

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BETON YOL KARIŞIMINDAKİ İNCE AGREGANIN YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Orhan KARPUZ

AĞUSTOS 2008
TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BETON YOL KARIŞIMINDAKİ İNCE AGREGANIN
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

İnş. Y. Müh. Orhan KARPUZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"Doktor (İnşaat Mühendisliği)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.07.2008
Tezin Savunma Tarihi : 01.08.2008**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. M. Vefa AKPINAR
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Aslan DİLAVER
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Atakan AKSOY
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Fazıl ÇELİK
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU**

Enstitü Müdür V.: Doç. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2008

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her aşamasıyla kendi teziymiş gibi çok yakından ilgilenen ve her türlü bilgi, yardım ve desteğini esirgemeyen Dr. M. Vefa AKPINAR hocama çok teşekkür ediyorum, minnettarım.

Çalışmalarımın başından beri ilgi ve bilgisini paylaşan Ulaştırma Ana Bilim Dalı Başkanımız ve de Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Fazıl ÇELİK hocama teşekkürlerimi arz ediyorum.

Bilgi ve tecrübelerini paylaşarak beni cesaretlendiren Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU hocama çok teşekkür ediyorum.

Gerek laboratuvar düzeneğinin tasarlanması, hazırlanması aşamasında ve gerekse diğer aşamalarda kısıtlı zamanına rağmen çok emeği geçen Makine Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalında görevli Dr. Hasan BAŞ hocama çok teşekkür ediyor, minnettarlığımı sunuyorum.

Dr. M. Vefa AKPINAR hocamın girişimiyle Lazer profilometrenin yazılımını yaparak destek veren bilgisayar bölümünden Yrd. Doç. Dr. Murat EKİNCİ'ye ve yine aynı bölümden temas noktalarının analizindeki yazılımıyla destek veren Arş. Gör. Eyüp GEDİKLİ'ye de çok teşekkür ediyorum.

Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı görevlileri Ali SEMERCİ ve Fikret BÜLBÜL'e, Karayolları torna atölyesi çalışanı Hamza EROĞLU'na gösterdikleri yakın ilgi ve sürekli yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunuyorum. Makine bölümünün torna atölyesi ve diğer laboratuvar çalışanlarına, bölümümüz Yapı Malzemesi Laboratuvarı sorumlu ve çalışanlarına da teşekkürlerimi sunuyorum.

Üniversitemizin Bilimsel Araştırma Projeleri birimine, sağladığı proje desteği sebebiyle teşekkürü borç biliyorum.

Tezimin her aşamasında desteklerini çok yakından hissettiğim anneme, babama, eşime ve tüm aile fertlerime çok teşekkür ediyor, bu tezimi onlara ithaf ediyorum.

Orhan KARPUZ

Trabzon 2008

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ	XI
SEMBOLLER DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür	4
1.3. Yol Üstyapısı Tipleri.....	6
1.3.1. Esnek Üstyapı.....	6
1.3.2. Rijit Üstyapı.....	7
1.3.2.1. Taban Zeminleri	8
1.3.2.2. Kaplama Altı Tabakası.....	9
1.3.2.3. Beton Plaklar.....	9
1.4. Yol Üstyapısı Seçiminde Etkili Faktörler.....	10
1.4.1. Trafik	10
1.4.2. İklim	11
1.4.3. Maliyet	12
1.4.3.1. İlk İnşaat Maliyeti	12
1.4.3.2. Bakım Maliyeti.....	13
1.4.3.3. Yolu Kullananların Harcamaları	13
1.4.3.4. Finansman Kaynakları ve İskonto Oranı.....	13
1.4.4.5. Güvenlik ve Konfor.....	15
1.5. Beton Yolların Tarihçesi	15
1.6. Beton Yolların Avantajları Ve Dezavantajları.....	16
1.6.1. Beton Yolların Üstünlükleri.....	16

1.6.2.	Beton Yolların Dezavantajları.....	20
1.7.	Yol Yüzeyine Gelen Gerilmeler.....	20
1.7.1.	Düşey Gerilmeler.....	20
1.7.2.	Kayma Gerilmeleri.....	23
1.8.	Yolların Yüzey Özellikleri.....	24
1.8.1.	Geometrik Düzgünlük.....	26
1.8.2.	Pürüzlülük.....	26
1.8.2.1.	Mikro Pürüzlülük.....	26
1.8.2.2.	Makro Pürüzlülük.....	27
1.8.2.3.	Mega Pürüzlülük.....	27
1.8.2.4.	Pürüzlülük-Lastik Aşınması İlişkisi.....	28
1.8.2.5.	Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri.....	28
1.8.2.5.1.	Mikro Dokuyu Ölçme Yöntemleri	28
1.8.2.5.2.	Makro Dokuyu Ölçme Yöntemleri	29
1.8.2.5.2.1.	Kum Yama Yöntemi (SPM).....	29
1.8.2.5.2.2.	Lazer Esaslı Yöntemler.....	30
1.8.2.5.2.3.	Üç Boyutlu Fotoğraflama Sistemi.....	31
1.8.2.5.2.4.	Drenaj Yöntemleri.....	32
1.8.2.5.3.	Mega Dokuyu Ölçüm Yöntemleri.....	33
1.8.2.5.4.	Geometrik Düzgünlük Ölçüm Yöntemleri.....	33
1.8.3.	Beton Kaplama Yüzeyi Pürüzlendirme Teknikleri.....	34
1.8.3.1.	Taze Beton Yüzeyini Pürüzlendirme.....	34
1.8.3.1.1.	Çuval Bezi, Süpürge, Suni Çim Halı veya Fırça Çekme.....	34
1.8.3.1.2.	Yüzeyde İnce Kanallar Açma (Tinning).....	34
1.8.3.1.3.	Yüzeydeki Agregaları Açığa Çıkarma.....	35
1.8.3.1.4.	Yüzeye Mıdır Döküp Sıkıştırma.....	35
1.8.3.1.5.	Geçirimli (Poroz) Karışım Kullanma.....	35
1.8.3.2.	Sert Beton Yüzeyi Pürüzlendirme.....	35
1.8.3.2.1.	Öğütme (Diamond Grinding).....	36
1.8.3.2.2.	Yiv açma (Diamond Grooving)	36
1.8.3.2.3.	Kum Çarpıtma (Shotblasting).....	36
1.8.4.	Sürtünme Katsayısı.....	36
1.8.4.1.	Tekerlek-Yol Etkileşim Mekanizması.....	38

1.8.4.2.	Yanal Sürtünme Kuvveti	42
1.8.4.3.	Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri.....	42
1.8.4.4.	Sürtünme Katsayısı- Pürüzlülük İlişkisi.....	44
1.8.4.5.	Sürtünme Katsayısının Trafik Kazalarına Etkisi.....	45
1.9.	Beton Yolların Mekanik Özellikleri.....	47
1.9.1.	Basınç Dayanımı.....	48
1.9.2.	Eğilmede Çekme Dayanımı.....	48
1.9.3.	Aşınma Direnci.....	49
1.9.3.1.	Aşınma Direnci Ölçüm Yöntemleri.....	50
1.9.4.	Durabilite Özellikleri.....	51
1.9.4.1.	Donma Çözülme Direnci.....	52
1.9.4.2.	Kimyasal Maddelere Karşı Direnç.....	53
1.10.	Beton Yollarda Kullanılan Malzemeler.....	54
1.10.1.	Kullanılan Beton Çeşitleri.....	54
1.10.1.1.	Silindire Sıkıştırılabilen Beton.....	56
1.10.1.2.	Kendiliğinden Yerleşen Beton.....	57
1.10.2.	Çimento.....	57
1.10.3.	Agrega.....	58
1.10.3.1.	İnce Agregası.....	59
1.10.3.2.	Bileşim ve Doku.....	60
1.10.3.3.	Aşınma-Cilalanma Direnci.....	60
1.10.4.	Donatı.....	61
1.10.5.	Karma Suyu.....	62
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	64
2.1.	Amaç.....	64
2.2.	Kapsam.....	64
2.3.	Deney ve Test Düzenegi Geliştirme.....	65
2.4.	Beton Özellikleri.....	80
2.4.1.	Malzeme Özellikleri.....	80
2.4.1.1.	Agrega.....	80
2.4.1.1.1.	Mineralojik Yapı.....	80
2.4.1.1.2.	Aşınma (Los Angeles) Direnci Deneyi.....	81
2.4.1.1.3.	Elek Analizi.....	81

2.4.1.1.4.	Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri.....	83
2.4.1.1.4.1.	İnce Agrega Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranı (TS 3526).....	83
2.4.1.1.4.1.	Kaba Agrega Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranı (TS 3526).....	86
2.4.1.2.	Çimento.....	87
2.4.2.	Taze Beton Bileşimi Tasarımı.....	87
2.4.3.	Karışım Oranları.....	88
2.4.4.	Kür Şartları.....	89
2.4.5.	Yüzey Özellikleri.....	89
2.5.	Gerçekleştirilen Deneyler.....	90
2.5.1.	Taze Beton Karılması.....	90
2.5.2.	Basınç Dayanımının Belirlenmesi.....	91
2.5.3.	Eğilmede Çekme Dayanımının Belirlenmesi.....	92
2.5.4.	Yüzey Aşınma Direncinin Belirlenmesi.....	92
2.5.5.	Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi.....	92
2.5.6.	Yüzey Profil Derinliğinin Belirlenmesi.....	95
2.5.7.	Temas Noktaları Alanlarının Görüntü Tekniğiyle Belirlenmesi.....	97
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	101
3.1.	Basınç Dayanımı ve Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları.....	101
3.2.	Sürtünme Katsayıları Bulguları.....	102
3.3.	Yüzey Profil Değerleri Bulguları.....	109
3.4.	Temas Noktaları Alanları Bulgular.....	114
4.	SONUÇLAR.....	124
5.	ÖNERİLER.....	126
6.	KAYNAKLAR.....	127

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

Bu tez çalışmasında beton yollarda, karışım içindeki kalker ve bazalt ince agrega özelliklerine bağlı olarak, yol yüzey pürüzlülüğünün, lastik tekerlek yükü altında aşınması araştırılmıştır. Lastik tekerleğin pürüzlendirilmiş beton yüzeye sabit düşey ve yatay gerilme uyguladığı bir aşındırma deney düzeneği geliştirilmiştir. Çalışmada kalker, %50 kalker + %50 bazalt ve bazalttan üç farklı incelik modülünde toplam dokuz beton karışımı hazırlanarak geliştirilen deney düzeneğinde aşınmaya tabi tutulmuştur. 0, 1000, 5.000, 25.000 ve 100.000 tekerlek geçiş sayılarında, beton numune yüzeyinin sürtünme katsayıları, iki boyutlu yüzey profilleri, tekerlek temas alanı içindeki temas noktalarının kapladığı alan yüzdesi ölçülmüştür. En fazla aşınma kaybı kalker karışımlarda, en az kayıp ise (% 50 bazalt + % 50 kalker) ve bazalt karışımlarda elde edilmiştir. Test sonuçları incelik modülü ile sürtünme katsayısı arasında kuvvetli bir ilişkinin olmadığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton Yol, İnce Agrega, İncelik Modülü, Aşınma, Pürüzlülük, Sürtünme Katsayısı, Temas Noktaları, Lazer Profilometre

SUMMARY

Investigation of concrete pavement fine aggregate effects on texture abrasion

In this thesis study, the texture abrasion of concrete roads depending on the fine aggregates subjected to tire loads is investigated. A special designed abrasion test setup consisted of tire applying a constant lateral and vertical load on a textured concrete surface was developed. The mix parameters subjected to loading in the test setup were limestone, (%50 limestone + %50 basalt) mix, and basalt fine aggregate. The three main mixes were also divided and classified into 9 different mixes according to three types of fineness modulus. The changes in the friction coefficient, two dimensional profile of the surface texture, and the contact points were measured under 0, 1000, 5.000, 25.000, 100.000 tire passes. It was concluded that, overall the mix with %50 limestone + %50 basalt and basalt mix will give the best performance against the concrete friction abrasion under tire loads. The test results showed that there is no strong relationship between sand fineness modulus and friction coefficient.

Key Words: Concrete Pavement, Fine Aggregate, Fineness Modulus, Abrasion, Friction Coefficient, Contact Points, Laser Profilometer

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Tipik bir esnek üstyapı kesiti.....	7
Şekil 1.2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları.....	8
Şekil 1.3. Yol yüzeyine tekerlekten gelen kuvvetler.....	10
Şekil 1.4. Beton ve asfalt yollardaki durma mesafelerinin karşılaştırılması.....	18
Şekil 1.5. Yakıt tüketiminin asfalt ve beton yola göre değişimi.....	19
Şekil 1.6. Tekerlek temas alanında boyuna doğrultudaki düşey basınç dağılımları	21
Şekil 1.7. Beton yolun üç farklı yüzey durumuna göre tekerleğin temas biçimi	22
Şekil 1.8. Yüzey pürüzlendirmesine göre temas basıncının dağılışı.....	22
Şekil 1.9. Tahrik tekerleklerinin yol açtığı kayma gerilmelerinin eğim, taşıt ağırlığı ve tahrik aksı yüküne bağlı değişimini gösteren nomogram.....	24
Şekil 1.10. Yol yüzey özelliklerindeki farklı durumların basit gösterimi.....	25
Şekil 1.11. Yol yüzey özelliklerinin araçlara etkisi.....	27
Şekil 1.12. Kum yama yönteminin uygulanışı.....	29
Şekil 1.13. Lazerli bir ölçüm düzeneği ve lazerin çalışma prensibi	31
Şekil 1.14. Su drenajı yönteminin şematik gösterimi.....	32
Şekil 1.15. Tekerlek ile yol temas noktalarındaki sürtünme kuvvetleri	39
Şekil 1.16. Sürtünme katsayısı değerinin frenleme derecesiyle değişimi.....	40
Şekil 1.17. Sürtünme katsayısı-hız ilişkisi.....	41
Şekil 1.18. İngiliz sürtünme pandülü ve Japon dinamik sürtünme ölçer.....	43
Şekil 1.19. Dinamik sürtünme ölçüm araçları	44
Şekil 1.20. Hız ve pürüzlülük durumuna göre sürtünme katsayısının değişimi.....	45
Şekil 1.21. Böhme aşınma test aleti.....	51
Şekil 1.22. Los Angeles aşınma test aleti.....	51
Şekil 2.1. Deney düzeneğinin ilk hali.....	65
Şekil 2.2. Torkmetrenin kalibrasyon eğrisi.....	66
Şekil 2.3. Değişimden sonra arka kısım.....	67
Şekil 2.4. Yeniden imal edilen derin yuvalı tambur.....	68
Şekil 2.5. İmal edilen kalıplar ve çıkan numuneler	69
Şekil 2.6. Yağ ve su döngüsü bağlantıları.....	71

