,5 ile 12,9 milyon arasındadır.

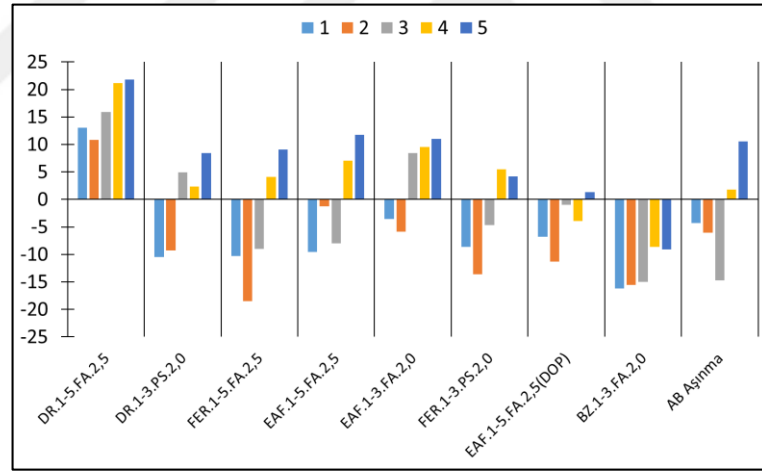
İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre değişim oranı belirten analiz sonuçları Şekil 5.32’ de verilmiştir.



Şekil 5.32. İlk ölçüm sonuçlarına göre HT doku derinliği değişim oranı

Şekil 5.32' de ilk ölçüm sonuçlarının referans olarak alındığı ve diğer ölçüm sonuçlarının ilk ölçüm sonuçlarına göre değişim oranlarında düzenli olmayan artış veya azalışlar görülmektedir. Pürüzlendirilmiş kesimlerde ilk ve son ölçüm sonuçları arasındaki değişim oranı incelendiğinde en yüksek doku kaybının BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimde yaklaşık % 15 ve en düşük doku kaybı ise EAF.1-3.FA.2,0 kodlu kesimde % 5 olarak bulunmuştur. İlk ölçüme göre daha yüksek doku derinliğinin görüldüğü son ölçüm sonuçları nadir olsa da görülmektedir.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimin KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının sahada uygulanmış hali olduğu daha önce çoğu kez ifade edilmişti. Nu kesimin kaplama karışımında kullanılan bitüm % 0,2 oranında DOP katılarak hazırlandı. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesime göre alternatif uygulamaların yüzey doku derinliği değişimlerinin ortaya koymak için fark analizi yapılmıştır ve sonuçlar Şekil 5.33' de verilmiştir.



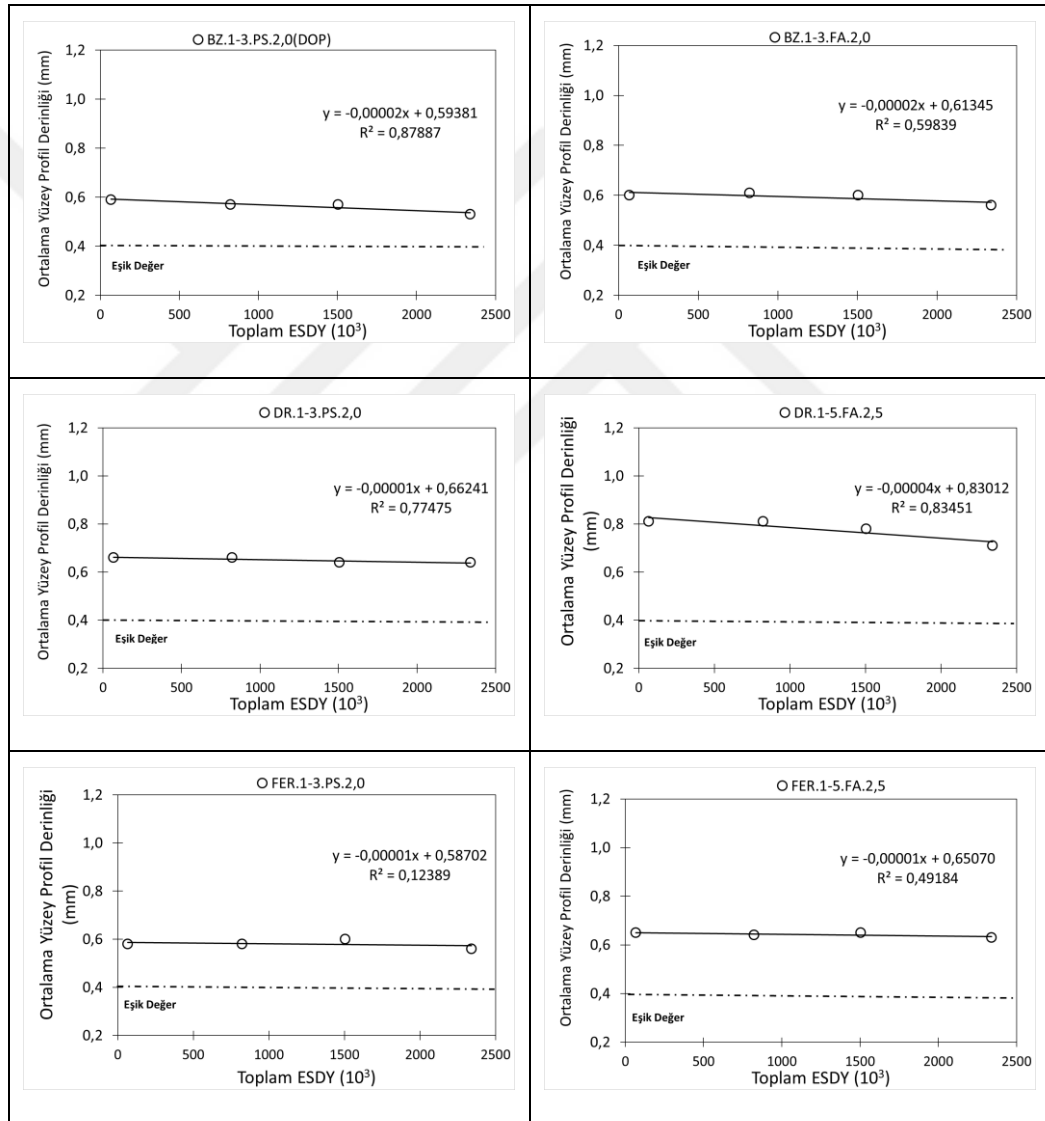
Şekil 5.33. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

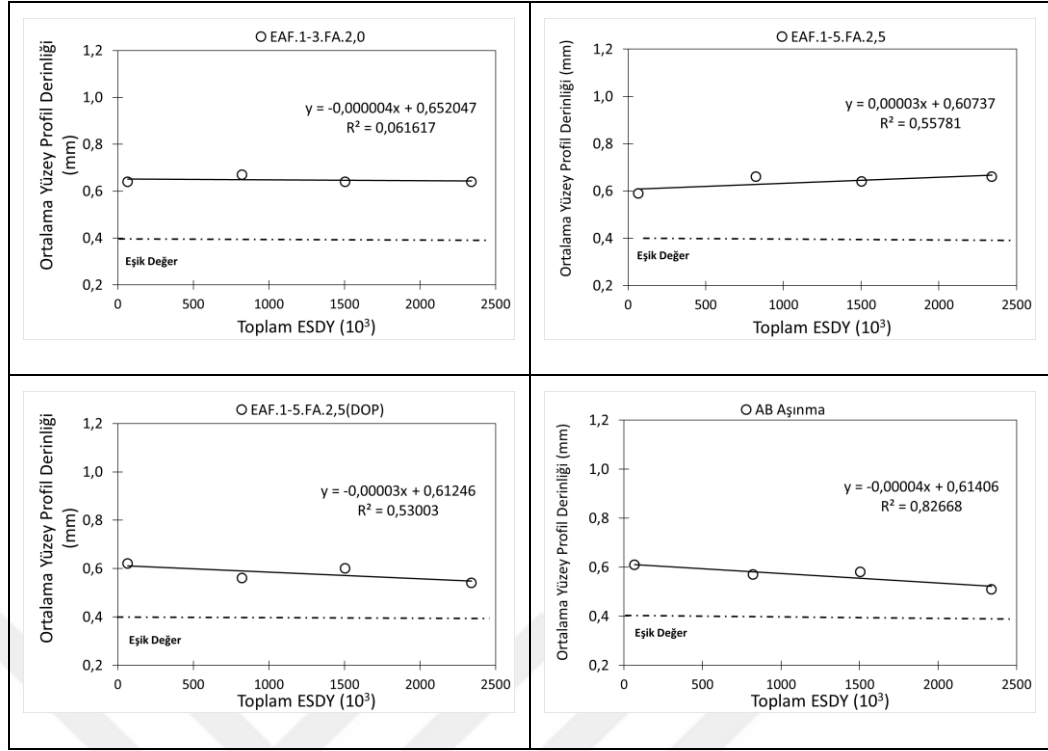
KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın ile buna alternatif olarak araştırılan uygulama kesimlerinin yüzey dokuları arasındaki farkı ortaya koyan sonuçların paylaşıldığı Şekil 5.33' de DR.1-5.FA.2,5 kesim için tüm ölçüm pozitif fark bulunmuştur. Dördüncü ve beşinci ölçümlerde neredeyse tüm alternatifleri yüzey dokusu KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha fazladır. DR.1-5.FA.2,5 kesimi hariç diğer tüm alternatif uygulamaların altıncı yani son ölçümde doku derinlik değerleri BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kesime göre daha düşük belirlenmiştir. AB

aşınma tabakasının doku derinlikleri ilk üç ölçümde KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha düşük, dördüncü ve beşinci ölçümleri daha yüksek ancak son ölçüm de ise yine daha düşük değerdedir.

5.3.6. LP yüzey profil derinliği analizi

ESDY ve LP ile elde edilen ölçüm sonuçları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik serisi Şekil 5.34' te verilmiştir.





Şekil 5.34. AB aşınma üzerinde LP profil derinliği ve ESDY arasındaki ilişki

Şekil 5.34' te verilen grafiklerinden ortalama yüzey profili derinlik değerlerinin 0,8 ile 0,5 mm arasında olduğu görülecektir. Pürüzlendirilmiş kesimlerden elde edilen LP sonuçları ile ESDY arasında bulunan ölçüm modeli katsayıları 0,06 ile 0,88 arasındadır. Ancak, TMA aşınma için ise 0,83 civarında bulunmuştur. ESDY artıkça profil derinliğinde HT ölçüm sonuçlarındaki eğilime benzer şekilde azalma meydana gelmiştir. Zira kimi kesimlerde pozitif korelasyonel ilişki bulunmuştur.

Tezin “2.3.5. Makro doku ölçümünde eşik değerler” bölümünde yüzey profil derinliği analizlerinde yolun kayma direnci ile ilişkilendirilen ve kullanıcıların güven içerisinde seyahat etmelerini destekleyen ortalama yüzey profil derinliği için eşik değerler tanımlanmıştır. İlgili kısımda verilen önceki çalışmalarda ve teknik şartnamelerde 0,4 ile 0,8 mm eşik değerlerinin çoğunlukla önerildiği görülen bir husustur. Bu nedenle tez kapsamında LP ölçüm sonuçları için ESDY ömür analizinde kullanılacak eşik değeri 0,4 mm ($LP_{0,4}$) olarak kabul edilmiştir. Şekil 5.34' deki grafiklerden üzerinde bulunan doğrusal eğrilerden elde edilen

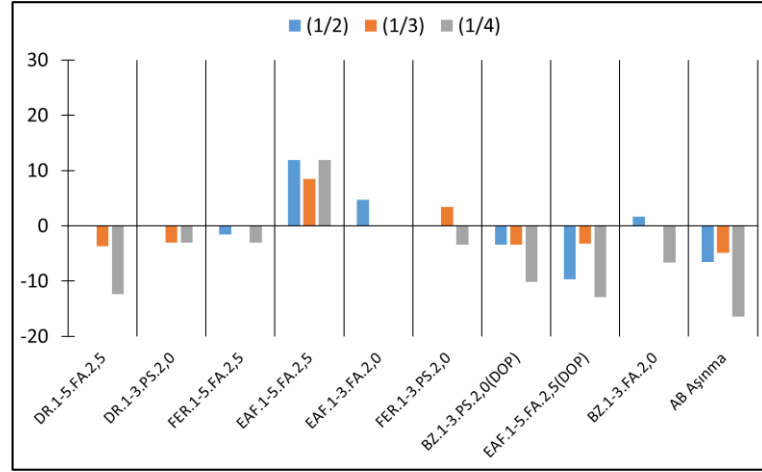
denklemler kullanılarak $LP_{0,4}$ değerine karşılık gelen ESDY' ler hesaplanmış sonuçlar Çizelge 5.19' da verilmiştir.

Çizelge 5.19. Pürüzlendirilmiş kesimler için hesaplanan $LP_{0,4}$ tabanlı ESDY

No	Deneme Kesimi Kodu	Ölçüm Modeli	R ²	ESDY Değeri (10 ⁶)
1	DR.1-5.FA.2,5	$y = -0,00004x + 0,83012$	0,83	10,8
2	DR.1-3.PS.2,0	$y = -0,00001x + 0,66241$	0,77	>20,0
3	FER.1-5.FA.2,5	$y = -0,00001x + 0,65070$	0,49	>20,0
4	EAF.1-5.FA.2,5	$y = 0,00003x + 0,60737$	0,55	HUD
5	EAF.1-3.FA.2,0	$y = -0,000004x + 0,652047$	0,06	18,4
6	FER.1-3.PS.2,0	$y = -0,00001x + 0,58702$	0,12	>20,0
7	BZ.1-3.PS.2,0(DOP)	$y = -0,00002x + 0,59381$	0,88	10,3
8	EAF.1-5.FA.2,5(DOP)	$y = -0,00003x + 0,61246$	0,53	7,1
9	BZ.1-3.FA.2,0	$y = -0,00002x + 0,61345$	0,59	10,7
HUD: Hesaplamaya Uygun Değil				

Çizelge 5.19' da verilen pürüzlendirilmiş kesimler için tahmin edilen ESDY tabanlı ömür sonuçlarından ESDY değeri EAF.1-5.FA.2,5 kesimi için hesaplanamadığı görülmektedir. Hesaplama yapılamayan EAF.1-5.FA.2,5 kodlu kesim pozitif yönlü bir modele sahip olduğundan eşik değere doğru bir eğilim olmamaktadır. Yanı sıra bazı kesimlerde 20 milyon ESDY' yi aşan sonuçlar da görülmektedir. ESDY tabanlı 20 milyonun altında değerler veren kesimler için tahmini ESDY değerleri 7,1 ile 18,4 milyon arasında değişmektedir.

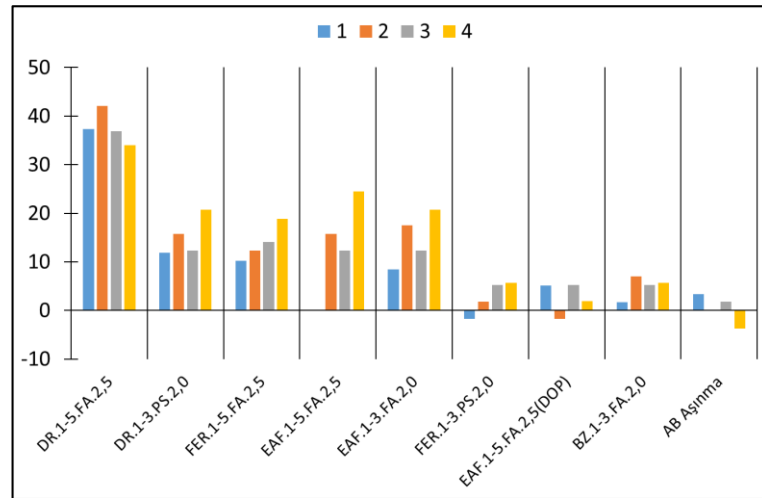
İlk ölçüm sonuçlarının referans olarak alınıp diğer ölçüm sonuçlarının buna göre değişim oranı belirten analiz sonuçları Şekil 5.35' te verilmiştir.



Şekil 5.35. İlk ölçüm sonuçlarına göre LP profil derinliği değişim oranı

Şekil 5.35’ te ilk ölçüm sonuçlarına göre tüm ölçümlerde daha yüksek profil derinliği veren uygulama EAF.1-5.FA.2,5 kodlu kesimde görülmektedir. Diğer pürüzlendirme uygulamalarının profil doku derinliklerinde ise genelde ilk ölçüme göre daha düşük değerler hesaplanmıştır. AB aşınma tabakasında ise ilk ölçüme göre diğer ölçüm değerlerinin düşük kalmıştır.

BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesimin KTŞ’ de tanımlanan pürüzlendirme uygulaması olduğu % 0,2 oranında DOP katılarak inşa edilmiş kaplama üzerinde yapıldığı daha önce ifade edilmişti. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) kodlu kesime göre alternatif uygulamaların yüzey profil derinliği değişimlerinin belirlemek için fark analizi yapılmıştır (Şekil 5.36).



Şekil 5.36. BZ.1-3.PS.2,0(DOP) ile alternatifler arasındaki fark

KTŞ' de tanımlanan DOP' lu uygulamanın ile buna alternatif olarak araştırılan uygulama kesimlerinin yüzey dokuları arasındaki farkı ortaya koyan sonuçların paylaşıldığı Şekil 5.36' da tüm alternatif pürüzlendirme uygulamalarının yüzey profil derinliklerini hemen hemen KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