Şekil 2.7.	Tekerleğe takılan pompa ve genel görüntüsü.....	72
Şekil 2.8.	Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi	73
Şekil 2.9.	Düşey basınç dağılımını ölçmek için oluşturulan düzenekli numune.....	73
Şekil 2.10.	Eşit aralıklarla temas basıncı ölçümü alınması.....	74
Şekil 2.11.	Tekerlek-beton temas alanı boyuna eksenini üzerindeki basınç dağılımı	74
Şekil 2.12.	Toplam tur sayıcısının konumu.....	76
Şekil 2.13.	Tekerleğin kauçuk kısmının yenilenmesi için yaptırılan kalıp ve yeni tekerlek.....	77
Şekil 2.14.	Lazer profilometrenin üstten görünüşü.....	78
Şekil 2.15.	Sürtünme katsayısı ve yüzey profili ölçümleri için yapılan düzenek.....	79
Şekil 2.16.	Kalker ve bazalt kökenli agregaların petrografik görüntüleri	80
Şekil 2.17.	Beton agregası referans eğrileri ve karışım granülometrileri.....	82
Şekil 2.18.	Beton numunelerin yüzey görüntüsü.....	90
Şekil 2.19.	Kalıplara yerleştirilen aşınma, basınç ve eğilmede çekme numuneleri.....	91
Şekil 2.20.	Sürtünme katsayısı ölçümünde düzeneğin durumu.....	93
Şekil 2.21.	Numunelerden sürtünme katsayısı ölçümü alınması.....	94
Şekil 2.22.	Lazer profilometreyle numunelerden yüzey profili ölçümü alınması.....	95
Şekil 2.23.	Lazer profilometre yazılımının ilk açılış ekran görüntüsü.....	96
Şekil 2.24.	Yazılımın profil alındıktan sonraki ekran görüntüsü.....	96
Şekil 2.25.	Bir yüzey profilinin düzeltilmiş piksiz görüntüsü.....	97
Şekil 2.26.	Aynı numuneye ait temas noktalarının röntgen filmsiz ve filmli görüntüsü.....	98
Şekil 2.27.	Resim yükleme ve alan seçimi penceresi ekran görüntüsü.....	99
Şekil 2.28.	Görüntü tekniğinde resim pürüzlerini karşılaştırma penceresi görüntüsü...	100
Şekil 3.1.	Kalker ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısının değişimi.....	106
Şekil 3.2.	Kalker+bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi.....	106
Şekil 3.3.	Bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısının değişimi.....	107
Şekil 3.4.	İncelik modülü 2,2 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi.....	107
Şekil 3.5.	İncelik modülü 2,7 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi.....	108
Şekil 3.6.	İncelik modülü 3,15 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi.....	108
Şekil 3.7.	Sürtünme katsayısı kayıp oranlarının numunelere göre durumu	109
Şekil 3.8.	Kalker ince agregalı karışımlarda profil derinliği değişimi.....	113
Şekil 3.9.	Bazalt ince agregalı karışımlarda profil derinliği değişimi.....	113

Şekil 3.10.	K1 karışım numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmli (R) değişimi.....	116
Şekil 3.11.	K2 karışım numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmli (R) değişimi.....	116
Şekil 3.12.	K3 karışım numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmli (R) değişimi.....	117
Şekil 3.13.	Kalker ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	117
Şekil 3.14.	Karışık ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	119
Şekil 3.15.	Bazalt ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	121
Şekil 3.16.	İncelik modülü 2,2 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	121
Şekil 3.17.	İncelik modülü 2,7 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	122
Şekil 3.18.	İncelik modülü 3,15 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi.....	122
Şekil 3.19.	Temas noktaları alanı oranlarındaki kayıp yüzdelerinin karışıma göre değişimi.....	123

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Çeşitli ülkelerde, aks yükleri ve toplam taşıt ağırlıkları ile ilgili sınırlar.....	21
Tablo 1.2. Teker tipi ve iç basıncına göre temas alanları ve temas basıncı değerleri.....	23
Tablo 1.3. Bazı durumlardaki statik ve kinetik sürtünme katsayısı değerleri.....	38
Tablo 1.4. Yol yüzeyi durumuna göre ortalama pik ve kızaklama sürtünme değerleri....	40
Tablo 1.5. Yol kesimine ve kamyon trafiği yoğunluğuna göre olması gereken agrega cilalanma değeri ve sürtünme katsayısı değerleri.....	47
Tablo 1.6. Trafik yoğunluklarına göre olması gereken dayanım değerleri.....	48
Tablo 1.7. LA aşınma deneyinde kullanılacak agrega daneleri ve alınacak miktarlar...	59
Tablo 2.1. LA Aşınma testi sonuçları.....	81
Tablo 2.2. Agrega granülometrileri.....	82
Tablo 2.3. İnce agreganın birim hacim ağırlığı için numune miktarı.....	83
Tablo 2.4. İri agreganın birim hacim ağırlığı için numune miktarı.....	86
Tablo 2.5. Bir m ³ beton harcı için karışımlardaki oranlar.....	89
Tablo 3.1. Basınç Dayanımı Sonuçları.....	101
Tablo 3.2. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları.....	102
Tablo 3.3. Kalker ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları.....	103
Tablo 3.4. Kalker+bazalt karışık ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları.....	104
Tablo 3.5. Bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları.....	105
Tablo 3.6. Kalker ince agregalı karışımlarda yüzey profili değerleri.....	110
Tablo 3.7. Kalker-bazalt karışık ince agregalı karışımlarda yüzey profili değerleri.....	111
Tablo 3.8. Bazalt ince agregalı karışımların yüzey profili değerleri.....	112
Tablo 3.9. Temas noktaları alanı oranlarının kalker ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri.....	115
Tablo 3.10. Temas noktaları alanı oranlarının karışık ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri.....	118
Tablo 3.11. Temas noktaları alanı oranlarının bazalt ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri.....	120

SEMBOLLER DİZİNİ

BPT	: İngiliz sürtünme pandülü (British Pandilium Tester)
C	: Çimento miktarı
CBR	: Taban zemininin taşıma gücü
DFT	: Dinamik sürtünme ölçer (Dynamic Friction Tester)
DN	: Doğal nem
DS	: Doğal su
F_k	: Kinetik sürtünme kuvveti
H	: Hava hacmi
LA	: Los Angeles aşınma deneyi
m_i	: İnce agreganın su emme oranı
M_0	: Malzemenin doğal ağırlığı
M_1	: Malzemenin kuru ağırlığı (etüv kurusu)
M_2	: Malzemenin DKY ağırlığı
M_3	: Ölçü kabı + su + Numune ağırlığı
M_4	: 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı
MPD	: Ortalama profil derinliği (Middle Profile Depth)
MTD	: Ortalama doku derinliği (Middle Texture Depth)
N	: Normal kuvvet
RCC	: Silindirle sıkıştırılabilen beton (Roller Compacted Concrete)
SF	: Statik sürtünme kuvveti
SPM	: Kum Yama Yöntemi
$T_{8.2}$: Standart dingil yükünün toplam tekerrür sayısı
YOGATT	: Yıllık ortalama günlük ağır taşıt trafiği
V_{Ag}	: Agreganın hacmi
W	: Su miktarı
λ	: Dalga boyu
μ_s	: Statik sürtünme katsayısı
μ_k	: Kinetik sürtünme katsayısı
Σ	: Toplam

- ρ_{iK} : İnce agreganın kuru birim hacim ağırlığı
 ρ_{iD} : İnce agreganın DKY birim hacim ağırlığı
 ρ_{iG} : İnce agreganın görünen birim hacim ağırlığı
 γ_c : Çimentonun birim hacim ağırlığı

1. GENEL BİLGİLER

Birinci bölümde beton yolların önemi, avantaj ve dezavantajları, projelendirme ve malzeme seçiminde dikkate alınacak esaslar, sürtünme, pürüzlülük ve ölçüm yöntemleriyle ilgili genel konular anlatılmıştır. İkinci bölümde tez çalışmasında kullanılan aşındırma deney düzeneğinin, ölçüm alınacak test düzeneklerinin ve yazılımların geliştirilmesi, malzemeler üzerindeki deneyler, numune yüzeyleri üzerinde yapılan aşındırma, sürtünme katsayısı, temas noktaları alanlarının bulunması, lazerle yüzey profilinin ölçülmesi konularında bilgiler verilmiş, nasıl yapıldıkları izah edilmiştir. Üçüncü bölümde yapılan deneylerden elde edilen veriler tablo ve grafikler halinde gösterilmiş, verilerdeki eğilimler irdelenmiştir. Beşinci bölümde ise varılan sonuçlar açıklanmış, bu çalışmadaki noksanlıkların giderilmesi ve geliştirilmesi için devamında yapılacak çalışmalarda nelere dikkat edilmesi gerektiğine dikkat çekilmiştir.

1.1. Giriş

Karayolların yüzey kalitesi zaman içinde bozulmakta, dolayısıyla onarım ve yenileme gerektirmektedir. Ekonomik açıdan bakılacak olursa karayolu ulaştırıcılığı ile ilgili en önemli giderlerden biri, yolların onarım ve yenilenmesini de kapsayan bakım harcamalarıdır. Yüzey kalitesinin bozulmasını etkileyen faktörleri saptayarak kontrol altına almak üzere çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar öncelikle taşıtların yol açtığı karayolu yıpranmasını ve buna bağlı olarak ortaya çıkan onarım ve yenileme harcamalarını azaltmayı hedeflemektedir.

Ülkemizde yolların köstebek yuvasına dönmesi, sürekli devam eden yol yapım onarım çalışmaları, yol bozulmaları sonucunda meydana gelen can ve mal kaybına yol açan kazalarla edindiğimiz acı tecrübeler, yanlış ulaşım politikaları izlediğimizin birer kanıtıdır. Üstünlükleriyle tüm Dünyada ön plana çıkan ve karayolu ağlarında yaygın olarak kullanılan beton yolların yerine, her yıl çok büyük bakım masrafı yaptığımız asfalt yolları çeşitli karışımlarla yeniden sunmak büyük hatadır. Beton yolların hala ülkemizde ciddi olarak uygulanmıyor olması ülkemiz insanı ve ekonomisi için büyük kayıptır. Amerika'da 100 yılı, Avrupa'da ise 75 yılı aşkın süredir kullanılan beton yollar, Türkiye'de az sayıdaki

bazı kent içi ve köy yolu çalışmaları dışında ne yazık ki bugüne kadar değerlendirilmemiştir. Karayolları ağı içerisindeki beton yol oranı Avrupa ülkelerinde yüzde 15, ABD ve Kanada'da yüzde 30, bazı ülkelerin otoyollarında ise yüzde 70'dir.

Yıllık 10 milyon tonluk çimento ve klinker satışıyla Avrupa'nın en büyük, dünyanın ikinci büyük ihracatçısı olan Türkiye'nin, 63 bin kilometrelik karayolu ağı üstünde bugüne kadar hep petrol türevlerini kullandığı, yani başımızdaki milyonlarca tonluk çimento, agrega (çakıl) ve kumun yollarda beton olarak kullanımının pek akla gelmediği ortadadır.

Yük taşımacılığının yüzde 92'si, yolcu taşımacılığının yüzde 95'i karayollarının sırtından olan ülkemizdeki beton yol uzunluğu ise şimdilik test amaçlı yapılan birkaç kilometrelik yolla sınırlı. Ancak karayollarında göremediğimiz beton teknolojisi, dünya standartlarında inşa edilen hava alanlarımızın tamamına yakınında var. Uçakların en güvenli iniş kalkış yaptıkları, onlarca yıllık kullanım ömrü bulunan pistler beton yol teknolojisi ile üretiliyor. Türkiye Hazır Beton Birliği istatistiklerine göre hava limanlarının yüzde 90'ından fazlasında kullanılan kaplama teknolojisi betondur.

Türkiye'de her 4 yılda bir asfalt yolların dörtte birine yakını yenileniyor. Karayolları Genel Müdürlüğü'nün yıllık 2 katrilyon TL'nin aşan bütçesinin büyük kısmı bakım ve onarıma harcanıyor. Avrupa'nın en büyük TIR ve kamyon filosuna sahip olmamız nedeniyle yollarımızın ömrü daha da kısadır.

Beton yolların gelişmiş ülkelerde başlayan yaklaşık bir asırlık mazisi vardır. Birçok alanda asfalt kaplamalı yollara göre üstün durumdadırlar. Özellikle ekonomiklik ve dayanıklılık açısından bakıldığında daha avantajlı oldukları görülmektedir. 35-40 yıl gibi uzun bir proje ömrüne sahiptirler ve asfalt kaplamalara göre çok az bakım-onarıma ihtiyaç duyarlar. Bu süreyi çok daha yukarıya çıkarmak için hem trafiğin hem de iklim koşullarının aşındırıcı etkilerine çok dayanıklı bir yol kaplama betonu üretilmesi için dünya çapında çeşitli yöntemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yapısal olmaktan ziyade yüzey özelliklerinin düzeltilmesi ağırlıklı yapılan bu çalışmalarda, yüzeyin nasıl pürüzlendirileceği, kullanılacak malzeme özellikleri, kimyasallar ve miktarları, yüzeyi sertleştirmek için neler yapılabileceği gibi konular incelenmektedir.

Betonun mekanik özellikleri karışımdaki malzemelerin özellikleriyle direkt ilgilidir. Betonun hacimce yaklaşık yüzde yetmişini agrega oluşturmaktadır. Agreganın 0-4mm lik kısmını oluşturan kum ise çimentoyla hamur oluşturarak hem iri daneleri birbirlerine bağlamakta hem de ara boşlukları doldurarak geçirimsizliği sağlamaktadır. Dolayısıyla kumun temizliği, dane şekli, inceliği, miktarı, mineralojik yapısı gibi özellikleri betonun

mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yol kaplama betonlarında basınç dayanımının yanında eğilmeye direnç, yorulmaya direnç, tekerleklerin mekanik ve iklim şartlarının da termo-kimyasal etkilerine karşı aşınmaya direnç özelliklerinin de mutlaka sağlanması gerekmektedir.

63 bin kilometreye yakın uzunluğa sahip devlet ve il yollarımızın yapımı bakımı ve onarımı devlet bütçemize büyük külfet yüklemektedir. Yapılacak yollar hem yapısal olarak ve hem de yüzey özellikleri bakımından ne kadar uzun ömürlü olurlarsa yapılacak harcamaların da o kadar azalacağı açıktır. Uzun ömürlü yolların yapımı için de öncelikle dizayn ve kontrol aşamalarına önem verilmelidir. Dizayn aşamasında ise deneylerin büyük bir ağırlığı vardır. Kilometrelerce yol kaplamasını inşa etmeden önce, gerçek arazi şartlarının mümkün olduğunca birebir temsil edildiği deneylerle laboratuarlarda önceden malzemelerin test edilmeleri büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada yapılan deney düzeneği de, dizayn edilen bir beton yol kaplamasının pürüzlülüğünde ve sürtünme durumunda zaman içinde ne gibi değişikliklerin olabileceğinin önceden anlaşılması açısından gayet yararlı olacaktır.

Beton yol yüzeyinin aşındırıcı etkilere direnci çeşitli laboratuvar deneyleriyle belirlenmeye çalışılmaktadır. Tekerlek etkilerinin aşındırmasına karşı kaplamanın direncinin ölçülmesi için ise uygulanan bazı aşınma direnci testleri (Böhme, Dorry, PSV vb) olsa da genelde kabul görmüş bir deney metodu yoktur. Gelişmiş ülkelerin birçoğu kendi geliştirdikleri değişik teknikleri kullanılmaktadır. Mevcut yöntemleri; sert bir testereyle kesme, dönen pürüzlü sert bir diskle ya da fırçayla aşındırma, kum danelerinin çok hızlı çarptırılmasıyla aşındırma, su jetiyle aşındırma, çelik bilyelerin çarpmasıyla aşındırma şeklinde özetlemek mümkündür. Bu deneylerden elde edilen sonuçların yol yüzeyindeki aşınmaya yakınlığı tartışılırdır. Çünkü kauçuk harici aşındırıcı kullanmaları nedeniyle gerçeği simüle etmemektedirler. Gerçekte yol yüzeyindeki bir A noktasından çeşitli hızlarda, yüzeye değişik düşey ve yatay yükler uygulayan, soğuk iklimlerde çivili olabilen kauçuk tekerlekler geçmekte, yol kaplama karışımındaki fazların direncine göre zamanla yüzeyin pürüzlülük ve sürtünme katsayısı değerleri değişmektedir. Bu geçiş anlarda ısı farklarından, kimyasal etkilerden, temel durumundan v.b. nedenlerle betonda oluşan iç gerilme değerleri de birbirinden farklıdır. Tüm bu kriterleri sağlayacak bir laboratuvar düzeneğinin kurulması çok zor ve pahalıdır. Pratik olmayacaktır. Gelişmiş ülkelerde test yolları inşa edilmekte ve buralarda son teknolojiler kullanılarak direkt ölçümler yapılmaktadır. Bu büyük bir maddi güç ve zaman gerektirmektedir. Laboratuvar

ortamında böyle bir olayı simüle edebilmek için sadece en etkin faktörleri dikkate alan bir model kurulabilir. Lastik sertliği, düşey gerilme, yatay gerilme(sürtünme), geçiş sayısı, geçiş hızı, kaplama numunesinin karışım özellikleri ve ıslaklık-kuruluk kriterlerini dikkate alan bir düzenek daha gerçekçi olacaktır.

1.2. Literatür

Özturan T. 1984 de İ.T.Ü. de verdiği “Beton Aşınmasının İki Fazlı Malzeme Olarak İncelenmesi” konulu doktora tezinde, % 0-40 aralığında kaba agrega içeren kesikli gradasyonlu beton numunelere Schmdit sertlik, rezonans frekansı, eğilme, basınç ve kesik yüzeylere Böhme(DIN 52108) aşındırma aletiyle aşınma deneyleri yaptı. Aşınma direncinin agrega ve çimento hamuru fazlarından daha dirençli olana göre şekillendiği ve birim ağırlık, eğilmede çekme ve basınç mukavemeti, dinamik elastisite modülü ve Schmidt yüzey sertliği ile aynı yönde arttığı sonucuna vardı [1].

Fwa T.F. , Tan C.C. 1992 de Singapur’da yaptıkları bir çalışmada, kayma direnci-mikro texture ilişkisini granit ve demir cürufu kullanarak incelediler. Agrega yüzeyinin farklı sertliğe sahip minerallerden oluşmasının sürtünmeyi olumlu yönde etkilediği sonucuna vardılar [2].

Zelić J. 2005 yılında yaptığı çalışmada, yüksek karbonlu demir metallerin üretiminde atık olarak kalan cürufun açık havada yavaşça soğutulmasıyla bazaltın mekanik özelliklerine yakın değerler elde edildiği belirtilmiş; bu cüruftan elde edilen yapay agregayla ve kalker agregayla üretilen 28 günlük betonların ($w/c=0.64$, 350 kg/m^3 doz, % 1.5 hava yüzdesi) basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme direnci, Los Angeles ve Böhme aşınma dirençleri,elastik modül, donmada basınç kaybı, su emme yüzdesi ve özgül ağırlık değerleri karşılaştırılmış; yüksek karbonlu demir cürufundan elde edilen yapay agregalı betonun her yönüyle daha iyi değerler verdiği ve 1. ve 2. sınıf trafikli yolların aşınma tabakaları için gerekli değerleri iyi derecede sağladığı belirtilmiş; söz konusu cürufu yapılacak betonlar, beton yol kaplamalarında kalker agregalı betonla yapılmış kaplama tabakalarının yüzeyine aşınma tabakası olarak önerilmiştir [3].

Ghafoori N. , Sukandar B.M. 1995 de beton plak kaplamaların aşınma dirençlerini ASTM C779 Procedure C Ball Bearing aşınma deneyini kullanılarak incelediler. Beton karışımındaki agrega ve çimento harcı fazlarının hacim oranlarının önemli olduğu, aşınma direncinin diğer dayanımlardan daha fazla bu orandan etkilendiği sonucuna vardılar [4].

Ghafoori N. , Diawara H. 1999 da silis dumanının betonun aşınma dayanımına etkisini ASTM C779 Procedure C Ball Bearings aşınma deney yöntemini kullanarak incelediler. Değişik su / çimento oranları ve çimento miktarlarında yapılan deneylerden %10 a kadar silikanın fillerle yer değiştirmesinin ve s/ç oranının düşmesinin aşınma dayanımını artırdığı, aşınma derinliği ile basınç dayanımı arasında direkt bağlantı olduğu sonucuna varıldı [5].

Atiş C. D. 2002 yılında Dorry aşındırma makinesini kullanarak “F Sınıfı Uçucu Küllerin Betonun Aşınma Dayanımı Üzerine Etkisi” konusunda yaptığı araştırmada akışkanlaştırıcı kullanımının aşınma direncini etkilemediği, çimentonun %70 inin uçucu kül olmasının aşınma direncini artırdığı, kür şartlarının ise genel eğilimi pek etkilemediği sonucuna vardı [6].

Momber A. W. 2000 yılında iri kum danelerini sert beton yüzeylere çok hızlı çarptırıldığında oluşan aşınmayı ağırlık kaybı, yüzey topoğrafyası ve optik inceleme bakımından değerlendirdi [7].

Sonebi M., Khayat K.H. 2001 de yüksek basınç dayanımlı (120 MPa) betonların aşınma dirençlerini ASTM C779 Procedure C , testereyle kesme ve ASTM C1t38 deney yöntemlerine göre incelediler [8].

Akter M. , Hossain M. , Boyer J., Parcels W.J. 2002 yılında USA Kansas’da 1992 den sonra yapılmış 21 beton yol kaplamasının yüzeylerini incelediler. Betonun kopma modülünün, temel malzemesinin, kaplama yüzeyi ıslak gün sayısının ve başlangıç sürtünme katsayısının sonraki sürtünme katsayısını etkilediği; aşınmanın çoğunun 3–5 yıl içinde oluştuğu; eğilme dayanımının aşınma dayanımını etkilediği sonuçlarına vardılar [9].

H. Donza, O. Cabrera ve E. F. Irassar, 2002 yılında yaptıkları farklı ince agregalı yüksek dayanımlı betonlar isimli çalışmada kaba agregası, çimento dozu, su/çimento oranı ve slump miktarını sabit tutup granit, kalker ve dolomit kaynaklı kırma ince agregası ile doğal dere kumuyla hazırladıkları farklı kür sürelerine sahip yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini karşılaştırdılar. Köşeli kum kullanımının basınç dayanımını artırdığı ancak elastisitenin aynı olduğu, kür şartlarının bu sonucu değiştirmedeği, granit kökenli ince agregayla hazırlanan betonun daha büyük basınç dayanımı verdiği sonucuna vardılar [10].

Hui Li , Mao-hua Zhang and Jin-ping Ou, 2005 yılında nano-TiO₂ ve nano-SiO₂ parçacıkların, 2,4 incelik modüllü nehir kumu %34- kırılmış diyabaz 5-25 mm çakıl-normal portland çimentosu 42,5-hava sürükleyici katkı ve akışkanlaştırıcı katkıyla imal

edilen 0,42 w/c oranlı 28 günlük kürlü betonun aşınma direnci üzerindeki etkisi ball bearing abrasion machine kullanılarak ve polipropilene fiber de katılarak incelenmiş, nano katkıli betonların aşınma dirençlerinin fiberli normal betondan daha fazla, TiO₂ katkıli betonların a.d. nin SiO₂ katkıli olanlardan daha fazla olduğu ve aşınma direnci ile beraber basınç dayanımının da arttığı, fazla nano parça kullanımının olumsuz etki yaptığı, bunun da su miktarının arttırılmamasından kaynaklandığı zira bu parçacıkların reaksiyon için suya ihtiyaç duydukları ve ayrıca fazla katıldıklarında harç içinde üniform dağılmalarının zorlaştığı, taze betonun düşük slump değerine sahip olmasının yerleşmiş betonun yüzeyinde oluşacak çimentosu yüksek tabakanın kalınlığını azalttığı ve aşınma direncini arttırdığı belirtilmiştir [11].

Siddique R. 2003 de bir yıllık kürlü beton numuneler üzerinde yaptığı bir çalışmada ince agreganın %40 ının yerine uçucu kül kullanmanın aşınma dayanımını %40 artırdığı sonucuna vardı [12].

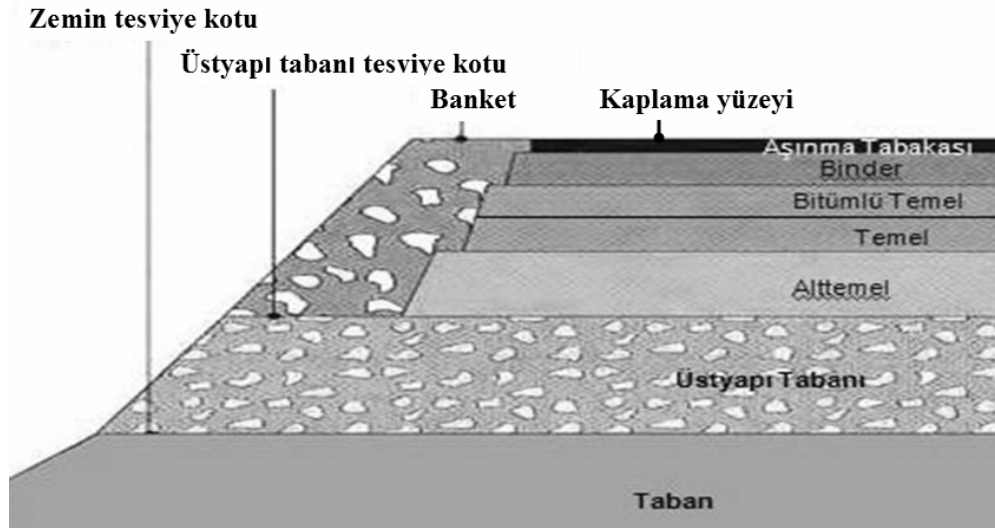
Lee Seung Woo, Cho Yoon Ho, Lee Hyun Jong, KimNam Choul ve Chun Sung Jae'nin 2004 de yaptıkları ince kanal (tinning) ile pürüzlendirilmiş beton yollarda sürtünme katsayısı kaybı isimli çalışmalarında, enine ve boyuna doğrultularda 25 mm arayla 3mm ince kanal (tining) yapılmış, 32 mm en büyük dane çaplı, 0.45 su/çimento oranlı, 390 dozlu, %2 hava yüzdesine sahip beton yüzeylerde ağır taşıt dingil geçiş sayısına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki azalmayı 5 cm genişliğe sahip 60 kg ağırlığındaki tekerleğin kullanıldığı hızlandırılmış aşındırma düzeneği ile 100 000 tekerrür sayısı ile incelediler. Tekerrür sayısı arttıkça sürtünme katsayısının azaldığı ve azalma miktarının ince kanal (tinning) türünden etkilenmediği sonucuna, 10-20-40-80 ve 100 bin tekerrür sayılarında yapılan ortalama pürüzlülük derinliği (kum yayma yöntemiyle) ve british pandulium friction tester ıslak sürtünme katsayısı ölçümlerinden elde edilen verilerden hareketle vardılar [13].

1.3. Yol Üstyapısı Tipleri

1.3.1. Esnek Üstyapı

Esnek üstyapı, kaplama, temel ve alttemel tabakasından oluşan bir üstyapı tipidir. Kaplama tabakası ise aşınma ve binder'den oluşan iki tabaka şeklinde sıcak ya da soğuk bitümlü karışımdan ya da sathi kaplamadan oluşturulur. Diğer tabakalar ise granüler bir

malzeme veya az miktarda bağlayıcı ile işlem görmüş karışımlardır (Şekil 1.1). Tekerlekten yola gelen gerilmeler en üstte asfalt kaplama tabakasıyla karşılanır; alta indikçe gerilme daha geniş alana yayıldığından ve azaldığından gittikçe daha düşük mukavemetli malzemelerden tabaka oluşturularak gerilme, taban zemininin taşıyabileceği değere kadar kademeli indirgenir. Böylece ekonomiklik sağlanmış olur.

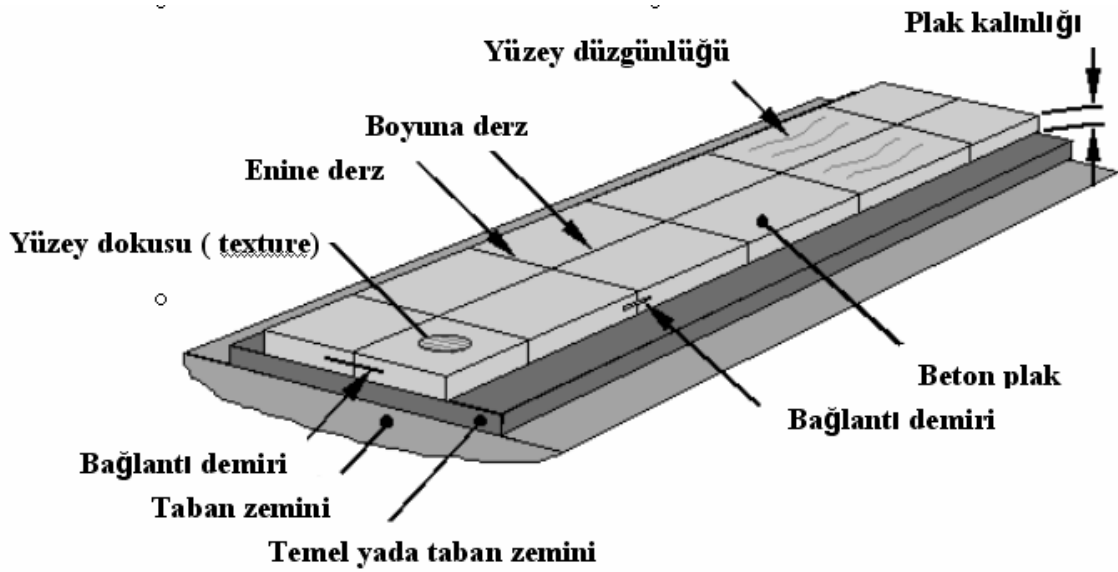


Şekil 1.1. Tipik bir esnek üstyapı enkesiti

1.3.2. Rijit Üstyapı

Oldukça yüksek eğilme direncine sahip ve Portland çimentosundan yapılmış tek tabakalı beton plak vasıtasıyla yükleri taban zeminine dağıtan üst yapı tipidir. Rijit üstyapılar, taban zemini üzerine yapılan beton plakalardan oluşur. Sürekli donatının kullanılmadığı beton yollarda enine ve boyuna genişleme derzleri konulur (Şekil 1.2). Don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı ise beton kaplama ile taban zemini arasında kaplama altı tabakası yapılır. Beton plağın elastisite modülü taban zemininkinden çok büyüktür. Bu nedenle beton yol, elastik zemine oturan bir kiriş şeklinde çalışır. Trafik yüklerini esnek üstyapıya nazaran daha geniş alana yayarak, taban zeminine iletir. Rijit beton plak, taban zemini ile sürekli temas halinde olduğu sürece taşıyıcı eleman vazifesi görür. Taban zemini çeşitli nedenlerle çökerse, taban zemininin deformasyonuna uyamayan rijit beton plak, bu kısımlarda kiriş gibi çalışmaya başlar, betonun düşük olan

çekme basıncının aşılması sonucunda kaplama kırılır. Tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipi olup, gerektiğinde granüler bir kaplama altı tabakası da kullanılabilir. Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Beton, çekme direnci düşük, deformasyonlar ile gerilmeler arasında bağlantıları doğrusal olmayan bir malzemedir [14].