5.4. Değerlendirme ve Karşılaştırma

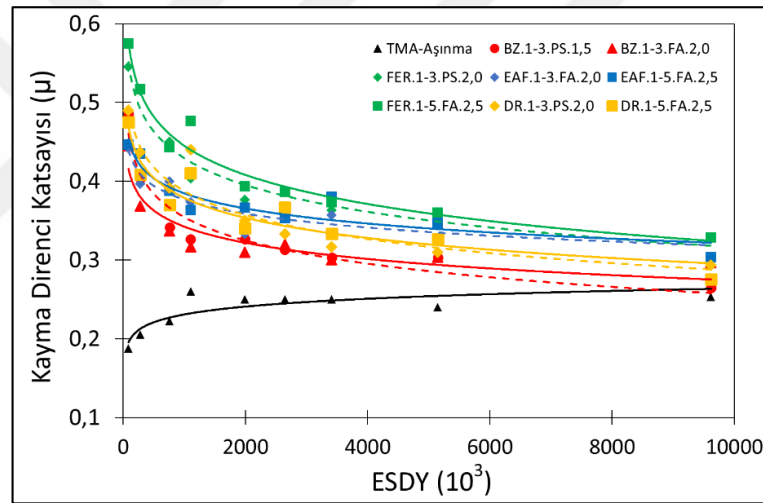
Bu tez kapsamında KTŞ' de tanımlanan pürüzlendirme uygulamasının araştırılması ve geliştirilmesi noktasında biri otoyol biri de devlet yolu olmak üzere iki farklı yol üzerinde farklı agrega parametreleri ile deneme kesimleri yapılmıştır. Her bir deneme kesiminin kayma direnci performansını ve yüzey dokusunda / profilinde meydana gelen değişimi ölçmek amacıyla farklı çalışma prensiplere sahip cihazlar kullanılmıştır. Tez süresince 26.10.2016 tarihinde trafiğe açılan O52 otoyolunda inşa edilen TMA aşınma kaplaması üzerinde son ölçümün yapıldığı 23.01.2021 tarihi itibari ile farklı tarihlerde olmak üzere toplamda on beş (15) adet saha ölçümü yapılmıştır. Diğer taraftan, 11.05.2017 tarihinde trafiğe açılan Mersin-Erdemli-Silifke devlet yolu üzerinde ise son ölçümün yapıldığı 24.01.2021 tarihi itibari ile toplam on (10) adet saha ölçümü yapılmıştır. Yapılan ölçümler ile TMA üzerinde dört (4) yılı aşkın, AB aşınma üzerinde ise yaklaşık üç buçuk (3,5) yılı aşkın süre deneme kesimlerinin kayma direnci performansı ve doku derinliğinde meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Tez kapsamında kullanılan her bir cihaz / yöntemin bir diğerine göre avantajlı ve dezavantajlı özellikleri olmaktadır. Zira bunlar bu tezin **2.3.4.Farklı doku ölçüm yöntemlerine ait güçlü ve zayıf yönler** ve **2.4.4. Farklı kayma direnci ölçüm yöntemlerinin karşılaştırılması** kısımlarında detaylıca sunulmuştur. Kayma direnci ölçümünde kullanılan cihazlardan DFT her defasında işaretlenmiş aynı noktadan ölçüm alınmasını sağlayan, çalışma prensibi itibari ile çevresel ve trafik koşullardan en az etkilenen ve operatör bağımlılığı en az olması sebebiyle TMA ve AB aşınma kayma direnci performans karşılaştırılmasında bu yöntem kullanılmıştır. Diğer taraftan yüzey doku derinliğinde meydana değişimlerin

değerlendirilmesinde DFT için yukarıda anılan avantajlara sahip olmasından dolayı hidrotimer-HT- (akış ölçer) testi kullanılmıştır. Bu ölçüm yönteminden elde edilen sonuçlar referans alınarak TMA ve AB aşınma yüzey doku derinliği karşılaştırılması yapılacaktır.

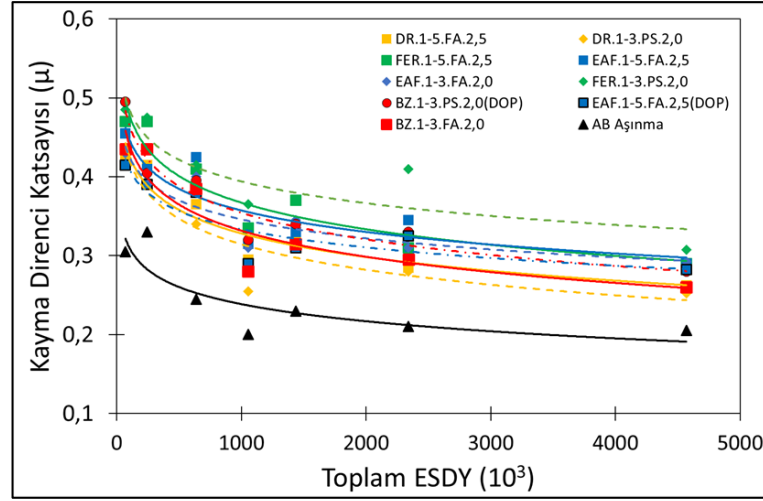
5.4.1. TMA ve AB aşınma kayma direnci performans karşılaştırılması

Tezin bu bölümünde DFT sonuçları üzerinden TMA ve AB aşınma tabakaları üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının kayma direnci performansı karşılaştırma ve değerlendirme yapılacaktır. Bu minvalde TMA aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları Şekil 5.37’ de, AB aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları ise Şekil 5.38’ de verilmiştir.



Şekil 5.37. TMA aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları

Gerek cüruf gerekse dere malzemesi kullanılarak yapılan uygulamaların kayma direnci performansları KTŞ’ de tanımlanan uygulamaya göre belirgin şekilde üstünlüğü Şekil 5.37’ de görülmektedir. Pürüzlendirme uygulama malzemesi değişkeni üzerinden iyiden başlanarak bir sıralama tabi tutulursa: (1) Ferrokrom cürufu, (2) EAF cürufu, (3) dere malzemesi ve (4) bazalt sıralaması oluşur. Boyut üzerinden değerlendirilme yapıldığında 1-5 boyutunda malzemenin finişer arkasında uygulamalarının 1-3 boyutunda birinci pas sonrasında uygulandığı durumlara nazaran daha iyi bir performans gösterdiği ortaya konulabilir.

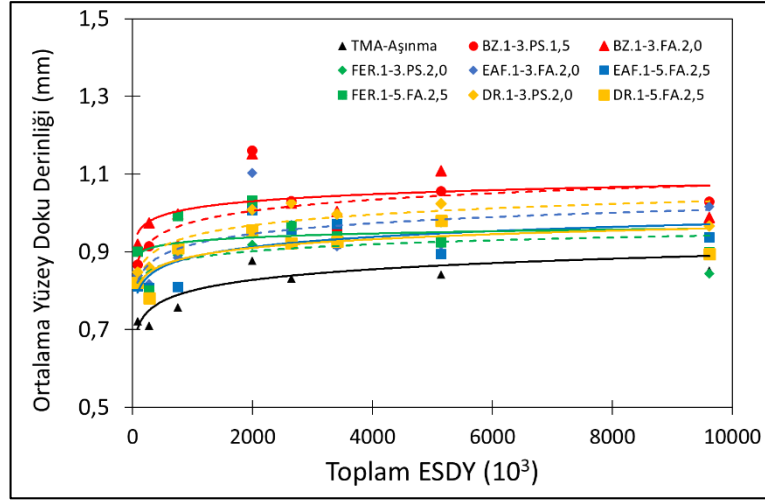


Şekil 5.38. AB aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları

Şekil 5.38’ de verilen AB aşınma tabakasında tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının kayma direnci performansları malzeme değişkeni üzerinden ele alındığında TMA’ da üzerinde tatbik edilenlerin durumuna benzer bir sonuç ile karşılanmaktadır. Zira cürufklar ile tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının kayma direnci performansı diğerlerine nazaran daha yüksek çıkmıştır. Pürüzlendirme malzemesi boyut açısından ele alındığında TMA’ da görülen durumun tersine 1-3 boyutunda malzeme ile birinci pas sonrası kullanıldığı uygulamalar daha iyi performans vermiştir. Her iki deneme yolunda da alternatif parametreler ile yapılan pürüzlendirme uygulamalarında KTŞ’ nin önermiş olduğu uygulamadan daha iyi performans elde edilmiştir.

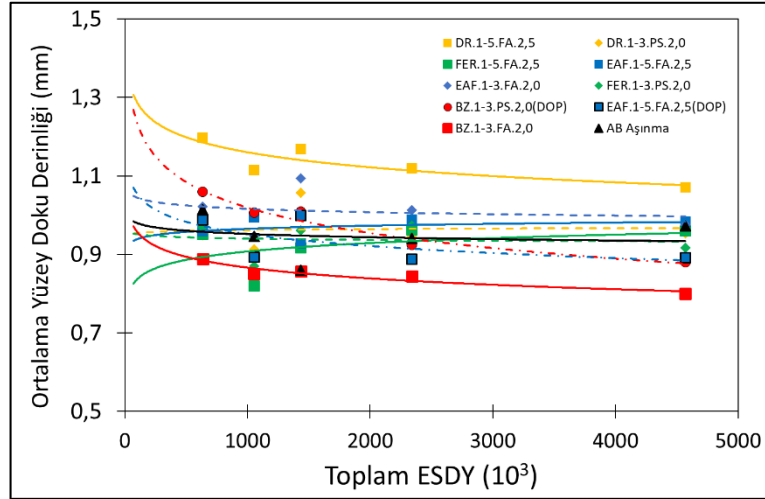
5.4.2. TMA ve AB aşınma yüzey doku derinliği karşılaştırılması

Tezin bu bölümünde HT sonuçları üzerinden TMA ve AB aşınma tabakaları üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının yüzey doku derinliğindeki değişimi karşılaştırma ve değerlendirme yapılacaktır. Bu minvalde TMA aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları Şekil 5.39’ da, AB aşınma ESDY tabanlı DFT kayma direnci toplu sonuçları ise Şekil 5.40’ ta verilmiştir.



Şekil 5.39. TMA aşınma ESDY tabanlı HT doku derinliği toplu sonuçları

Şekil 5.39’ da verilen grafikte TMA aşınma üzerinde tatbik edilen pürüzlendirme uygulamalarının ESDY tabanlı yüzey doku derinliği toplu sonuçları bütün kesimler için artan bir eğilimde olduğunu göstermektedir. Bu durum başlangıçta pürüzlendirme uygulamasının yüzey doku boşluklarının doldurduğu, sonrasında trafik ve çevre koşulları altında yüzeyden söküldüğüne işaret etmekte, yüzeyden sökülen malzemenin yüzeyde yeni bir doku oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 5.40. AB aşınma ESDY tabanlı HT doku derinliği toplu sonuçları

Şekil 5.40’ ta AB aşınma üzerinde oluşan doku değişimi TMA’ da gözlenenin tersine bir durum olduğu görülmektedir. Her uygulama kesimi için düzenli bir düşüş görünmese de genel eğilim doku derinliğinin azalması yönündedir.

Özellikle doğal agregalar ile üretilen kesimlerde bu durum daha net görülmektedir.