Şekil 1.2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları

1.3.2.1. Taban Zeminleri

Bazı taban zeminleri rijit kaplamaların davranışlarına zarar verecek özelliktedirler. Serbest su bulunması halinde alt temel kısmına uygun malzeme koyarak pompaj olayına yatkın zemin korunmalıdır. Plastisite indeksi 25'ten az olan zeminler uygun bir deney metoduyla tespit edilen yoğunlukların en az %95'i elde edilecek şekilde sıkıştırılmalıdır. Yüksek plastisite indeksine sahip killi zeminler alt temel tabakasına ilave olarak yeterli kalınlıkta seçme malzeme ile örtülmelidir. Don olan alanlarda, önlem olarak dona hassas zemin sıyrılıp atılmalıdır. İyi sıkışmamış daneli taban zeminleri trafiğin titreşimiyle yerleşerek oturacağından yeterince sıkıştırılmalıdırlar. Fazla elastik olan zeminlerde yeterli kalınlıkta uygun malzeme ile ek çökmelerin oluşturacağı zararlı etkilerin önüne geçilir.

1.3.2.2. Kaplama Altı Tabakası

Beton kaplamaya zarar verecek aşağıdaki hallerden biri veya birkaçının mevcut bulunduğu hallerde, beton plak ile taban zemini arasına daneli malzemedan oluşmuş bir tabaka serilir. Bu tabakaya *Alt temel* veya *Kaplama Altı Tabakası* denir.

Kaplama Altı Tabakasını gerektiren haller:

- Donma etkisi
- Yüksek hacim değişmesi gösteren topraklarda "şişme" ve "büzülme" etkisi
- İnce daneli topraklarda "pompaj" etkisi.

Donma etkisi yer yer şiddetli dalgalanma hareketlerine sebep olur ki bu, kaplama yüzeyinin ise yararlığını yok eder veya tabanda devamlı genişleme ve yumuşama haline sebep olur. Sonunda, tabanın taşıma gücü öyle bir değere düşer ki kaplama artık normal yükleri dahi taşıyamaz olur. Silt ve çok ince daneli kumlar gibi kapilaritesi yüksek olan zeminler donma etkisinden en çok etkilenenlerdendir. Yüksek hacim değişimi gösteren topraklara şişme ve büzülmeyi önlemek için şişme yapmayan granüler malzemedan kaplama altı tabakası yapılır. Bu tabakanın kalınlığı toprağın şişme özelliğine, nemlilik durumuna, o yerin iklimine ve kaplama altı tabakasında kullanılan malzemenin sızdırmazlık yeteneğine bağlıdır. Ancak, minimum alt temel kalınlığı 30 cm alınmalıdır. Pompaj (boşalma) olayına karşı yapılan kaplama altı tabakasında (kum + az kil + çakıl) dan oluşmuş granüler malzeme kullanılır. Kaplama altı tabakası en çok 15 cm' lik tabakalar halinde serilir.

1.3.2.3. Beton Plaklar

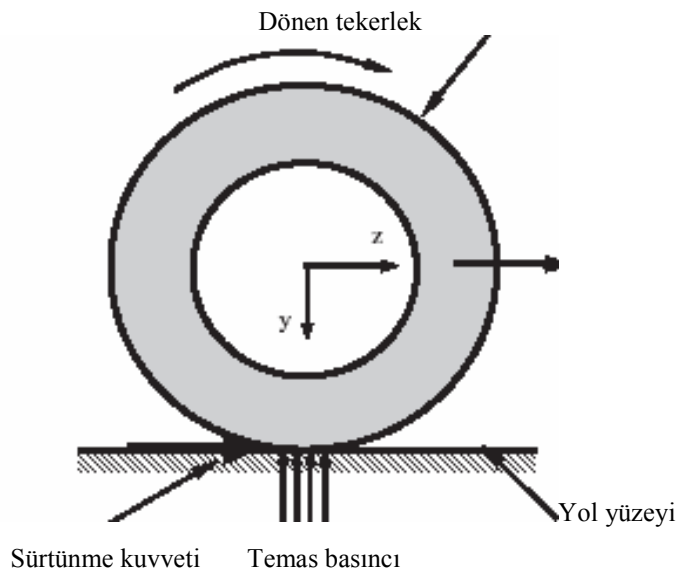
Beton yolların yüzeyleri kayma sakıncası göstermediği ve tutucu, pürüzlü olduğu için %7 ye kadar boyuna eğim uygulanabilir. Daha fazla eğimli ya da daha pürüzlü bir beton yol isteniyorsa yüzeyin özel olarak pürüzlendirilmesi gerekir. Değişik pürüzlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Teknik şartnamelerde yağış sularının çabuk akması için minimum boyuna eğim %0,4 olarak belirtilmiştir.

Beton yolun yüzeyinin düzgün olması suların kolayca akmasına müsait olduğundan, enine eğim boyuna eğime bağlı olarak diğer kaplama cinslerine göre daha küçük alınabilir. Düşük boyuna eğimlerde enine eğim % 2,0; dik boyuna eğimlerde de minimum % 1 olmalıdır. Otoyollarda % 1,6–2 uygundur. Taban zemini özellikleri nedeniyle plak kalınlığını arttırmak gerekirse, bu kalınlık en çok 25 cm' ye kadar çıkarılabilir. En düşük kalınlığa gelince, mevcut ve sağlam bir altyapı üzerine gelecek beton döşemelerin kalınlığı I.grup yollarda 15 cm, ötekilerde 12 cm' den az olamaz. Bu kalınlıklar betonun tek tabaka olarak dökülmesi hali için verilmiştir [14].

1.4. Yol Üstyapısı Seçiminde Etkili Faktörler

1.4.1. Trafik

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları ve hareketlerinden kaynaklanan düşey ve yatay kuvvetleri, dingil sayılarına göre değişen büyüklüklerde dingil ve tekerlek bandajları vasıtasıyla üstyapıya iletilmektedir (Şekil 1.3). Üstyapı tabakalarında oluşan gerilme ve deformasyonların şiddeti o yolun üzerinden geçen taşıtın ağırlığına, tekerlek özelliklerine ve hareket ivmelerine bağlıdır. Bu yolun hizmet ömrü ise yüklerin tekrerrüyle direkt ilgilidir.



Şekil 1.3. Yol yüzeyine tekerlekten gelen kuvvetler

Karayolu üzerinde seyreden taşıtların ağırlıkları standart olmadığından ve farklı etki derecesine sahip olduklarından projelendirmeye esas olarak 8,2 ton'luk standart dingil yükü alınmaktadır. Farklı dingil yükleri ise dingil eşdeğerlik faktörleri yardımıyla standart dingil yüküne dönüştürülmektedir. Proje ömrü boyunca standart dingil yükünün toplam tekerrürü T8.2 olmak üzere Trafik gruplarının belirlenmesinde de ülkemiz karayollarında seyreden taşıtların tipleri ve ağırlıkları dikkate alınmıştır. Trafik grubu olarak yıllık ortalama günlük ağır taşıt trafiği (YOGATT) 500 den az olan yollarımızı temsilen T8.2=0.5milyon ve 1milyon, YOGATT 500 den fazla olan yollarımızı temsilen ise T8.2=5milyon; 10 milyon; 20 milyon; 50 milyon standart alınmıştır.

Trafik hacmi ve trafiğin yıllık artış oranı yüksek olan, trafik içindeki ağır taşıt oranı fazla olan, taban zemininin taşıma gücü düşük olan yollarda rijit üstyapılar daha uygundur. Düşük trafik ve düşük trafik artışları halinde, kademeli inşaata elverişli olduğundan esnek üstyapı ile gelişen trafiğe cevap vermek uygun olmaktadır.

Eğimi fazla, trafiği az olmayan yollarda rijit üstyapılar daha uygundur. Yol üzerindeki seyir hızının 80 km/saat' den 50 km/saat' e düşmesi zemin deformasyonlarının %17 artmasına neden olmaktadır. Neumann, özellikle yokuş yukarı eğimli şeritlerde tekerlek oluşu oluşumunun hızlanıyor olmasını, bu şeritlerde seyreden trafiğin hızını nispeten düşük olmasına bağlamaktadır. Bu durumda, genel olarak trafiğin sıkışmasını önleyici ve dolayısıyla trafik hızını arttırıcı önlemlerin, zaman ve enerji tasarrufu yanında yol yıpranmasını azaltıcı bir etkisinin de olduğu anlaşılmaktadır.

Şehir içi trafiğinin durup kalktığı kavşak ağzlarında bitümlü karışım kaplamalarda dalgalanma-yığılmalar ya da çatlama ve oyuklar oluştuğu ancak bu kısımlara beton kaplama yapılması durumunda gayet güzel sonuçların alındığı bildirilmektedir [14].

1.4.2. İklim

Yol altyapısı genellikle, don çözülmesi görülen ilkbahar ile yağışın fazla olduğu sonbahar mevsimi başlarında özellikle çatlaklardan giren sular nedeniyle kolay deforme olur. Kaplama tabakasını oluşturan asfalt ise ısınma sonucu yazın en düşük taşıma gücüne sahiptir. Mevsimler arası büyük ısı farkları olan, kara iklimi hüküm süren bölgelerde, asfalt betonunun viskoelastik davranışlı bir malzeme olması sebebiyle, yazın tekerlek izi oluşmasına direnç gösteren, kışın ise çatlamayan bir bitümlü karışımın formüle edilmesi henüz ekonomik olarak başırlanamamıştır. Bu tip bölgelerde rijit üstyapıların kullanılması

daha uygundur. Bitümlü kaplamaların uygulanacağı zeminin kuru veya en fazla %2 oranında rutubetli olması gerekir. Bu zorunluluk ise yağışlı bölgelerde bitümlü kaplamaların uygulama süresinin kısılmasına neden olur. Buna karşılık beton kaplamalar nemli zeminler üzerinde yapılabilir.

1.4.3. Maliyet

Üstyapı tipi seçiminin en önemli kriteri, seçilecek kaplama tipinin belirlenen proje ömrü için hesaplanan toplam ekonomik maliyetidir. Bu ise ilk inşaat maliyeti, proje ömrü süresindeki bakımların maliyeti ve bakım işlemleri nedeniyle kullanıcı açısından çıkacak gecikme maliyetlerinin toplamıdır.

1.4.3.1. İlk İnşaat Maliyeti

Kaplama malzemelerin maliyeti:

Üst yapı tipleri için kullanılacak malzemelerin dizayna göre miktarlarının tespit edilip maliyetlerinin hesaplanması ile bulunur. Betonun rijitliği nedeniyle beton yollarda üstyapı kalınlığı azaltılabilmektedir. Bu da agrega tüketimi bakımından beton yollara avantaj sağlamaktadır. Ayrıca beton agregasının bitümlü kaplamalarda kullanılan kadar kaliteli agrega olmasına gerek duyulmamaktadır. Ayrıca beton içinde dayanımı ve kalıcılığı artıran endüstriyel atık maddelerin kullanılması, çimento dozajının azaltılmasına olanak sağlamaktadır.

Malzemelerin taşınma maliyeti:

Bitüm malzemesinin rafineriden nakliye edilmesi, çok daha sık aralıklı fabrikalardan temin edilebilen çimento malzemesi nakline göre çok daha fazla mesafe gerektirmektedir.

İşçilik giderleri:

Genellikle beton yol kaplamalarında kalifiye işçi gereksinimi daha fazla olduğundan bitümlü yollara göre işçilik bedelleri daha fazladır.

İnşaat makinesi masrafı:

Makinelerin yıpranma payı, işletme ve bakım masrafları hesaplanır. Asfalt betonu karışımları için kurutma ve yeniden ısıtma gibi ek üniteler isteyen pahalı plantler gerekmektedir. Beton yollarda ise hazır beton kullanılabilir.

1.4.3.2. Bakım Maliyeti

Trafik ve iklim koşulları yolun bozulmasına neden olan iki önemli faktördür. Bakım ve onarım sırasında, bakımın tipi, yolların bozukluklarının türü ve derecesi, trafik yönünün değiştirilmesi ve iş sonrasındaki kontrolü, bakım yapılacak yolların hizmet ömrü, bakım çalışmaları için ayrılacak süre gibi hususlar önem taşımaktadır.

Rijit üstyapılar 30–40 yıllık hizmet süreleri için projelendirilirler. Beton yollarda yüzey yenileme ve takviye işlerine gerek duyulmaz. Projelendirme ve yapım işlerinin iyi şekilde gerçekleştirilmesi halinde, beton yollar tüm hizmet ömürleri boyunca az miktarda bakım gerektirirler. Esnek üstyapılarda genellikle ilk 5 yıldan sonra küçük onarımlar ve yüzey dolguları gerekebilir. 10 yıl sonra büyük ihtimalle yol yüzeyinin yenilenmesi ve pürüzlendirilmesi gerekecektir.

1.4.3.3. Yolu Kullananların Harcamaları

Normal hallerde lastik aşınması, yağ tüketimi gibi işletme masrafları her iki yol tipinde de eşit miktardadır. Yakıt tüketimi beton yollarda daha azdır. Çünkü elastisitesinin fazla olması sebebiyle yük altında çok az deformasyon oluşacağından tekerlek yüzeyde daha kolay yuvarlanır.

1.4.3.4. Finansman Kaynakları ve İskonto Oranı

Yapım şeklinin finanse edilme şekline göre üstyapı tipi seçimi değişebilir. Bakım değil de yalnızca yapım malzemelerinin finanse edildiği durumlarda rijit üstyapılar tercih edilir. Bunun tersine artan trafiğe cevap verebilmek için art arda tabakaların yapılması gibi kademeli inşaat stratejisi gerektiren, sınırlı yatırım kaynakları ve yüksek iskonto oranı gibi durumlarda esnek üstyapıları kullanmak daha avantajlı olmaktadır.

Beton yol kaplamaları kıt kaynaklı ülkeler için, uygunluğu açısından çekim gücüne sahiptir. Birim yol boyu başına başlangıç yatırımı diğer tür kaplamalara kıyasla bir miktar daha fazla ise de, kendisini makul sürede amorti edebilmektedir. Yapılan araştırmalara göre, usulüne uygun inşa edildiği takdirde, bitümlü karışım üstyapılara kıyasla 5~7 kat uzun ömürlü olmaktadır.

Teknik parametrelere göre seçim yapılırsa, taşıma gücü zayıf taban zemini, büyük hacimli trafikte yüksek artış oranı, yüksek ağır taşıt miktarı, yüksek iklim sıcaklığı halinde rijit üstyapılar, büyük trafik hacminde düşük yıllık artış oranı ve takviye çalışmalarında esnek üstyapılar uygun görülmektedir. Ekonomik parametrelere göre üstyapımı seçimi yapılırsa, bitümlü malzeme azlığı, yüksek kaliteli agrega eksikliği, hidrolik bağlayıcı bulunması ve enerji azlığı halinde rijit üstyapılar, ülkedeki ıskonto oranının yüksek, yol yatırım kaynağının sınırlı olması halinde esnek üstyapılar seçilir. Özey [15] yaptığı çalışmada şu sonuçlara ulaşmıştır:

1- Düşük trafik için esnek üstyapı maliyeti (YTL/Km. olarak) rijit üstyapıdan yaklaşık %8 daha ucuzdur. Yüksek trafik için ise, rijit üstyapı maliyeti esnek üstyapı maliyetine(YTL/Km) nazaran yaklaşık % 40 daha ucuzdur.

2- Üstyapı hesabı için gerekli olan parametreler ne seçilirse seçilsin, trafik yükünün artmasına paralel olarak esnek üstyapı/rijit üstyapı maliyet oranı da artmaktadır. Yani trafiğin artması ekonomik açıdan rijit üstyapıyı avantajlı hale getirmektedir.

3- Taban zemininin taşıma gücünün (CBR) düşük olması durumunda, trafik ne olursa olsun rijit üstyapı daha ekonomiktir. Bu durumda aralarındaki maliyet farkı %52'ye kadar çıkmaktadır.

4- Aynı taban zemini için trafik artışı ile esnek üstyapı maliyetinin değişimi rijit üstyapıya nazaran daha fazla olmaktadır.

5- Trafiğin $T_{8.2}=10$ milyon değerine kadar taban zemininin taşıma gücünün (CBR) artması halinde esnek üstyapı ekonomik olmasına karşın, 10 milyondan daha büyük olduğu durumlarda rijit üstyapı daha ekonomik olmaktadır. Trafik ne olursa olsun taban zemininin taşıma gücünün artması halinde, ekonomik açıdan rijit üstyapının avantajı azalmaktadır.

6- İklim koşullarının iyileşmesi halinde, esnek üstyapı maliyeti azalmakta, kötüleşmesi halinde maliyet, rijit üstyapı lehine dönmektedir.

7- İklim koşullarının don etkisi bakımından hafif olması durumunda esnek üstyapı daha ekonomik olmaktadır.

8- Yüksek trafik etkisinde ($T_{8.2}>5$ milyon) ve hafif iklim koşullarında rijit üstyapı ekonomik olmakta, ağır iklim koşullarında ise durum, rijit üstyapı lehine dönmektedir.

1.4.5. Güvenlik ve Konfor

Her iki kaplama türü gerekli kıstaslar gözetilerek yapıldıkları takdirde, güvenli ve konforlu bir seyir imkânı sağlamaktadırlar. Beton yollar açık renkleri ile gece kolay görülür, sürücüyü yormaz. Ancak güneşli havalarda yansıma yaparak göz kamaştırırlar. Bitümlü kaplamaların ise gece görüş mesafesi kısadır. Asfalt kaplamalarda oluşabilen oluklaşma ve yığılma-dalgalanmalar suyu göllestirerek özellikle soğuk iklimlerde seyir güvenliğini tehlikeye atabilirler. Sıcak havalarda bitümün yüzeye çıkması da tehlike oluşturur.

1.5. Beton Yolların Tarihçesi

Yollarda hidrolik ve puzolanik bağlayıcılar ilk olarak Romalılar tarafından M.Ö. 1.YY' da kullanılmıştır. Taşları birbirine bağlamak için kullanılan bağlayıcı iki kısım doğal puzolan ve bir kısım kireçten oluşmuştur. Tarihin seyri içinde tespit edilen gelişmeler maddeler halinde şu şekilde sıralanmaktadır [14]:

- 1865 İskoçya'da ilk beton yol denemeleri
- 1880 Avustralya'da ilk beton yollar yapılmaya başlıyor
- 1891 Ohio'da Amerika'nın, bugün de kullanılmakta olan ilk beton yolu yapılıyor
- 1913 Arkansas'ta Amerika'nın ilk beton otoyolu yapılıyor
- 1914 Amerika'da 3.500 km beton yol yapımı tamamlanıyor; yol yapımında "Silindire Sıkıştırılan Beton Yollar" kullanılmaya başlanıyor
- 1924 Fransa'da beton yol yapımı programı başlatılıyor
- 1930 Almanya'da 4.000 km uzunluğunda beton otoyol yapımına başlanıyor İsviçre, Belçika başta olmak üzere, diğer Avrupa ülkelerinde de beton yol yapımı başlıyor
- 1950 Kayar kalıp kullanımıyla beton yol yapımında hız ve kalite artıyor
- 1960 – 70 ABD ve Kanada'da beton yol yapımı yoğunlaşıyor; ABD'de 70.000 km

beton yol yapılıyor.

Beton yol teknolojisinde yaşanan hazır beton, kayar kalıp, geçirimli beton, lifli beton, ön gerilmeli beton, sürekli betonarme gibi yenilikler ve hızlı gelişmelerle beton kaplama, günümüzün modern yolları için asfalt kaplamalara karşı önemli bir alternatif haline gelmiştir.

1.6. Beton Yolların Avantajları ve Dezavantajları

1.6.1. Beton Yolların Üstünlükleri

Beton yollar birçok açıdan üstünlüğe sahiptir. Bugüne kadar yapılan araştırmalar da bunu kanıtlamaktadır. Beton yolların en başta gelen üstünlükleri uzun hizmet ömrü, ağır trafik ve iklim şartlarına karşı üstün dayanıklılığı ve uzun süre bakım gerektirmemesidir.

a. Beton Yolların Yapısal Ömrü Fazladır: Beton kaplamanın sınanmış en önemli üstünlüğü uzun hizmet ömrü ve üstün dayanıklılığıdır. Örneğin A.B.D’de eyalet karayolu performansları yıllar içerisinde izlenerek kaydedilen bir araştırmada, beton yolların servis ömürleri (tamire ihtiyaç gösterme süresi) eyaletler bazında 20-25 yıl civarında olurken asfalt yollarda 6-14 yıl olmaktadır. Başka bir araştırmaya göre de beton yolun beklenen ömrü 34 yıldır, asfalt yolun ise tam yarısı, 17 yıldır. Bu araştırma aynı zamanda asfaltın küçük bakımlarının her 3-5 yılda bir, rehabilitasyonunun da 17’nci yılda olduğunu, öte yandan betonun ilk küçük bakımının 12’nci yıldan, yüzeyinin yeniden düzeltilmesinin ise 18’inci yıldan sonra yapıldığını ortaya koymaktadır [14]. Dayanıklılığı ve beklenmedik çevresel etkilere ve yüklere karşı koyabilmesi ile şehir içi yollarda çok uzun süreli bir hizmet sunuyor.

b. Tamamen Yerli Malzeme ile Yapılır: Beton yollar, Türkiye’nin kendi kaynaklarından ve düşük maliyetlerle yapabileceği bugüne kadar pek dikkate almadığı bir karayolu seçeneğidir. Bugün Türkiye’nin dört bir yanına dağılmış 39 çimento fabrikası ve 490 adet beton tesisi bulunmasına rağmen, bitüm temin edilen yalnızca 5 adet rafineri bulunmaktadır. Kullanılan bitümün önemli bir kısmı ise ithal edilmektedir.

c. İlk Yapım Maliyeti Yüksek Değildir: Yaptığımız bir araştırmada ülkemizde beton yol yapım maliyetinin daha ucuz olduğu da ortaya çıkmıştır. İlk yapım maliyetleri karşılaştırmasına göre, asfalt yolun kilometre maliyeti 2004 yılı verilerine göre 436 – 622 milyar lira arasında değişmektedir. Yolun beton yol olarak inşa edilmesi halinde ise kilometre maliyetleri 369 – 570 milyar lira arasında değişmektedir. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı’nın kriterlerine göre yapılan bu maliyet hesapları beton yolun asfalt yola göre yüzde 20 – 30 arasında daha ucuz olacağını göstermektedir. Beton yolların ilk yapım maliyetleri asfalt yollarla aynı olduğu düşünülse bile yolun hizmet ömrü boyunca tüm maliyetleri düşünüldüğünde beton yollar, asfalt yollara göre yüzde 30–60’a varan daha az maliyetlere sahiptir.

d. Beton Yollar, Asfalt Yollara Göre Daha Az Mevsimsel Hasara Uğrarlar: Betonun dayanıklılığının en çok önem kazandığı mevsim ilkbahardır. AASHTO Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği tarafından Kanada’da yapılan bir araştırmaya göre, asfalt yolların yüzde 61’i bahar koşullarında bozulmaktadır. Oysa aynı koşullarda beton bozulma oranı sadece yüzde 5,5’tir. Hem yazın sıcakta erime gibi bir tehlikeye sahip değil, hem de kışın buz çözücü tuzlardan dolayı yıpranması daha azdır [14].

e. Beton Yolların Taşıma Gücü Yüksekler: Beton yol, üzerine gelen yükleri asfalta göre çok daha geniş bir alana yayarak, taban zemine iletir. Yani taşıma gücü taban zeminine bağlı değildir. Bu nedenle, beton yol zayıf taban zeminleri üstünde asfalt yollara göre daha iyi sonuçlar vermekte, dayanma bakımından her türlü etkiye karşı koyacak şekilde hazırlanabilmektedir. Bozulmuş asfalt yollar için en önemli çözümdür. Yapılan önemli araştırmalarla, bozulmuş asfaltın üstüne çok ince beton kaplama (white topping) uygulanmasının en iyi çözüm olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kavşaklar, otobüs şeritleri gibi yerlerdeki uygulamalar büyük başarı getirmektedir.

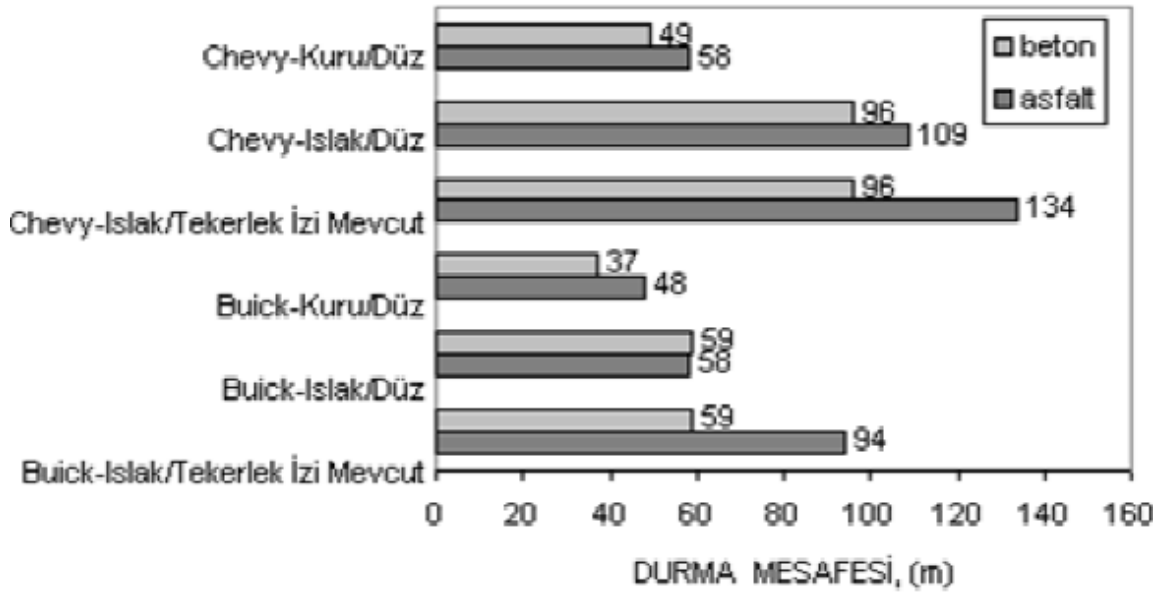
f. Beton Yollar Her Mevsimde ve Her Koşulda Yapılabilir: Asfalt uygulaması düşük sıcaklıkta ve yağışlı havalarda yapılamadığından, yapım ve onarım mevsimi kısadır. Beton yol uygulaması ise asfaltın aksine ıslak zemin de dâhil olmak üzere, hemen her iklim koşulunda yapılır. Asfalt kaplamalar belirli bir sıcaklıkta dökülmesi ve silindirle sıkıştırılması gerekmektedir. Beton kaplamalar ise vibratörlerle sıkıştırmakta olup, ısı kaybı gibi bir sorun söz konusu değildir.

g. Trafiği daha az engeller: Neredeyse hiç olmayan tamir–bakım ihtiyacı ile yol hizmete açıldıktan sonra trafik sıkışmasına imkân vermez.

h. Beton Yol Doğal ve Kentsel Çevreye Zarar Vermez: Asfalt kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında, petrol türevi malzeme olan bitümün ısıtma ve agreganın kurutma işlemlerinin bulunması nedeniyle bir ölçüde çevre kirliliğine yol açmaktadır. Bitümün ısıtılmasıyla kanserojen bir emisyon ortaya çıkması ve ısıtma işleminin enerji sarfiyatına neden olması gibi etkiler bulunuyor. Çevreye duyarlı ülkelerde birçok şehir içinde bitüm kullanılması yasaklanıp beton yol yapımına hız verilmesinin nedenlerinden biri de budur. Asfalt yollarda bağlayıcı olarak kullanılan bitümlü bağlayıcının bünyesinde çeşitli uçucu maddeler bulunmakta ve bu uçucu maddelerin zamanla kaybolması sonucunda, kaplamada *yaşlanma* adı verilen bir tür gevrekleşme ve eskime görülmektedir. Bu yaşlanma ile niteliklerinin ve özelliklerinin büyük bir kısmını kaybeden asfalt kaplamalar ayrıca benzin, motorin, fuel oil, yağ, tuz gibi maddelerin yol üzerinde dökülmesi ile de kimyasal

yapılarında değişimler gösterir. Kaplamaların olumsuz yönlerde değişmesine yol açan bu durum, çok kere yol güvenliği açısından da büyük tehlikelere ve çevre kirliliğine yol açacak boyutlara ulaşmaktadır. Beton yolların bağlayıcı maddesi çimento ise herhangi bir uçucu madde içermemektedir. Bu nedenle beton yol için yaşlanma, gevrekleşme söz konusu değildir.

i. Beton Yollarda Daha Kısa Durma Mesafesi Sağlar: Beton kaplamaların kayma sürtünme katsayıları yüksektir. Beton yolun ortalama boyuna sürtünme katsayısı 0.70, enine sürtünme katsayısı ise 0,65 civarındadır. Yol yüzeyi düzgün olduğundan yağış suları kolay akar ve yüzey çabuk kurur. Sürücülerin güvenliği düşünülürse, beton yolun yapısı daha da önem kazanır. Asfaltta oluklaşmadan doğan tümsekler ve çukurlar yağışlı havalarda fazladan su tutar. Bu da su kızıağı tehlikesi için büyük bir potansiyel oluşturur. Ayrıca, biriken sular soğuk havalarda don yapabilir.