TMA ve AB aşınma tabakası imalatında kullanılan agrega gradasyonları farklıdır. Zira TMA aşınma tabakasında iri agrega oranı AB aşınma tabakasında görülenden daha yüksek bir değerdedir. Bu durum, başlangıç kaplama yüzeyinde oluşan doku derinliği etkilemektedir. TMA aşınma tabakasında doku derinliği daha yüksek değerdedir. Dolayısıyla pürüzlendirme uygulaması yapılan TMA kesimlerinde ilk etapta boşluklar dolmakta, sonrasında oluşan sökümler ile beraber artan bir doku durumu oluşmaktadır. AB aşınma tabakasında ise TMA' ya göre daha az dokulu yüzey pürüzlendirme malzemesi ile dolmakta, kalan ve kaplamaya yapışan pürüzlendirme malzemeleri yeni bir yüzey oluşturmaktadır. Trafik yükleri altında dokuyu oluşturan pürüzlendirme malzemelerinin sökülmesi ile beraber doku kaybının olduğu genel anlamda görülmektedir.

5.5. Özet ve Öneriler

KTŞ' ye 2013 yılında aşınma tabakalarının inşaatında kullanılacak yüksek cilalanma direncine agregaların bulunmaması veya temin etmede yaşanan zorluklar nedeniyle daha düşük cilalanma direnci sahip agregalar ile tabakaların inşa edilmesine izin verilmiştir. Ancak kaplama yüzeyinin yüksek cilalanma direncine sahip agregaların belli boyut, miktar ve zamanda serilmesini kapsayan ***"Pürüzlendirme Uygulaması"*** tanımlanmıştır. Bu şartnamede farklı agrega gradasyonu nedeniyle farklı yüzey doku özelliklerine sahip TMA ve AB aşınma tabakaları için aynı uygulama önerilmiştir. Sadece magmatik kökenli kayacın önerilmesi benzer veya daha yüksek cilalanma direnci sahip doğal veya diğer alternatif agregaların kullanımı önünde engel oluşturulmuştur. Aynı zamanda tek tip boyut, miktar ve uygulama zamanının takip edilmesinin şart koşulması ile de farklı doku özelliklerine sahip kaplamalarda farklı uygulamaların önü de kapatılmıştır.

Biri otoyol diğer devlet yolu üzerinde olmak üzere çok sayıda pürüzlendirme kesimi inşa edilmiş ve pürüzlendirme uygulamaların kayma direnci

performanslarında ve yüzey dokularında meydana gelen değişimler bu tez kapsamında farklı çalışma prensiplerine sahip cihazlar ile ölçülmüştür. Üç farklı kayma direnci (BPT, DFT, LWSRT) ve yine üç farklı doku / profil derinliği (SPT, HT, LP) ölçüm yöntemi kullanılarak saha verileri elde edilmiştir. TMA ve AB aşınma ve üzerinde uygulanan pürüzlendirilmiş kesimlerde tez süresince farklı tarihlerde olmak üzere sırasıyla 15 ve 10 adet saha ölçümleri yapılmış, milyonlarca satırı bulan veriler elde edilmiş, bu veriler işlenmiş ve analiz edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalara istinaden aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. KTŞ' de tanımlanan uygulama yetersizdir,
2. Alternatif uygulamalar KTŞ' de tanımlanan uygulamaya göre daha iyi sonuçlar vermiştir,
3. Cürufların kullanımı ile üretilen pürüzlendirilmiş kesimlerin kayma direnci performansı diğerlerine nazaran daha yüksektir,
4. Kaplama yüzey doku/profil özelliklerinde değişimler minimal ve kendini yenileyen bir durumdadır,
5. TMA ve AB aşınma kaplamalarında gözlenen performans ve değişim oranları aynı pürüzlendirme uygulaması için farklı çıkmaktadır,
6. Her bir malzemenin mikro dokusunun kayma direnci üzerinde etkili olduğu görülmüştür.
7. Her bir ölçüm yönteminden elde edilen sonuçlar birbirine göre farklı performans ve/veya değişim oranı vermektedir,
8. Pürüzlendirme uygulamasında kullanılan agrega miktarı etkisi diğerlerine nazaran daha azdır. Ancak, birim ağırlığı yüksek olan agregalarda üst limitten kullanımı daha uygun olduğu düşünülmektedir.
9. Pürüzlendirme malzemelerinin seçiminde sathi kaplama için agregalara uygulanması tavsiye edilen Vialit plaka yapışma ve soyulma testleri uygulanması agregaların kaplama yüzeyine ile olan uyumunu belirlemek için önemli bir husus olarak görülmüştür.
10. Cürufların kullanılacağı uygulamalarda, cüruflara çevresel etki analizi yapılması gerekmektedir.

11. TMA aşınma kaplamalarında pürüzlendirme uygulama parametreleri kullanılan agrega türünden bağımsız olarak; 1-5 mm boyutunda, Finişer arkasında ve 2,0 kg/m² (doğal agrega), 2,5 kg/m² (cüruf) miktarında şekilde uygulanması önerilmektedir.
12. AB aşınma kaplamalarında pürüzlendirme uygulama parametreleri kullanılan agrega türünden bağımsız olarak; 1-3 mm Birinci Pas sonrası veya 1-5 mm boyutunda Finişer arkasında ve 2,0 kg/m² (doğal agrega), 2,5 kg/m² (cüruf) miktarında şekilde uygulanması önerilmektedir. Ayrıca bazalt agregası ile yapılacak uygulamalarda soyulma açısından problemli bir agrega olması sebebiyle bitümde yapışma artırıcı olan DOP katkısının kullanılması önerilmektedir.
13. Bu tezde kapsamında KTŞ' de tanımlı olan pürüzlendirme uygulamasının farklı agrega parametreleri kullanılarak geliştirilebileceği, alternatif ve cilalanma direnci yüksek agregalar ile yapılan uygulamaların KTŞ' de tanımlı olan uygulamadan daha yüksek kayma direnci performans verebileceği görülmüştür.
14. Ülkemizde hala atıl halde bulunan cürufların, ulaştırma alanın bilimsel çalışmalara konu ve malzeme olmaktan öteye geçemediğini gerçeğini göz önünde bulundurursak, kilometrelerce yol uzunluğunu kapsayan gerçek bir saha uygulaması ile cürufların etkin ve efektif kullanılabilirliği bu tez çalışmasıyla ortaya konmuştur.
15. Kayma direnci gereksinimi yüksek yollara, düşey ve/veya yatay kurbalarda ve sık sık frenlemenin yapıldığı (dur-kalk) kavşak noktalarında cüruflar ile pürüzlendirme uygulamalarının yapılması önerilebilir. Bu şekilde, cürufların kullanımı ile kazanılacak çevresel ve ekonomik faydanın yanı sıra trafik kazalarının önüne geçerek toplumsal bir fayda da elde edilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdul-Malak, M.A.U., Papaleontiou, C.G., Fowler, D.W., Meyer, A.H., 1988. Investigation of the Frictional Resistance of Seal Coat Pavement Surfaces. Erişim Tarihi. 21.12.2019. <https://trid.trb.org/view/310310>
- Adams, J. M., Richard Kim, Y., 2014. Mean Profile Depth Analysis of Field and Laboratory Traffic-Loaded Chip Seal Surface Treatments. International Journal of Pavement Engineering, 15(7), 645-656.
- DMRB., 2004. Pavement Design and Maintenance. Pavement Maintenance Assessment Skid Resistance. Erişim Tarihi 21.12.2018. <https://www.thenbs.com/PublicationIndex/documents/details?Pub=HA&DocID=267278>
- Ahammed, M., Tighe, S., 2009. Early-Life, Long-Term, and Seasonal Variations in Skid Resistance in Flexible and Rigid Pavements. Journal of the Transportation Research Board(2094), 112-120.
- Akacem, M., Bouteldja, M., Cerezo, V., Hachichi, A., 2016. A Method to Use Local Low Performances Aggregates in Asphalt Pavements – An Algerian Case Study. Construction and Building Materials, 125, 290-298.
- Akçay, A., 2011, Causes of Traffic Accidents. Erişim Tarihi 30.12.2017, <https://aycaaksoy.wordpress.com/2011/04/26/cause-and-effect-essay/>
- Andriejauskasa, T., Vorobjovasa, V. Mielonasb, V., 2014. Evaluation of Skid Resistance Characteristics and Measurement Methods, Vol. 9, 1-8.
- Ansari, S., Akhdar, F., Mandoorah, M., Moutaery, K., 2000. Causes and Effects of Road Traffic Accidents in Saudi Arabia. Public Health, 114(1), 37-39.
- Arıkan Öztürk, E., 1998. Sathi Kaplamalarda Su Etkisi Altında Agrega İle Bitümlü Bağlayıcı Arasındaki Yapışma Yeteneğinin Kullanılan Malzemelere Bağlı Olarak İncelenmesi. Yapı Malzeme Teknik, İnşaat Malzemeleri İhtisas Dergisi , vol.4, 54-60.
- Arribas, I., Santamaría, A., Ruiz, E., Ortega-López, V., Manso, J.M., 2015. Electric Arc Furnace Slag and Its Use in Hydraulic Concrete. Construction and Building Materials, 90, 68-79.
- Aschuri, I., Yamin, A., 2011. The Use of By Product-Waste Materials on Road Pavement Conctruction in Indonesia. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies. Vol.8, 14p.
- Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., Shalabi, F. I., 2007. Use of Steel Slag Aggregate in Asphalt Concrete Mixes. Canadian Journal of Civil Engineering, 34(8), 902-911.
- ASTM E1911-09a, (2009), Standard Test Method for Measuring Paved Surface Frictional Properties Using the Dynamic Friction Tester, ASTM International, West Conshohocken