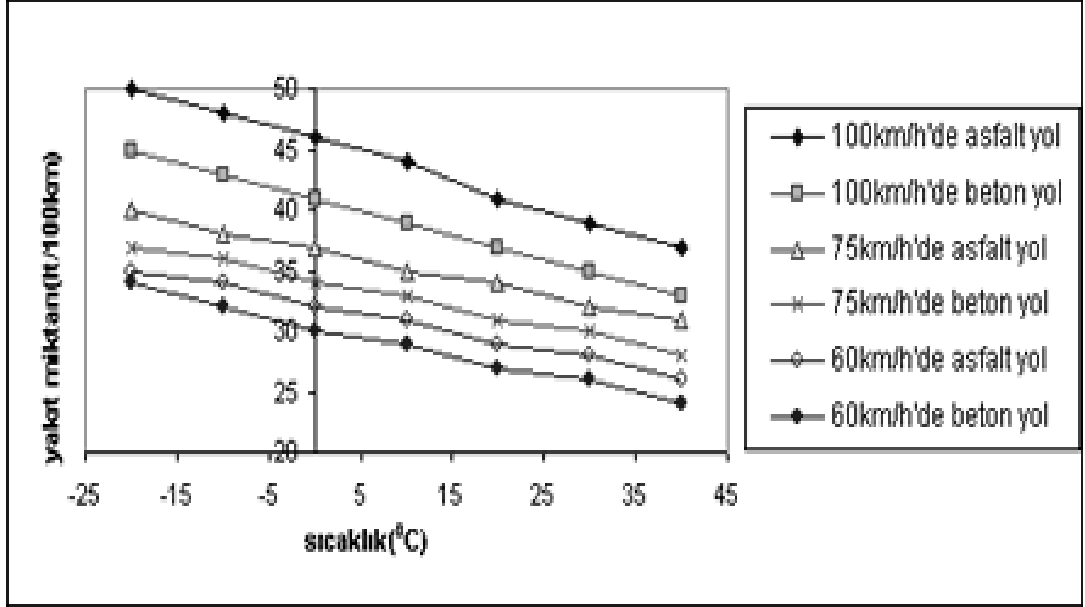


Şekil 1.4. Beton ve asfalt yollardaki durma mesafelerinin karşılaştırılması

Illinois Üniversitesi tarafından sunulan “ Beton asfalt yol yüzeylerindeki oyulmalar ve tekerlek izinin sürüş güvenliğine etkisi” isimli çalışmada, beton yüzeyindeki durma mesafesinin, beton asfalt yüzeyindeki durma mesafesinden daha kısa olduğunu (özellikle beton asfalt ıslak ve tekerlek izi oluşmuş durumda) gösterilmiştir.

j. Beton Yol Akaryakıt Tasarrufu Sağlar: Ağır araçlar, asfalt yollarda beton yollara göre daha fazla deformasyona neden olurlar. Kaplamadaki bu deformasyon, taşıt

enerjisinin bir kısmını emer. Bu nedenle, esnek kaplamalarda sürüş için daha fazla enerjiye ve dolayısıyla daha fazla yakıt tüketimine ihtiyaç vardır (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. Yakıt tüketiminin asfalt ve beton yola göre değişimi

k. Beton Yollar Gece Görüşünü Kolaylaştırır: Beton yollar doğal olarak açık renklidir ve araçlardan veya sokak lambalardan gelen ışıkları, koyu asfalt kaplamalara göre daha fazla yansıtırlar. Böylece gece görüşü artar. Işıklandırma için daha az enerji sarfiyatına ihtiyaç duyulur. Islak olduğu zaman bile tehlikeli far ışığı yansımalarına sebep olmaz. Bu konu trafik güvenliği açısından önemlidir. İstenirse çok ucuza renklendirilebilmesi gibi estetik alternatifleri vardır.

l. Beton Yolun Sürüş Konforu Yüksekler: Kanada'da yapılan bir araştırmanın sonuçlarına göre beton yollar sürüş rahatlığı ve yüzey düzgünlüğü açısından asfaltdan daha iyidir. Bu araştırma çerçevesinde yıllar boyunca beton ve asfalt yolların yüzey düzgünlüğü indeksleri belirlenmiştir. Beton yolların düzgünlük değeri 5 yıl içinde 4 mm'den 7 mm'ye çıkarken asfalt yollarda 16 mm'ye kadar çıkmaktadır. Bu sonuç betonda yüzey düzgünlüğünün daha uzun süre korunduğunu göstermektedir [14].

1.6.2. Beton Yolların Dezavantajları

a. Açık rengi dolayısıyla güneşte göz kamaşmasına sebebiyet verir. Betona boya karıştırılıp renkli yol yapılarak bu sakıncaları giderilebilir.

b. Derzler ve kaplama yüzeyinde hem drenaj ve hem de kaymaya karşı direnç sağlanması için oluşturulan ince kanallar (tinning) özenle yapılmazsa gürültü yapmakta ve sürüş konforunu azaltmaktadır.

1.7. Yol Yüzeyine Gelen Gerilmeler

1957–1961 yılları arasında yapılmış olan çok geniş çaplı olarak gerçekleştirilmiş olan AASHO (American Association of State Highway Officials) yol testleri ile ortaya çıkarılmış olan test sonuçları, elastik tipteki bir yol kaplamasının yıpranma hızının üzerinde seyreden aksların yüklerinin yaklaşık dördüncü kuvveti ile orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Daha sonra yapılan bazı çalışmalardan bu üssün elastik yol kaplamaları için 1,3- 6 rijit yol kaplamaları için ise 8- 33 arasında değişen değerler alabildiği anlaşılmaktadır [16].

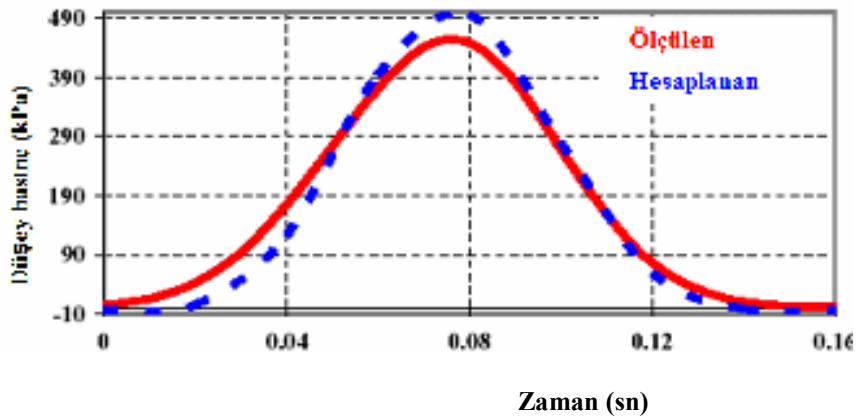
1.7.1. Düşey Gerilmeler

Burada dikkate alınan gerilmeler ağır taşıtların tekerleklerinden aktarılan yüklerden kaynaklanırlardır. Diğer lastik tekerlekli araçlardan gelenlerin etkisi çok küçük kalmaktadır. Bu ağır taşıt trafiği nedeniyle yollarda oluşacak aşırı zorlanmaların önüne geçebilmek için taşıt dingil yüklerine kısıtlama getirilmiş (Tablo 1.1) ve bu sınırlara uymayanlara yüklü miktarda para cezası kesilmesi kararlaştırılmıştır.

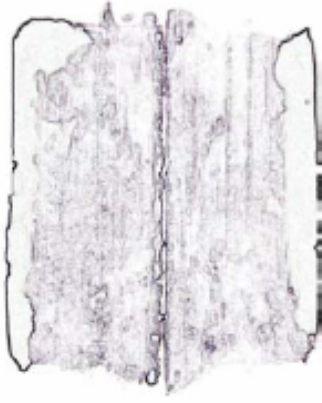
Düşük hızlardaki taşıtların tekerleklerinin temas ettiği yol yüzeyindeki gerilme dağılışı hareket yönünde çan eğrisi şeklinde olmaktadır. Tekerleğin enine kesiti boyunca oluşan gerilmeler ise Şekil 1.6. da gösterilmiştir. Yol yüzey durumuna göre tekerleğin temas alanı ve oluşacak gerilme dağılışı da farklı olacaktır (Şekil 1.7 ve Şekil 1.8).

Tablo 1.1. Çeşitli ülkelerde, aks yükleri ve toplam taşıt ağırlıkları ile ilgili sınırlar [17].

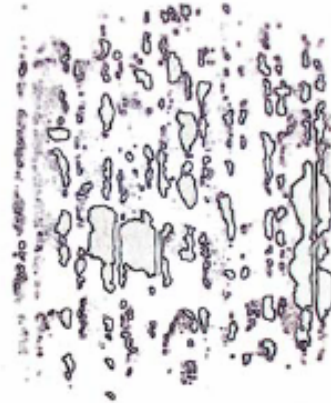
	Aks yükü (t)			Taşıt ağırlığı (t)			
	Direksiyon aksı	Tek aks	Çift aks	2 aks	3 aks	Yarı römorklu katar	Römorklu katar
EWG		10	11–20	18	25	40–44	40
Almanya	10	10	11–20	17	24	40–44	40
Avusturya	10	10	16	16	22	38	38
Bulgaristan	6	10	13–20	16	26	38	42
Belçika	10	10	19–20	19	26	44	44
Danimarka	10	10	16–20	18	24	48	48
Finlandiya	8	10	18	17	25	44	56
Fransa	13	13	21	19	26	40–44	40
Hollanda	10	11	11,5–19	20	30	50	50
İngiltere	9.2	10.5	10,5–20,34	17	24.39	38	32.52
İsveç	10	10	16	17	29	37,5–51,4	37,5–51,4
İsviçre	10	10	18	16	19	28	28
İtalya	12	12	20	18	24	40–44	40–44
Macaristan	10	10	16	20	24	40	40
Norveç	10	10	16	20	26	45	50
Polonya		8–10	14.5	16	24	38	33
Romanya		10	16	16	22	38	38
Türkiye	13	13	19	19	26	42	42
Yugoslavya	10	10	16	18	24	40	40
Yunanistan	7	10–13	20	19	26	38	38



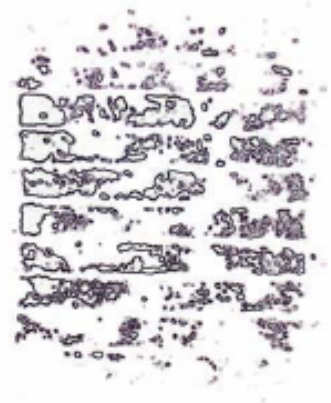
Şekil 1.6. Tekerlek temas alanında boyuna doğrultudaki düşey basınç dağılışı



a) pürüzlendirilmemiş

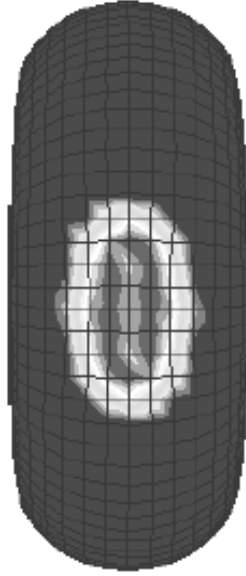


b) boyuna ince kanallı

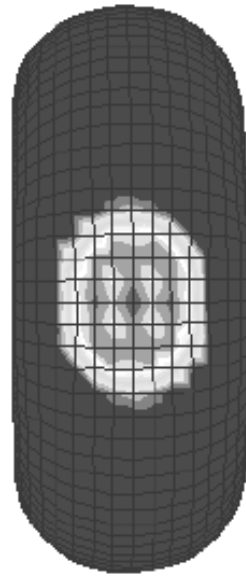


c) enine ince kanallı

Şekil 1.7. Beton yolun üç farklı yüzey durumuna göre tekerleğin temas biçimi



a) pürüzsüzlendirilmemiş



b) boyuna ince kanallı

Şekil 1.8. Yüzey pürüzlendirmesine göre temas basıncının dağılışı

Aynı yükü taşıyan farklı çaplardaki tekerleklerin yol yüzeyine uyguladıkları basınç gerilmeleri farklı olacaktır. Yapılan bir çalışmada farklı tekerlek çapları ve şişme basınçlarına göre elde edilen bulgular aşağıdaki Tablo 1.2 de verilmiştir [18]. Tekerlek tipi

kodlamasında R radyal lastik tipini, ilk sayı lastik taban genişliğini ve son sayı da inç ölçüsünden jant çapını göstermektedir.

Tablo 1.2. Tekerlek tipi ve iç basıncına göre temas alanları ve temas basıncı değerleri

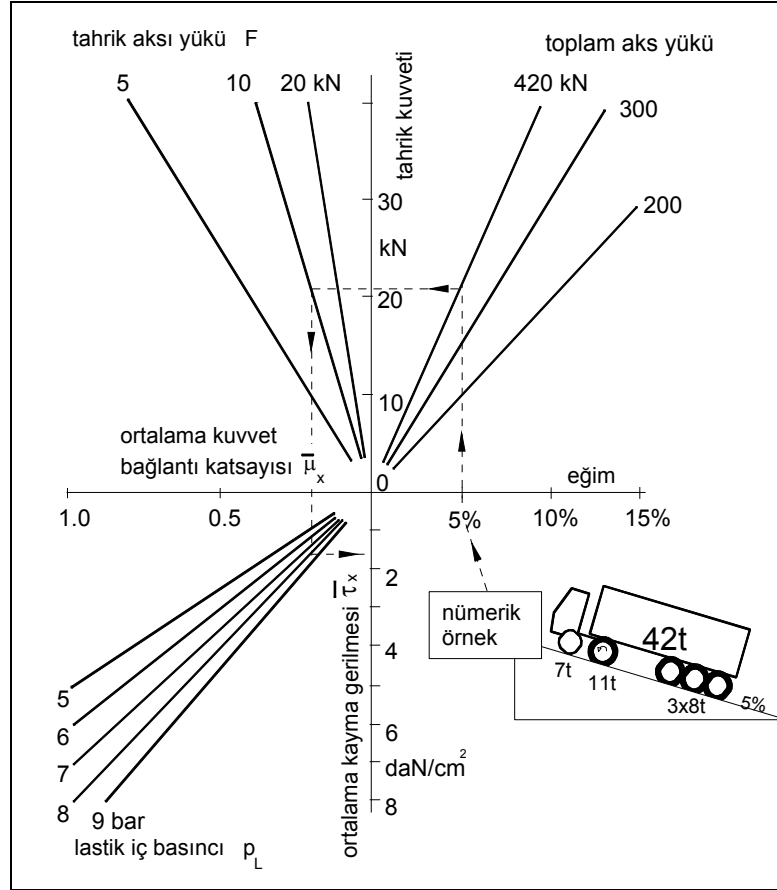
Tekerlek Tipi	Yük (kN)	Şişme Basıncı (kPa)	Hesaplanan Temas Alanı (mm ²)	Ölçülen Temas Alanı (mm ²)	Temas Basıncı (kPa)
11R22,5	26,0	520	50,406	36,585	712
	31,0	690	45,000	34,547	898
	41,0	820	50,013	43,389	945
295/75R22,5	26,0	520	50,406	36,323	716
	31,0	690	45,000	39,474	787
	41,0	820	50,013	47,453	865
11R24,5	20,4	483	42,393	41,153	496
	27,5	690	40,000	48,301	572
	34,6	897	37,716	51,737	662
215/75R17,5	13,3	588	22,767	23,313	573
	22,2	22,2	28,052	27,151	819
	31,1	31,1	31,148	31,052	1005

1.7.2. Kayma Gerilmeleri

Normal şartlarda yuvarlanma halindeki araç tekerleki ile yol yüzeyi arasında desenli tekerlek yüzeyinin deformasyonundan kaynaklanan %5 den daha az miktarlarda kayma (slip) vardır. Tekerlek tam frenlemeye geçtiğinde %100 kayma söz konusudur [19].

Fren kuvvetlerinin yol açtığı kayma gerilmelerinin, fren iyilik derecesine bağlı olarak oldukça yüksek değerler alabileceği anlaşılmış olup, bütün kayma gerilmeleri lastik iç basıncına bağlı olarak ifade edilmiş ve kayma gerilmesi ile lastik iç basıncının doğru orantılı olduğu görülmüştür. İç basınç azaldığında aynı yük altında temas alanı büyür ve düşey gerilme azaldığından kayma gerilmesi de azalır (Şekil 1.9).

Fren kuvvetleri hiçbir taşıtta akslara ideal biçimde dağılmadığından, yukarı mertebelerde bir frenleme sırasında kuvvet bağlantı katsayıları bazı tekerleklerde düşük değerler alırken bazı tekerleklerde de zemin ve tekerleğin izin verdiği en yüksek değerlere kadar çıkmaktadır. Örneğin ıslak bir zeminde, trafik lambası önünde $z = 0,15$ değerinde bir ivmeyle frenleme yapan bir katarın akslarından birinin tekerlekleri bloke oluyorsa (sürtünme katsayısı = 0,6 olsun), bu aksın lastiklerinin basıncının 8 bar olduğu kabulü ile yüzeyde oluşacak kayma gerilmesi $4,8 \text{ kgf/cm}^2$ olur. Genelde kayma değerlerinin $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ civarında olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır [17].



Şekil 1.9. Tahrik tekerleklerinin yol açtığı kayma gerilmelerinin eğim, taşıt ağırlığı ve tahrik aksı yüküne bağlı değişimini gösteren nomogram [17].

1.8. Yolların Yüzey Özellikleri

Modern bir karayolu yapısal sağlamlığının yanında taşıtların güvenli, konforlu ve ekonomik bir şekilde seyretmelerine olabildiğince uzun yıllar boyunca olanak sağlayacak yüzey özelliklerine de sahip olmalıdır. Bu özellikler yol kaplama yüzeyinin pürüzlülüğü-küçük çıkıntıları, yüzey düzgünlüğü-yüzey teğetinden sapmalar-dalgalanmalar ve tekerlek-yüzey arası sürtünme katsayısı değeri olmak üzere üç başlık altında incelenmektedir.

Tüm yol tipleri için yol yüzey özelliklerinin uluslararası tanımı PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) tarafından 1987 yılındaki kongresinde yapılmıştır [20]. Bu tanımlamaya göre, yol yüzey özellikleri, yolun gerçek profilinin, yolun teorik profilinden sapmaları olarak belirtilmiştir. Yol yüzey özellikleri, bu sapmaların dalga boyuna (λ) bağlı olarak, yol yüzey dokusu ve geometrik düzgünlüğü olmak üzere iki ana kısma ayrılmıştır (Şekil 1.10). Bu tanımlama aşağıdaki gibi belirtilebilir;

Yol Yüzey Dokusu-Pürüzlülüğü:

Mikro doku $\lambda < 0.5\text{mm}$.

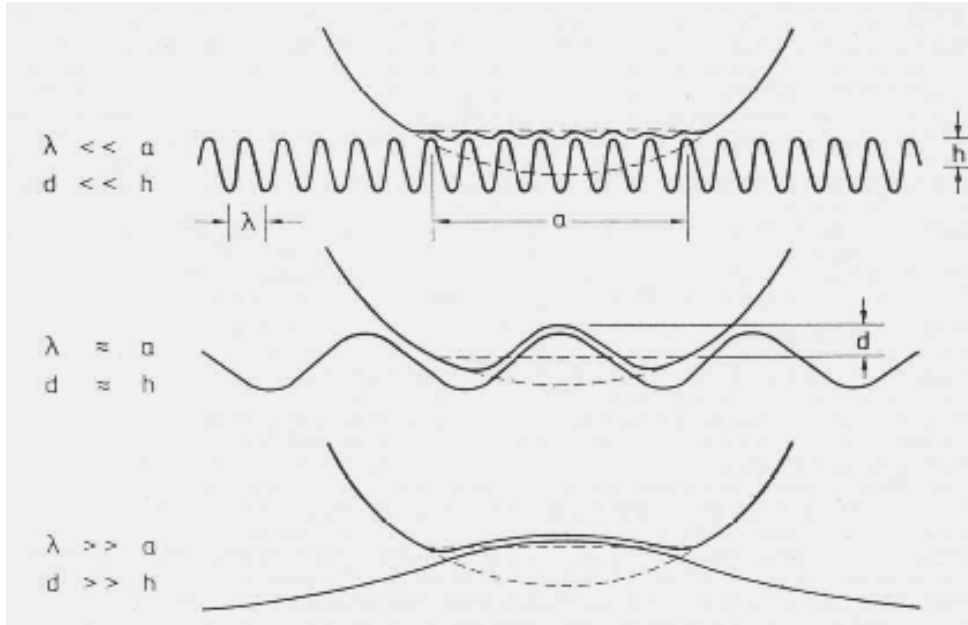
Makro doku $0,5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$.

Mega doku $50\text{mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$.

Geometrik Düzgünlük:

Boyuna Geometrik Düzgünlük $0,5 \text{ m} < \lambda < 50 \text{ m}$.

Enine Geometrik Düzgünlük $0,5 \text{ m} < \lambda < 50 \text{ m}$.



Şekil 1.10. Yol yüzey özelliklerindeki farklı durumların basit gösterimi

Beton yol yüzey özelliklerinden mikrodoku, karışımdaki agregaların yüzeyine bağlıdır. Makrodoku ise agreganın dane boyutuna bağlı bir parametredir. Megadoku ise yol yapım aşamasında finişerin vibrasyonu sonucunda veya yol yüzeyinin zamanla bozulması sonucu oluşan çatlaklar, tekerlek izi vb. nedeniyle ortaya çıkar. Beton yolun geometrik düzgünlüğü ise yine yol yüzeyinin zamanla trafik ve çevre şartları nedeniyle bozulması ile oluşan büyük boyutta çatlaklar, kopmalar, yol taban zeminin çökmesi ve/veya yapım sırasındaki yapım hataları sonucunda meydana gelir.

1.8.1. Geometrik Düzgünlük

Geometrik düzgünlüğünün kalitesi, yol yüzeyinde girinti ve çıkıntı bulunup bulunmamasına bağlıdır. Bu girinti çıkıntılar, yolun teorik (proje) yüzeyi ile gerçek yüzey arasındaki farklardan ileri gelir. İki yüzey arasındaki düşey farkların problemi üç boyutludur. Ancak yol mühendisleri yalnızca enine ve boyuna profilleri inceleyerek problemi iki boyutlu hale indirgemişlerdir. Bir yolda kalite değerlendirmesi yapılacağı zaman dikkate alınacak en önemli yüzey özelliği geometrik düzgünlüktür. Yapım sırasında iyi bir geometrik düzgünlük elde edilmesi;

- Üniform kıvama ve yeterli bir islenebilirliğe sahip, serme makinelerine uyum sağlayabilen beton kullanılması,
 - Beton santralı kapasitesinin, serme makinelerini, duraklamalara yol açmayacak şekilde sürekli besleyebilecek düzeyde olması,
 - Şantiye uzaklığının, taşıma sırasında betonun sertleşmesinden sakınmak için sınırlandırılması,
 - Taban zemininin ve kaplama altının yeterli ve üniform bir stabiliteye sahip olması ve iyi tesviye edilmesi,
 - Kalıpların, makinelerin geçişleri sırasında yerlerinden oynamayacak şekilde monte edilmesi,
 - Taze betona donatıların vibrasyonla gömülmesi sırasında geometrik düzgünlüğün bozulmamasına özen gösterilmesi,
- Faktörlerine bağlıdır.

1.8.2. Pürüzlülük

Pürüzlülük, PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) tarafından üç seviyede tanımlanmıştır.

1.8.2.1. Mikro Pürüzlülük

Mikro doku (mikrotexture) düşeyde 0,001 mm ile 0,5mm, yatayda 0,5 mm den küçük çıkıntıları (asperity) kapsar. Beton yüzeylerin mikrodokusu çoğunlukla çimento

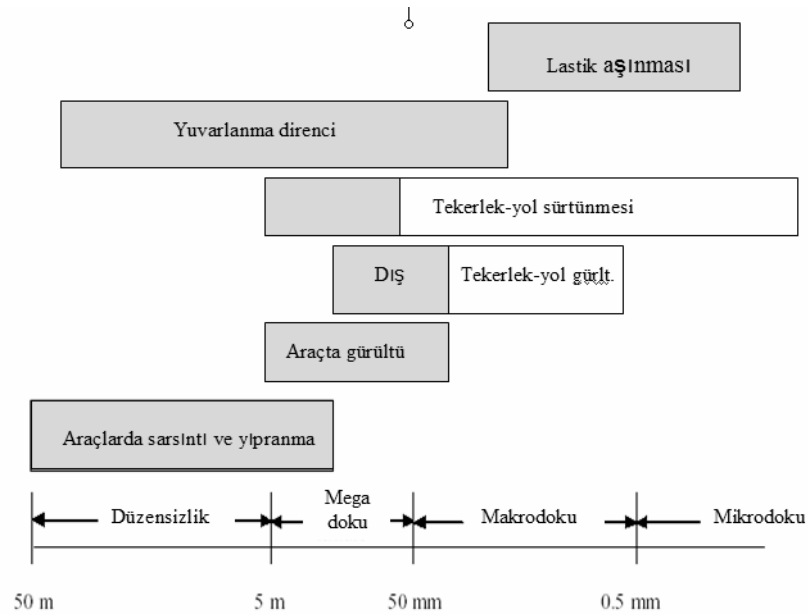
hamurundaki ince agregalarca oluşturulur. Pütürlü kırılma yüzeylerine sahip veya farklı sertlikte mineralleri barındıran kaba agrega daneleri de mikrodokuya katkı sağlar. Su filminin 0,1 mm den az olduğu ıslak koşullarda yapılan manevralarda veya frenlemelerde daha çok etkilidir. Tekerlek yüzey arası kenetlenmeyi artırarak etkili temas alanı oluşturur.

1.8.2.2. Makro Pürüzlülük

Makrodoku düşeyde 0,5 mm ile 20mm ve yatayda 0,5 mm ile 50 mm arası çıkıntıları kapsar. Tekerlek yol temas alanı arayüzünden suyun drene edilmesini sağlar. Karışım içindeki agregaların dane şekli, büyüklüğü, gradasyonu ve beton yüzeyin bitirme şekline oluşturulur. Genellikle ortalama doku (texture) derinliği MTD veya ortalama profil derinliği MPD olarak ifade edilir [21].

1.8.2.3. Mega Pürüzlülük

PIARC tanımıyla Mega doku, yatayda 50-500 mm, düşeyde 0,1-50 mm ölçülere sahiptir (Şekil 1.11). Pürüzlülüğten daha çok kaplama yüzeyindeki dalgalanma, kusur, arıza olarak algılanmaktadır.



Şekil 1.11. Yol yüzey özelliklerinin araçlara etkisi

1.8.2.4. Pürüzlülük-Lastik Aşınması İlişkisi

Tekerlek lastiğinin aşınması üzerinde yapılan detaylı araştırmalar sonucunda, tekerlek lastiğinde meydana gelen aşınmanın, daha pürüzlü yol yüzeyinde, pürüzlülüğü az olan yol yüzeyine göre üç kat fazla olduğu gözlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda yol yüzeyi mikrodokusunun tekerlek lastiğinin aşınmasında belirleyici bir rolü olduğu saptanmıştır [22].

1.8.2.5. Pürüzlülük Ölçüm Yöntemleri

Kaplamanın pürüzlülüğünü ve sürtünmesini ölçmek için son elli yılda yol üzerine çalışan birimlerce birçok yöntem ve cihaz geliştirildi. Bunlar ölçüm prensipleri, prosedürü ve veri alma yöntemi açısından farklılıklara sahiptirler. Pürüzlülük ölçümlerinde lazer cihazları, hacim teknikleri, sıvının drenaj oranı teknikleri başarıyla kullanılmaktadır.

1.8.2.5.1. Mikrodokuyu Ölçme Yöntemleri

Önceleri arazide ölçüm almak için hassas, pratik olabilecek bir direkt ölçüm yöntemi yoktu. Dromometre adı verilen Agustinin geliştirdiği yüzeyde gezen iğne ucunun hareketlerini kaydeden cihaz kullanılıyordu. Bu teknik, makine alanında çelik yüzeylerde halen kullanılmakta olsa da yol yüzeyinde kazıma yaptığından hassas ve sağlıklı değildi. Bugün lazer teknolojisi kullanılmaktadır. Laboratuvar için özel geliştirilmiş bilgisayar destekli, yakın mesafe lazerli, mikrondan nano hassasiyetine kadar ölçüm yapan cihazlar yapılmıştır. Bu cihazlar makine mühendisliği, diş hekimliği vb alanlarda da kullanılmaktadır. Arazide yol yüzey özelliklerinin hızlı ölçümü için araçlara takılmış bilgisayar destekli lazerler kullanılmaktadır. Ancak bunların ölçüm aralıkları büyük olduğundan laboratuvardakiler kadar hassas değildirler.

Yüzeğe çekilen fotoğraflar, görüntü değerlendirme tekniği kullanılarak dolaylı olarak analiz edilebilmekte olsa da bu teknik lazer kadar pratik ve hassas değildir.