- ASTM E1960-07(2015), (2015), Standard Practice for Calculating International Friction Index of a Pavement Surface, ASTM International, West Conshohocken,
- ASTM E2157-15(2019), (2019), Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Properties Using the Circular Track Meter, ASTM International, West Conshohocken,
- ASTM E303-93(2018), (2018), Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester, ASTM International, West Conshohocken
- Ates, A., Kearey, P., Tufan, S., 1999. New Gravity and Magnetic Anomaly Maps of Turkey. *Geophysical Journal International*, 136(2), 499-502.
- Aworemi, J. R., Abdul-Azeez, I. A. ve Olabode, S. O. (2010). Analytical Study of the Causal Factors of Road Traffic Crashes in Southwestern Nigeria. *Educational Research*, 1(4), 118-124.
- Aziz, M., Hainin, M., Yaacob, H., Ali, Z., Chang, F.-L., Adnan, A. 2014. Characterisation and Utilisation of Steel Slag for the Construction of Roads and Highways. *Materials Research Innovations*, 18(6), 255-259.
- Aziz, M., Shokri, M., Ahsan, A., Liu, H., Tay, L., Muslim, N., 2015. An Overview on Performance of Steel Slag in Highway Industry. *Journal of Advanced Review on Scientific Research*, 5(1), 30-41.
- Baran, E., Lowe, R., 2011. Gritting For Improved Early Life Skid Resistance of Stone Mastic Asphalt Surfaces. 3rd International Surface Friction Conference, Safer Road Surfaces-Saving Lives, 15-18 May 2011, Gold Coast, 8p.
- Bazlamit, S.M., Reza, F., 2005. Changes in Asphalt Pavement Friction Components and Adjustment of Skid Number for Temperature. *Journal of Transportation Engineering*, 131(6), 470-476.
- Behiry, A.E.A.E.M., 2013. Evaluation of Steel Slag and Crushed Limestone Mixtures as Subbase Material in Flexible Pavement. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(1), 43-53.
- Bellopede, R., Marini, P., Karaca, Z., Gökçe, M.V., 2016. Relationship Between Slipperiness and Other Characteristics of Stones Used as Flooring Slabs. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(8), 04016049.
- Bessa, L.S., Branco, V.T.F.C. Soares, J.B., 2014. Evaluation of Polishing and Degradation Resistance of Natural Aggregates and Steel Slag Using the Aggregate Image Measurement System. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 385-405.

- Bitelli, G., Simone, A., Girardi, F., Lantieri, C., 2012. Laser Scanning on Road Pavements: A New Approach for Characterizing Surface Texture. *Sensors*, 12(7), 9110-9128.
- Buzatu, T., Talpoş, E., Petrescu, M.I., Ghica, V.G., Iacob, G., Buzatu, M., 2015. Utilization of Granulated Lead Slag as A Structural Material in Roads Constructions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(4), 707-717.
- Cachim, P.B., 2009. Mechanical Properties of Brick Aggregate Concrete. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1292-1297.
- Cafiso, S., Taormina, S., 2007. Texture Analysis of Aggregates for Wearing Courses in Asphalt Pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 8(1), 45-54.
- Cairney, P., Styles, E., 2005. A Pilot Study of the Relationship Between Macrottexture and Crash Occurrence. CR223. Erişim Tarihi 6.06.2019. https://www.infrastructure.gov.au/roads/safety/publications/2005/pdf/CR223_Text_Crash.pdf
- Cenek, P.D., Jamieson, N.J., 2005. Sensitivity of In-Service Skid Resistance Performance of Chipseal Surfaces to Aggregate and Texture Characteristics. *International Surface Friction Conference: Roads and Runways: Improving Safety Through Assessment and Design*, 1-4 May Christchurch, 23p.
- Chelliah, T., Stephanos, P., Shah, M., Smith, T., 2002. Developing a design policy to improve pavement surface characteristics, *Pavement Evaluation Conference*, 21-25 October, Roanoke, 19p.
- Chen, J.S., Lin, C.H., Stein, E., Hothan, J., 2004. Development of A Mechanistic-Empirical Model to Characterize Rutting in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(4), 519-525.
- Chu, L., Cui, X., Zhang, K., Fwa, T., Han, S., 2019. Directional Skid Resistance Characteristics of Road Pavement: Implications for Friction Measurements by British Pendulum Tester and Dynamic Friction Tester. *Transportation Research Record*, 2673(10), 793-803.
- Cui, X., Zhou, X., Lou, J., Zhang, J., Ran, M., 2015. Measurement Method of Asphalt Pavement Mean Texture Depth Based on Multi-Line Laser and Binocular Vision. *International Journal of Pavement Engineering*, 18(5), 459-471.
- Çabuk, A., 2010. Dünyada ve Ülkemizde Mikro Yüzey Uygulamalarının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, M.Sc Thesis, 169s, İstanbul
- Davis, R.M., 2001. Comparison of Surface Characteristics of Hot-Mix Asphalt Pavement Surfaces at the Virginia Smart Road. Virginia Polytechnic Institute and State University, M.Sc Thesis, 245, Blacksburg

- Do, M.T., Tang, Z.D., Kane, M., De Larrard, F., 2009. Evolution of Road-Surface Skid-Resistance and Texture Due to Polishing. *Wear*, 266(5), 574-577.
- Doty, R. N. (1975). Study of the Sand Patch and Outflow Meter Methods of Pavement Surface Texture Measurement in Surface Texture Versus Skidding: Measurements, Frictional Aspects, and Safety Features of Tire-Pavement Interactions. Ed. Rose, J. ASTM International, 42-61.
- Drüschner, L., Schäfe, V., 2005. Stone Mastic Asphalt. Erişim Tarihi 07.03.2016, <https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/07/sma-englversion.pdf>
- Dudziak, M., Lewandowski, A., Śledziński, M., 2014. Non-Typical Hazards in Road Traffic. *American Journal of Mechanical Engineering*, 2(7), 252-257.
- Dunn, B., 1996. What You Need to Know About Slurry Seal. *Better Roads*, 66(3), 21-25.
- Ech, M., Morel, S., Yotte, S., Breysse, D. Pouteau, B., 2009. An Original Evaluation of the Wearing Course Macrotexture Evolution Using the Abbot Curve. *Road Materials and Pavement Design*, 10(3), 471-494.
- Edwards, J.B., 1999. The Relationship Between Road Accident Severity and Recorded Weather. *Journal of Safety Research*, 29(4), 249-262.
- Egesi, N., Akaha, C.T., 2012. Engineering-Geological Evaluation of Rock Materials From Bansara, Bamenda Massif Southeastern Nigeria, as Aggregates for Pavement Construction. *Geosciences*, 2(5), 107-111.
- El-Assaly, A., Ellis, R., 2001. Evaluation of Recycling Waste Materials and By-Products in Highway Construction. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 8(4), 299-308.
- El-Desouky, A., 2018. Investigating the Effect of Temperature Variations on the Measured Airfield Pavement Skid Resistance. *Construction and Building Materials*, 161, 649-653.
- Fernandes, A., Neves, J., 2014. Threshold Values of Pavement Surface Properties for Maintenance Purposes Based On Accidents Modelling. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(10), 917-924.
- Fisco, N., Sezen, H., 2013. Comparison of Surface Macrotexture Measurement Methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(1), 153-160.
- Flintsch, G., de Leon, E., McGhee, K., Al-Qadi, I., 2003. Pavement Surface Macrotexture Measurement and Applications. *Journal of the Transportation Research Board (1860)*, 168-177.
- Florence, R.L., Southgate, H.F., 1970. Slurry Seal Maintenance Applications. Department of Highways of Kentucky. H-2-7. Erişim Tarihi 29.12.2017. https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1998&context=krc_researchreports

- Fronek, B.A., 2012. Feasibility of Expanding The Use of Steel Slag as A Concrete Pavement Aggregate. Cleveland State University, M.Sc Thesis, 205p, Cleveland, Ohio.
- Fwa, T.F., Yoong, C.C., Than, T.N., See, S.L., 2013. Development of Environmentally Sustainable Pavement Mix. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6(4), 440-446.
- Fwa, T., 2017. Skid Resistance Determination for Pavement Management and Wet-Weather Road Safety. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(3), 217-227.
- Fwa, T., Choo, Y. Liu, Y., 2004. Effect of Surface Macrotexture on Skid Resistance Measurements by the British Pendulum Test. *Journal of Testing and Evaluation*, 32(4), 1-6.
- Gatchalian, D., Massad, E., Chowdhury, A., Little, D., 2006. Characterization of Aggregate Resistance to Degradation in Stone Matrix Asphalt Mixtures. *Journal of the Transportation Research Board*. 1962 (1). 54-63.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W., Scott, J.H.J., Joy, D.C., 2017. *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Springer. 550p. New York.
- Gómez-Nubla, L., Aramendia, J., Fdez-Ortiz de Vallejuelo, S., Carrero, J.A., Madariaga, J.M., 2017. Focused Ultrasound Energy over Steel Slags as A Fast Tool to Assess Their Environmental Risk Before and After Their Reuse in Agriculture And Civil Constructions. *Microchemical Journal*, 132, 268-273.
- Goodman, S.N., 2009. Quantification of Pavement Textural and Frictional Characteristics Using Digital Image Analysis. Carleton University, Ph.D. Thesis, 324 p. Ottawa.
- Gökalp, İ., 2016. Laboratory Investigation of the Effects of Aggregate's Type, Size and Polishing Level to Skid Resistance Performance of Surface Coatings, Adana Science and Techology University, M.Sc, Thesis, 118 p. Adana,
- Gökalp, İ., Uz, V.E., 2017a. A Brief Overview on Pavement Skid Resistance and Measurement Methods, *International Advanced Researches and Engineering Congress* 16-18 November, Osmaniye, 1861-1866.
- Gökalp, İ., Uz, V. E., 2017b. Kaplama Yüzey Dokusu Karakteristik Özellikleri ve Makro Doku Ölçüm Yöntemleri. 7. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, 29-30 Kasım, Ankara, 365-374.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., 2017c. Pürüzlendirme Uygulamasının Kaplama Yüzeyi Makro Dokusu Üzerine Olan Etkisinin Araştırılması. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13(2), 545-554.

- Gökalp, İ. Uz, V.E., 2019. Thresholds for Pavement Surface Texture and Skid Resistance. 2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology, 10-12 October, Mersin, 744-749.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M., 2016. Testing the Abrasion Resistance of Aggregates Including By-Products by Using Micro Deval Apparatus with Different Standard Test Methods. *Construction and Building Materials*, 123, 1-7.
- Gökalp, İ., Uz, V.E., Saltan, M., Tutumluer, E., 2018. Technical and Environmental Evaluation of Metallurgical Slags as Aggregate for Sustainable Pavement Layer Applications. *Transportation Geotechnics*, 14, 61-69.
- Gransberg, D., Pidwerbesky, B., James, D. M., 2005. Analysis of New Zealand chip seal design and construction practices. First National Conference on Pavement Preservation, October 31–November 1, Kansas City, 3-15.
- Gransberg, D., Pidwerbesky, B., Stempok, R., Waters, J., 2005. Measuring chip seal surface texture with digital imagery. International Surface Friction Conference, Christchurch, 12p.
- Gransberg, D.D., James, D.M., 2005. Chip Seal Best Practices (Vol. 342) NCHRP Synthesis of Highway Practice. Erişim Tarihi: 12.07.2019, <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/155807.aspx>
- Haddock, J.E., O'Brien, J.P., 2013. Hot-Mix Asphalt Pavement Frictional Resistance as A Function of Aggregate Physical Properties. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 35-56.
- Hall, J., Smith, K.L., Titus-Glover, L., Wambold, J.C., Yager, T.J., Rado, Z., 2009. Guide for Pavement Friction. NCHRP Project, 1-43. Erişim Tarihi: 09.09.2019. <http://www.trb.org/Publications/Blurbs/161756.aspx>
- Hall, K.T., Correa, C.E., Carpenter, S.H., Elliot, R.P., 2001. Rehabilitation Strategies For Highway Pavements. National Cooperative Highway Research Program, Web Document, 35. Erişim Tarihi: 01.08.2020. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w35-a.pdf
- Hao, X., Sha, A., Sun, Z., Li, W., Zhao, H., 2016. Evaluation and Comparison of Real-Time Laser and Electric Sand-Patch Pavement Texture-Depth Measurement Methods. *Journal of Transportation Engineering*, 142(7), 04016022.
- Hayakawa, H., Fischbeck, P.S., Fischhoff, B., 2000. Traffic Accident Statistics and Risk Perceptions in Japan and the United States. *Accident Analysis & Prevention*, 32(6), 827-835.
- Hegmon, R.R., Mozoguchi, M., 1975. Pavement Texture Measurement and Evaluation," Surface Texture Versus Skidding, ASTM STP 583, pp. 3-17.

- Hicks, R., Dunn, K., Moulthrop, J., 1997. Framework for Selecting Effective Preventive Maintenance Treatments for Flexible Pavements. *Journal of the Transportation Research Board* (1597), 1-10.
- Hicks, R., Moulthrop, J., Daleiden, J., 1999. Selecting A Preventive Maintenance Treatment for Flexible Pavements. *Journal of the Transportation Research Board* (1680), 1-12.
- Hidayatiningrum, L.F., Suparma, L.B., 2011. Laboratory Investigation of Skid Resistance for Steel Slag Utilization as Chip Seal. *Jurnal Transportasi*, 11(1), 69-76.
- Híjar, M., Carrillo, C., Flores, M., Anaya, R., Lopez, V., 2000. Risk Factors in Highway Traffic Accidents: A Case Control Study. *Accident Analysis & Prevention*, 32(5), 703-709.
- Huang, C., 2010. Texture Characteristics of Unpolished and Polished Aggregate Surfaces. *Tribology International*, 43(1), 188-196.
- Huang, Y., Bird, R. N., Heidrich, O., 2007. A Review of the Use of Recycled Solid Waste Materials in Asphalt Pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58-73.
- Ihs, A., 2005. The Influence of Road Surface Condition on Traffic Safety and Ride Comfort. 6th International Conference on Managing Pavements 19-24 October 2004. Brisbane, 11-21.
- MRWA., 2010. Initial Skid Resistance of Stone Mastic Asphalt - Doc No. 71/06/1359. Materials Engineering Branch, Main Roads Western Australia.,
- MRWA 2017. Stone Mastic Asphalt, Specification 502. Government of WA, Main Roads Western Australia.
- Karaoğlu, R., 2019. The Effect of Material Damaged Traffic Accidents of Motor Land Vehicles on Country Economy, Bursa Uludağ Univestiy, M.Sc. Thesis, 42p. Bursa.
- Karasahin, M., Aktas, B., Gürer, C., 2011. Determining Precoated Aggregate Performance on Chip Seals Using Vialit Test. The Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington, 23-27 January. 9p.
- Katz, O., Reches, Z., Roegiers, J.-C., 2000. Evaluation of Mechanical Rock Properties Using A Schmidt Hammer. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), 723-728.
- Kavussi, A., Jalili Qazizadeh, M., Hassani, A., 2016. Fatigue Behavior Analysis of Asphalt Mixes Containing Electric Arc Furnace (EAF) Steel Slag. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 3(1), 74-86.

- Kayır, Y.Z., 2016. Steel Production in the World and in Turkey. 18th International Metallurgy & Materials Congress, 29 September-01 October, İstanbul. 889-893.
- Kehagia, F., 2009. Skid Resistance Performance of Asphalt Wearing Courses with Electric Arc Furnace Slag Aggregates. Waste Management & Research, 27(3), 288-294.
- Kelvin, L.Y.P., Fwa, T.F., Choo, Y.S., 2005. Effect of Pavement Surface Texture on British Pendulum Test. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6, 1247-1257.
- KGM., 2008. Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (A. Sağlık A. G. Güngör Eds.). Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 147s. Ankara.
- KGM., 2013a. Karayolları Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 525/4, Ankara.
- KGM., 2013b. Karayolları Teknik Şartnamesi Kısım 412. Bitümlü Bağlayıcılar. Karayolları Genel Müdürlüğü Yayınları, 525/4, Ankara.
- KGM., 2018. Karayolu Ulaşım İstatistikleri. Erişim Tarihi: 09.12.2020. <https://www.kgm.gov.tr/SiteCollectionDocuments/KGMdocuments/Yayinlar/YayinPdf/KarayoluUlasimIstatistikleri2019.pdf>
- KGM., 2019. Trafik Kazaları Özeti : 2019. Erişim Tarihi: 09.12.2020. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikKazalariOzeti.aspx>
- KGM., 2021. Trafik Hacim Haritaları. Erişim Tarihi. 02.01.2021 <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritasi.aspx>
- Khan, M.I., 1998. Performance Optimization and Modeling of Slurry Seal and Micro Surfacing Utilizing Steel Slag Aggregates. King Fahd University Of Petroleum & Minerals, M.Sc Thesis, 293p. Dhahran.
- Khan, M.I., Wahhab, H.A.-A., 1998. Improving Slurry Seal Performance in Eastern Saudi Arabia Using Steel Slag. Construction and Building Materials, 12(4), 195-201.
- Khasawneh, M., Smadi, M. Zelelew, H., 2016. Investigation of the factors influencing wavelet-based macrotexture values for HMA pavements. Road Materials and Pavement Design, 17(3), 779-791.
- Kim, Y.R., Lee, J., 2005. Optimizing Gradations for Surface Treatments. Final Report. NCDOT Research Project Number: 2004-04. 88p.
- Kogbara, R.B., Masad, E.A., Kassem, E., Scarpas, A., 2018. Skid Resistance Characteristics of Asphalt Pavements in Hot Climates. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 144(2), 04018015.

- Kogbara, R.B., Masad, E.A., Kassem, E., Scarpas, A.T., Anupam, K., 2016. A State-Of-the-Art Review of Parameters Influencing Measurement and Modeling of Skid Resistance of Asphalt Pavements. *Construction and Building Materials*, 114, 602-617.
- Krayushkina, K., Prentkovskis, O., Bieliatynskiy, A., Junevičius, R., 2012. Use of Steel Slags in Automobile Road Construction. *Transport*, 27(2), 129-137.
- Krutilová, K., Přikryl, R., 2017. Relationship Between Polished Stone Value (PSV) and Nordic Abrasion Value (A_N) of Volcanic Rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 76(1), 85-99.
- Kucharek, A.S., Keith Davidson, J., Moore, T., Linton, T., 2010. Performance Review of Micro Surfacing and Slurry Seal Applications in Canada. The CTAA Annual Conference Proceedings-Canadian Technical Asphalt Association, 26-29 September. Halifax, (55). 312-330.
- Kumar, P., 2014. Laboratory Base Pavement Surface Analysis Based on Materials Characterization. *International Journal of Emerging Trends in Science and Technology*, 1(7), 1182-1189.
- Kuttesch, J.S., 2004. Quantifying the Relationship Between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data. Virginia Polytechnic Institute and State University, M.Sc Thesis, 147p. Blacksburg.
- Lankarani, K.B., Heydari, S.T., Aghabeigi, M.R., Moafian, G., Hoseinzadeh, A., Vossoughi, M. (2014). The Impact of Environmental Factors on Traffic Accidents in Iran. *Journal of Injury and Violence Research*, 6(2), 64-71.
- Li, Q., She, X., Wang, K.C., Hall, K.D., 2010. Matter Element Analysis for Optimal Timing and Preventive Maintenance of Pavements. *Journal of Transportation Research Record*, 2150 (1), 18-27.
- Li, S., Zhu, K., Noureldin, S., Harris, D., 2005 Identifying Friction Variations with the Standard Smooth Tire for Network Pavement Inventory Friction Testing, *Journal of the Transportation Research Board*, 1905, 157-165.
- Lindenmann, H., 2006. New Findings Regarding the Significance of Pavement Skid Resistance for Road Safety on Swiss Freeways. *Journal of Safety Research*, 37(4), 395-400.
- Loprencipe, G. Cantisani, G., 2013. Unified Analysis of Road Pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics. *Modern Applied Science*, 7(8), 14p.
- Luce, A., Mahmoud, E., Masad, E. Chowdhury, A., 2007. Relationship of Aggregate Microtexture to Asphalt Pavement Skid Resistance. *Journal of Testing and Evaluation*, 35(6), 1-12.
- Mahboob Kanafi, M., Kuosmanen, A., Pellinen, T.K., Tuononen, A.J. 2015. Macro- and Micro-Texture Evolution of Road Pavements and Correlation with Friction. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(2), 168-179.

- Mamlouk, M.S., Zaniewski, J.P., 2006. *Materials for Civil and Construction Engineers* (3rd Ed.): Pearson Prentice. 582p. Hall Upper Saddle River, NJ.
- Manning, C.E., Bird, D.K., 1995. Porosity, Permeability, and Basalt Metamorphism. *Geological Society of America Special Papers*, 296, 123-140.
- Martino, M.M., Weissmann, J., 2008. Evaluation of Seal Coat Performance Using Macro-texture Measurements. Erişim Tarihi: 12.12.2019. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.248.5677&rep=rep1&type=pdf>
- Mataei, B., Zakeri, H., Zahedi, M., Nejad, F.M., 2016. Pavement Friction and Skid Resistance Measurement Methods: A Literature Review. *Open Journal of Civil Engineering*, 6(04), 537.
- Mauthoor, S., Mohee, R., Kowlessar, P., 2016. Characterisation of Electric Arc Furnace Slags as Concrete Aggregate in A Small Island Developing State: A Preliminary Study. *Construction and Building Materials*, 105, 459-464.
- Mayora, J.M.P., Piña, R.J., 2009. An Assessment of the Skid Resistance Effect on Traffic Safety Under Wet-Pavement Conditions. *Accident Analysis & Prevention*, 41(4), 881-886.
- Mccullough, B.F., Hankins, K.D. 1966. A Study of Factors Affecting the Operation of a Locked Wheel Skid Trailer. Erişim Tarihi: 12.12.2019. https://library.ctr.utexas.edu/digitized/texasarchive/thdresearch/45-3_txdot.pdf
- McHale, M., Roe, P., Millar, D., 2010. Improving the Performance of Asphalt Surfacing, 11th, International Conference on Asphalt Pavements, 1-6 August, Nagoya, 1174-1183.
- McPherson, E.G., Muchnick, J., 2005. Effect of Street ,Tree Shade on Asphalt Concrete Pavement Performance. *Journal of Arboriculture*, 31(6), 303-310.
- Meyer, W., 1991. Pavement Texture Significance and Measurement-Why Are Pavements Slippery When Wet? *ASTM Standardization News*, 19(2), 28-31.
- Mihok, L., Demeter, P., Baricova, D. Seilerova, K., 2006. Utilization of Ironmaking and Steelmaking Slags. *Metalurgija*, 45(3), 163-168.
- MIRO, 2018. Aggregate. Erişim Tarihi. 09.12.2018. <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Aggregate>
- Mladenovič, A., Turk, J., Kovač, J., Mauko, A., Cotič, Z., 2015. Environmental Evaluation of Two Scenarios for the Selection of Materials for Asphalt Wearing Courses. *Journal of Cleaner Production*, 87, 683-691.

- Moore, I. D., Grayson, R., Ladson, A., 1991. Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes*, 5(1), 3-30.
- Motz, H., Geiseler, J., 2001. Products of Steel Slags an Opportunity to Save Natural Resources. *Waste Management*, 21(3), 285-293.
- Msallam, M., Asi, I., Abudayyeh, D., 2017. Safety Evaluation (Skid Resistance) of Jordan's National Highway Network. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11(2), 165-174.
- MTA., 2019. Geological Map of Turkey, Erişim Tarihi. 09.09.2019. <http://www.mta.gov.tr>
- Murari, K., Siddique, R., Jain, K.K., 2015. Use of Waste Copper Slag, A Sustainable Material. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(1), 13-26.
- Nicholls, J.C., 1998. *Asphalt Surfacing*: 432 p. CRC Press. London.
- Nitta, N., Saito, K., Isozaki, S., 1990. Evaluating the Polishing Properties of Aggregates and Bituminous Pavement Surfaces by Means of the Penn State Reciprocating Polishing Machine. In W. Meyer & J. Reichert (Eds.), *STP1031-EB Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies*. 113-126.
- Oikonomou, N., Eskioglou, P., 2007. Alternative Fillers for Use in Slurry Seal. *Global NEST Journal*, 9(2), 182-186.
- Oluwasola, E.A., Hainin, M. R., Aziz, M.M.A., 2014. Characteristics and Utilization of Steel Slag in Road Construction. *Jurnal Teknologi*, 70(7), 117-123.
- Oluwasola, E.A., Hainin, M.R., Aziz, M.M.A., 2015. Evaluation of Asphalt Mixtures Incorporating Electric Arc Furnace Steel Slag and Copper Mine Tailings for Road Construction. *Transportation Geotechnics*, 2, 47-55.
- Ortiz, E.M., Mahmoud, E., 2014. Experimental Procedure for Evaluation of Coarse Aggregate Polishing Resistance. *Transportation Geotechnics*, 1(3), 106-118.
- Pakgohar, A., Tabrizi, R.S., Khalili, M., Esmaeili, A., 2011. The Role of Human Factor in Incidence and Severity of Road Crashes Based on the CART and LR Regression: A Data Mining Approach. *Procedia Computer Science*, 3, 764-769.
- Panagouli, O., Kokkalis, A., 1998. Skid Resistance and Fractal Structure of Pavement Surface. *Chaos, Solitons & Fractals*, 9(3), 493-505.
- Pasetto, M., Baliello, A., Giacomello, G., Pasquini, E., 2017. Sustainable Solutions for Road Pavements: A Multi-Scale Characterization of Warm Mix Asphalts Containing Steel Slags. *Journal of Cleaner Production*, 166, 835-843.

- PIARC., 1987. Report of the Committee on Surface Characteristics" XVIII World Road Congress. Erişim Tarihi: 05.05.2019. https://www.piarc.org/en/login.htm?path=/ressources/virtlib_actes/18/1987_E_17.pdf
- Postek, M.T., 1997. The Scanning Electron Microscope. Jon Orloff (Ed) Handbook of Charged Particle Optics, 363-399. CRC Press, 666p. London.
- Prapaitrakul, N., Freeman, T., Glover, C.J., 2005. Analyze Existing Fog Seal Asphalts and Additives: Literature Review. Erişim Tarihi: 21.01.2019. <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-5091-1.pdf>
- Praticò, F., Vaiana, R., 2013. A Study on Volumetric Versus Surface Properties of Wearing Courses. Construction and Building Materials, 38, 766-775.
- Praticò, F., Vaiana, R., 2015. A Study on the Relationship Between Mean Texture Depth and Mean Profile Depth of Asphalt Pavements. Construction and Building Materials, 101, 72-79.
- Praticò, F.G., Vaiana, R., Iuele, T., 2015. Macrotexture Modeling and Experimental Validation for Pavement Surface Treatments. Construction and Building Materials, 95, 658-666.
- Primavera, A., Pontoni, L., Mombelli, D., Barella, S., Mapelli, C., 2016. EAF Slag Treatment for Inert Materials' Production. Journal of Sustainable Metallurgy, 2(1), 3-12.
- Prowell, B., Hanson, D. (2005). Evaluation of Circular Texture Meter for Measuring Surface Texture of Pavements. Journal of the Transportation Research Board(1929), 88-96.
- Rado, Z., Kane, M., 2014. An Initial Attempt to Develop an Empirical Relation Between Texture and Pavement Friction Using the HHT Approach. Wear, 309(1), 233-246.
- Rezaei, A., Masad, E., Chowdhury, A., 2011. Development of A Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation. Journal of Transportation Engineering, 137(12), 863-873.
- Rezaei, A., Masad, E., Chowdhury, A., Harris, P., 2009. Predicting Asphalt Mixture Skid Resistance by Aggregate Characteristics and Gradation. Journal of Transportation Research Record, 2104(1), 24-33.
- Roe, P., Webster, D.C., West, G. 1991. The Relation Between the Surface Texture of Roads and Accidents. Transport and Road Research Laboratory. (296). 18p.
- Rogers, M., Gargett, T., 1991. A Skidding Resistance Standard for the National Road Network, Highways and Transportation, 38(4).10-16.

- Roth, L., Eklund, M., 2003. Environmental Evaluation of Reuse of By-Products as Road Construction Materials in Sweden. *Waste Management*, 23(2), 107-116.
- Runkle, S.N., Mahone, D.C., 1977. Critique of Tentative Skid-Resistance Guidelines. *Transportation Research Record*, 633, 28-34.
- Sahu, N., Biswas, A., Kapure, G.U., 2016. A Short Review on Utilization of Ferrochromium Slag. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37(4), 211-219.
- Saito, K., Horiguchi, T., Kasahara, A., Abe, H., Henry, J., 1996. Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces. *Journal of the Transportation Research Board*, 1536, 45-51.
- Sandberg, U. ve Descornet, G. (1980). Road Surface Influence on Tire/Road Noise-1. *International Conference Noise Control Engineering, Noise Control for the 80's, Inter-Noise 80, Vol. 1, , 8-10 December, Miami.*
- Saplioglu, M., Yuzer, E., Aktas, B., Eriskin, E., 2013. Investigation of the Skid Resistance at Accident Occurred at Urban Intersections. *Journal of Traffic And Transportation Engineering*, 1(1), 19-29.
- Sarsam, S. Al Shareef, H., 2015. Assessment of Texture and Skid Variables at Pavement Surface. *Applied Research Journal*, 1(8), 422-432.
- Sarsam, S.I., Ali, A.M., 2015. Assessing Pavement Surface Macrotecture Using Sand Patch Test and Close Range Photogrammetric Approaches. *International Journal of Materials Chemistry and Physics*, 1(2), 124-131.
- Sasaki, T., 2015. Standardization of Iron and Steel Slag Products. *Nippon Steel Sumitomo Metal Technical Report*, 109, 189-194. Erişim Tarihi. 1.12.2020. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nssmc/no109.html>
- Saykin, V.V., Zhang, Y., Cao, Y., Wang, M.L., McDaniel, J.G., 2012. Pavement Macrotecture Monitoring through Sound Generated by A Tire-Pavement Interaction. *Journal of Engineering Mechanics*, 139(3), 264-271.
- Schön, J. H., R. Wang. 1997. Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics." *Pure and Applied Geophysics* 150(1) 163-163.
- Schulze, K., Gerbaldi, A., Chavet, J., 1977. Skidding Accidents, Friction Numbers, and the Legal Aspects Involved Report of the PIARC Technical Committee on Slipperiness and Evenness. *Journal of the Transportation Research Board*, 623, 1-10.
- Sengoz, B., Topal, A., Tanyel, S., 2012. Comparison of Pavement Surface Texture Determination by Sand Patch Test and 3D Laser Scanning. *Periodica Polytechnica. Civil Engineering*, 56(1), 73.

- Sezen, H., Fisco, N., 2013. Evaluation and Comparison of Surface Macrotexture and Friction Measurement Methods. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(3), 387-399.
- Shen, D.H., Kuo, M.F., Du, J.C., 2005. Properties of Gap-Aggregate Gradation Asphalt Mixture and Permanent Deformation. *Construction and Building Materials*, 19(2), 147-153.
- Sorlini, S., Sanzeni, A., Rondi, L., 2012. Reuse of Steel Slag in Bituminous Paving Mixtures. *Journal of Hazardous Materials*, 209, 84-91.
- Sungur, İ., Akdur, R., Piyal, B., 2014. Türkiye'deki Trafik Kazalarının Analizi. *Ankara Medical Journal*, 14(3), 114-124.
- TÇÜD, 2021. Çelik Sektörü 2016 Değerlendirmesi, Erişim Tarihi. 17.03.2021. <http://celik.org.tr/turkiye-celik-ireticileri-dernegi-basin-bulteni-41/>
- Terzi, S., Karasahin, M., Saltan, M., Yilmaz, A., Saplioğlu, M., Ertem, S., Özgüngördü, M., Taciroğlu, M.V., 2013. Physical properties of multi-layer seal surfacing in Turkey. *Transport*, 166(3), 137-143.
- Theyse, H., 2002. Stiffness, Strength, and Performance of Unbound Aggregate Material: Application of South African HVS and Laboratory Results to California Flexible Pavements. Report Produced under the Auspices of the California Partnered Pavement Research Program For The California Department of Transportation. University of California, 76.
- TSE. EN 13036-4. (2014). Road and airfield surface characteristics. Test Methods For Measurement of Slip/Skid Resistance of A Surface: The Pendulum Test, 1. Baskı, Ankara
- Tutumluer, E., 1995. Predicting Behavior of Flexible Pavements with Granular Bases. Georgia Institute of Technology, Ph.D. Thesis. 321p. Atlanta.
- Uz, V.E., Gökalp, İ., 2017a. Comparative Laboratory Evaluation of Macro Texture Depth of Surface Coatings with Standard Volumetric Test Methods. *Construction and Building Materials*, 139, 267-276.
- Uz, V.E., Gökalp, İ., 2017b. The Effect of Aggregate Type, Size And Polishing Levels to Skid Resistance of Chip Seals. *Materials and Structures*, 50(2), 126.
- Uz, V.E., Gökalp, İ., Epsileli, S.E., Tepe, M., 2014. Karayolları Teknik Şartnamesinde (KTŞ) Yer Alan Pürüzlendirme Uygulaması ve Bu Uygulamada Endüstriyel Atıkların Kullanılabilirliği, Karayolları 3 Ulusal Kongresi, 25-27.11.2014, Ankara,. 123-135.
- Uz, V. E., Saltan, M., Gökalp, İ., Ergin, B., 2016. Yüzeysel Kaplamalarda Agregat Tür, Boyut ve Cilalanma Seviyesinin Kaplama Kayma Direncine Olan Etkisinin Laboratuvar Ortamında Araştırılması. TÜBİTAK 215M04. Erişim Tarihi: 13.02.2021. <https://app.trdizin.gov.tr/proje/TVRnek5UTXo/yuzeysel->

- Uzan, J., 2004. Permanent Deformation in Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 130(1), 6-13.
- Viner, H., Abbott, P., Dunford, A., Dhillon, N., Parsley, L., Read, C., 2006. Surface Texture Measurement on Local Roads. Erişim Tarihi: 01.02.2019. https://www.researchgate.net/profile/Phil_Abbott/publication/265006175_Surface_Texture_Measurement_on_Local_Roads/links/5626518e08ae4d9e5c4cd5a0/Surface-Texture-Measurement-on-Local-Roads.pdf
- Wallman, C.-G., Åström, H., 2001. Friction Measurement Methods and The Correlation between Road Friction and Traffic Safety: A Literature Review: Erişim Tarihi: 21.12.2018. <http://worldcat.org/issn/03476049>
- Wambold, J.C., 1988. Road Characteristics and Skid Testing. *Transportation Research Record*, 1196, 294-299
- Wang, D., Chen, X., Yin, C., Oeser, M., Steinauer, B., 2013. Influence of Different Polishing Conditions on the Skid Resistance Development of Asphalt Surface. *Wear*, 308(1), 71-78.
- Wang, D., Xie, X., Oeser, M., Steinauer, B., 2015. Influence of the Gritting Material Applied During the Winter Services on the Asphalt Surface Performance. *Cold Regions Science and Technology*, 112, 39-44.
- Wang, D., Zhang, Z., Kollmann, J., Oeser, M. 2017. Development of Aggregate Micro-Texture During Polishing and Correlation with Skid Resistance. *International Journal of Pavement Engineering*, 1-13.
- Wen, H., Wu, S., Bhusal, S., 2016. Performance Evaluation of Asphalt Mixes Containing Steel Slag Aggregate as a Measure to Resist Studded Tire Wear. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015191.
- WHO., 2018. Global Status Report on Road Safety: 2018. Erişim Tarihi: 21.10.2019. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>
- Wilson, D., Black, P., 2008. The Long Term Skid Resistance Performance of Three Artificial Aggregates Used in Chipseal Surfaces in New Zealand. 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics, 20-23.10.2008, 18p.
- Woodward, D., Millar, P., Lantieri, C., Sangiorgi, C. Vignali, V., 2016. The Wear of Stone Mastic Asphalt due to Slow Speed High Stress Simulated Laboratory Trafficking. *Construction and Building Materials*, 110, 270-277.
- Wu, S., Xue, Y., Ye, Q. ve Chen, Y., 2007. Utilization of Steel Slag as Aggregates for Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment*, 42(7), 2580-2585.

- Xiao, J., Kulakowski, B., El-Gindy, M., 2000. Prediction of risk of wet-pavement accidents: fuzzy logic model. *Journal of the Transportation Research Board* (1717), 28-36.
- Yan, B., Mao, H., Zhong, S., Zhang, P., Zhang, X., 2019. Experimental Study on Wet Skid Resistance of Asphalt Pavements in Icy Conditions. *Materials*, 12(8), 1201.
- Yehia, S., Helal, K., Abusharkh, A., Zaher, A., Istaitiyeh, H. 2015. Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(2), 219-239.
- Yıldız, K., 2018. Şehir İçi Asfalt Kaplamaların Kayma Potansiyelinin Değerlendirilmesi-Bir Durum Çalışması. *Politeknik Dergisi*, 21(2), 513-518.
- Yılmaz, A., Saltan, M., Akıllı, A. 2012. Göller Yöresinde İşletilen Kireçtaşı Agregalarının Yol İnşaatı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(3), 199-207.
- Yılmaz, A., Sütaş, İ., 2008. Ferrokrom Cürufunun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı. *Teknik Dergi*, 19(93), 4455-4470.
- Yoder, E. J., Witczak, M.W., 1975. *Principles of Pavement Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, 736p.
- Yüksel, İ., 2017. A Review of Steel Slag Usage in Construction Industry for Sustainable Development. *Environment, Development and Sustainability*, 19(2), 369-384.
- Zaumanis, M., Haritonovs, V., 2016. Long Term Monitoring of Full Scale Pavement Test Section with Eight Different Asphalt Wearing Courses. *Materials and Structures*, 49(5), 1817-1828.
- Zhang, Z., Luan, B., Liu, X., Zhang, M., 2020. Effects of Surface Texture on Tire-Pavement Noise and Skid Resistance in Long Freeway Tunnels: From Field Investigation to Technical Practice. *Applied Acoustics*, 160, 107120. 11p.
- Ziari, H., Khabiri, M.M., 2007. Preventive Maintenance of Flexible Pavement and Mechanical Properties of Steel Slag Asphalt. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 15(3), 188-192.