1.8.2.5.2. Makrodokuyu Ölçme Yöntemleri

Makrodokuyu doğrudan doğruya (dolaysız olarak) ölçmek için en sık kullanılan yöntemler, Kum Yama, Lazer ve Üç Boyutlu Fotoğraflama yöntemleridir.

1.8.2.5.2.1. Kum Yama Yöntemi (SPM)

Yaygın biçimde kullanılan standartlaşmış (ASTM E 965) bir yöntemdir. Deney, özellikleri belirlenmiş bir miktar kumu yol yüzeyine yaymadan meydana gelmektedir. Bu şekilde, “kum yama” denilen dairesel bir alan elde edilmektedir (Şekil 1.12). Kum yayılma hacmi ve kaplanan yüzey alanı arasındaki oran, çukurlukların ortalama yüksekliğini vermekte ve buna geleneksel olarak Kum Yama yöntemine göre “ortalama doku-texture derinliği” (MTD) denilmektedir. Elde edilen değerler genelde 0,5 ve 5 mm arasında değişmektedir. Deneyin prensibi Şekil 1.10 da gösterilmektedir. Bu yöntem ile denenen yol yüzey alanı çok sınırlı bulunduğu için, deneyin, ortalama değer ve yol yüzeyinin makrodokusu hakkında daha tatmin edici bir fikir vermesi amacıyla birçok yerde yapılması gerekmektedir.



Şekil 1.12. Kum yama yönteminin uygulanışı

Kum Yama yöntemi çok yaygın kullanılmakla birlikte, bu yöntem ile ilgili bazı sınırlamalar ve ulusal farklılıklar mevcut bulunmaktadır. Bunlar, bu yöntemin ıslak koşullar altında kullanımının zor olması, zayıf üretilebilirlik, yavaş işleyiş, kullanılan kumun tane dağılımı, kumun yayılma şekli, ölçümlerin yeri ve sayısı vb. şeklinde

sıralanabilmektedir. Bu nedenlerin bazıları ile ilgili olarak, son yıllarda Amerika ve Avrupa'da, kum yerine küçük cam boncuklar kullanma olanağını araştırmak üzere, çalışmalar yapılmış bulunmaktadır.

Daha ileri varyasyonlar, yağ yama yöntemi ve silikon macun basma yöntemi olabilmektedir. Kullanılan ilave araştırma aletleri üç boyutlu fotoğraflık analiz ve profil izlemeye dayanan yöntemleri kapsamaktadır. Fakat kum yama yöntemi bugün bile, yol yüzeylerinin ortalama doku derinliğini kontrol etmek üzere yol mühendislerinin rağbet ettiği bir yöntem olmaktadır [23].

1.8.2.5.2.2. Lazer Esaslı Yöntemler

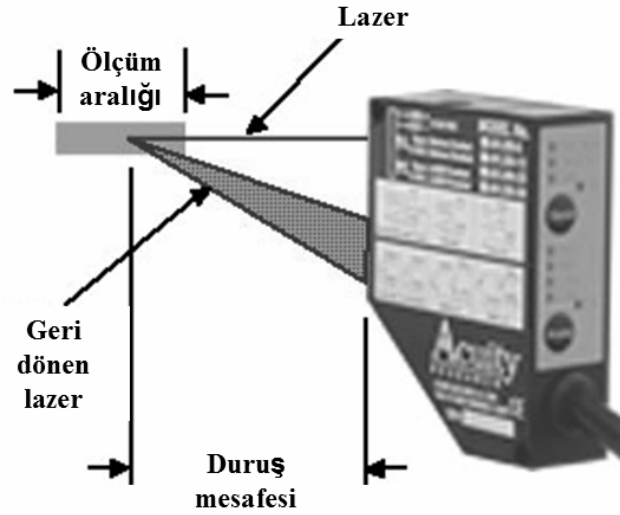
Son zamanlardaki çok sayıda yöntem bir ışık kirişi analizine dayandırılmıştır. Bunlar, içinde, herhangi bir taşıt hızında makrodoku derinliğini ölçebilen aletler bulunan taşıta yol göstermiştir. Bu aletlerin bazıları çarpıntılı Lazer ışığı, bazıları Lazer ışığı depolarizasyonu ve hatta bazıları da yüzey dokusunun iz bırakması şeklindeki değerlendirmeyi kullanmaktadır.

Avrupa'da düzenli olarak kullanılan sistemler, Fransızlara ait Rugolaser (French Rugolaser), İsveç'e ait Lazer Yol Yüzey Ölçücüsü (Swedish Laser Road Surface Tester), İngiliz Ulaşım Araştırma Laboratuvarı'na (British Transport Research Laboratory – TRRL) ait Yüksek Hızlı Yol İzleme (High-Speed Road Monitor) ve Yüksek Hızlı Doku Sayacı (High-Speed Texture Meter) ile Belçika Yol Araştırma Merkezi'ne (Belgian Road Research Center – BRRC) ait Yer Değiştirebilen Lazer Profilometresi (Mobile Laser Profilometer) ve Statik Profilometre (Static Profilometer) olarak sıralanabilmektedir. Amerikada ise birçok eyaletin ve Kanadanın geliştirdiği lazerli sistemler mevcuttur [23].

Yaygın şekilde yansıtılan kiriş bir fotodiod düzeninde ayarlanmakta ve diyotun aydınlatılması sağlanarak, lazer ile aydınlatılan yoldaki noktaya olan uzaklığı ölçmek olası hale gelmektedir (Şekil 1.13). Günümüzde uzmanlar, temassız (lazer esaslı) bir yöntem ile Kum Yama yönteminin yer değiştirmesine çalışmaktadırlar. Bu, araştırmacılar ve karayolu topluluğu açısından çok iyi bir fırsat olacaktır. Çünkü bu deney maliyetlerini azaltarak, ölçüm sonuçlarını hızla değerlendirilebilmeleri olası hale gelecektir.

Fakat bugün çok sayıda lazer esaslı yöntem kullanılmaktadır. Donanımın her bir parçasının farklı bir hesap yöntemi ve kaide uzunluğu bulunmaktadır. Bu nedenlerle, bazen çeşitli tipte donanım arasında farklılıklar mevcuttur. Bununla birlikte, kum yama ve

lazer yöntemleri arasındaki karşılıklı ilişki (korelasyon) çok iyidir. Şekil 1.13 de İngiliz BRRC'ye ait sabit Lazer esaslı sistem gösterilmektedir.



Şekil 1.13. Lazerli bir ölçüm düzeneği ve lazerin çalışma prensibi

1.8.2.5.2.3. Üç Boyutlu Fotoğraflama Sistemi

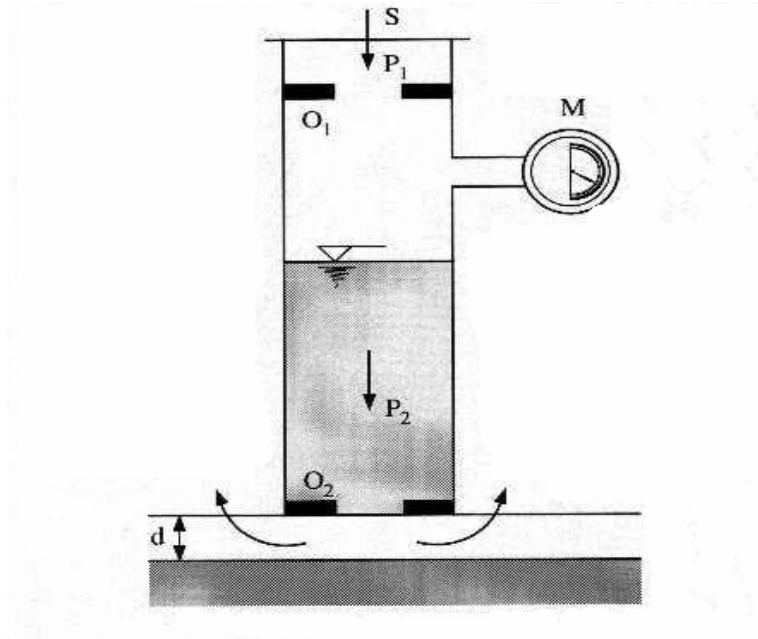
Bu yöntem, 1973'de Schonfeld tarafından geliştirilmiştir. Schonfeld, üç boyutlu fotoğraf çiftlerini almak için tek mercekli, refleks bir kamera kullanmıştır. Kamera, yol yüzeyi örneği üzerindeki bir kutuya monte edilmiştir. Kutu, yaklaşık 45° lik bir açıda fotoğraflanan alanı aydınlatan elektronik bir flash ünitesi ile donatılmıştır. Kamera, kayan bir kaideye bağlanmış ve 95 mm lik iki ayrı pozisyondan yol yüzeyi fotoğrafları almıştır.

Üç boyutlu fotoğraflama yaklaşık 10 cm² lik bir yol yüzeyi alanını kaplamıştır. Kamera kutusu, trafik yönünün sağına bakan kutu kenarındaki ışık kaynağı ile birlikte, tekerlek geçiş yerinin ortasına yerleştirilmiştir. Yol yüzeyi üç boyutlu fotoğrafları bir ayna Stereoskop ile veya bir mikroskop altında görülmektedir.

Bu yöntem daha sonra Howerter ve Rudd tarafından otomatik hale getirilmiştir. Bu, ölçümlerin dijital hale getirilmesi ile sonuçlanmıştır. Elde edilen bu veriyi kullanarak, yol yüzeyi makrodokusunun haritasını çıkarmak olası bulunmaktadır [23].

1.8.2.5.2.4. Drenaj Yöntemleri

Makrodoku, suyu, tekerlek-yol ara yüzünden hızla akıtma yeteneği ile esasen yol güvenliğine katkıda bulunduğu için, bir çok ölçüm sisteminin özellikle yol yüzeyinin drenaj yeteneğini ve hız ile kayma direnci ilişkisini-hydroplanning ölçmek amacıyla başlatılması şaşırtıcı bulunmamaktadır. Statik sistemler, yol ağlarının denenmesinde önemli bir rol oynamakla birlikte, çabuk ve etkili izleme için dinamik bir sisteme gereksinim bulunmaktadır. Böyle bir sistem Fransa'da zaten kullanılmakta olup, 20 ve 40 km/saat arasındaki hızlarda giderken yol yüzeyinin drenaj yeteneğini ölçebilmektedir.



Şekil 1.14. Su drenajı yönteminin şematik gösterimi

Bu sisteme Drainoroute adı verilmektedir. Yol yüzeyi dokusu içindeki boşluklardan kaçan suyun akım oranı (hızı) sürekli ölçülmektedir (Şekil 1.14). Diğer ismi outflow meter'dir (OFM, ASTM E 2380). Suyun akım oranı (hızı) arttıkça, yüzeyin drenaj özellikleri daha iyi olmaktadır. Genellikle söylenen, statik ve dinamik drenaj yöntemlerinin aynı prensibe sahip olduğudur. Fakat su basıncında bir farklılık mevcut bulunmaktadır. Bu farklılığa rağmen, her iki yöntem de kum yama yöntemi ile iyi ilişkiler vermektedir [23].

1.8.2.5.3. Mega Dokuyu Ölçüm Yöntemleri

Megadoku yollarda hiç istenmeyen bir özelliktir. Asla yalnız kendisi için ölçülmemiştir. Bir geometrik düzgünlük ölçümü olarak ortaya çıkmaktadır.

1.8.2.5.4. Geometrik Düzgünlük Ölçüm Yöntemleri

Kaplamanın gerçek yol profilinden sapsmaları belirli aralıklarla ölçülür. Ham veriler, digital filitrelerden geçirilerek Dalga Boyu ve Genlikler belirlenir. Birkaç yöntem vardır:

- Quarter-Car Simulation.
- Slope-Variance (SV).
- International Roughness Index (IRI).

1.8.3. Beton Kaplama Yüzey Pürüzlendirme Teknikleri

Beton yol yüzeyleri hem plastik kıvamda iken ve hem de sertleştikten sonraki herhangi bir zamanda pürüzlendirilebilmektedir. İlk inşa aşamasında yolun taşıyacağı trafik cinsi ve yoğunluğuna göre çeşitli şekillerde yüzeye bir pürüzlülük kazandırılmaktadır. Daha sonraları yolun yapısal hasarlı olmayıp sadece aşınma etkisiyle pürüzlülüğünün azaldığı durumlarda yine değişik tekniklerle sertleşmiş beton yüzeyine istenen pürüzlülük kazandırılabilir [24].

1.8.3.1. Taze Beton Yüzeyini Pürüzlendirme

1.8.3.1.1. Çuval Bezi, Süpürge, Suni Çim Halı veya Fırça Çekme

Beton yerleştirilip yüzeyi düzeltildikten sonra yüzeydeki suyun buharlaşmasını engelleyen kür kimyasalı püskürtülmeden önce yüzeye boyuna yada enine doğrultuda kaba yapılı çuval bezi(burlap), saplı süpürge(broom), suni çim halısı(turf) veya fırça (brush) çekilir. Fırça ve suni çim çekiminde ortalama pürüzlülük derinliğinin 1mm civarında olduğu bildirilmektedir. Diğer tekniklerde ise 0,2–0,4 mm değerleri bildirilmektedir. Kaplama yüzeyi düzgün sessiz sürüş sağlar ancak çoğunlukla yüksek hızlar ve yağışlı havalarda için yeterli makro pürüzlülük sağlamazlar. Dolayısıyla bu tekniklerden biri uygulandıktan sonra ilave olarak yüzeye tinning denilen ince kanallar açılır.

1.8.3.1.2. Yüzeyde İnce Kanallar Açma (Tinning)

Özellikle 80 km/saat ve üzeri hızda seyreden trafiğe sahip yollarda yağışlı havalarda tekerlek yol yüzeyi aderansını artırmak, kızaklama-hydroplaning tehlikesini azaltmak için yüzeydeki suyun mümkün olduğunca hızlı bir şekilde temas arayüzeyinden kaçmasının sağlanması gereklidir. Bunu sağlamak için taze beton yüzeyinde yukarıda bahsedilen tekniklerden biri kullanıldıktan sonra tarak türü aparatlarla değişik ya da uniform aralıklarda (14–40 mm) ve ölçülerde (2–4 mm en, 3–4 mm derinlik) ince kanallar açılmaktadır. Bunların yönü, boyuna doğrultuda (longitudial) veya enine doğrultuda (transverse) yapılabilir. Trafik türü ve iklim şartlarına göre birine karar verilir. Amerika ve Avrupadaki beton yolların takibi ve incelenmesinden elde edilen bilgilerin aktarıldığı birçok rapor bulunmaktadır. Genel olarak daha sessiz sürüşler için boyuna doğrultu (longitudial tinning), kızaklama tehlikesi olan yerlerde ve havaalanı pistlerinde enine doğrultu (transverse tinning) tercih edilmektedir. Enine doğrultu biraz açılı (skew) yapıldığında ideal özelliklere sahip olunabilir. Ancak pratik olması nedeniyle daha çok bu iki şekil uygulanmaktadır. Kurbalarda yanall kaymaya karşı boyuna uygulama tavsiye edilmektedir. Otomobil ve motosiklet gibi küçük çaplı tekerleklere sahip araçların yoğun olduğu yollarda boyuna doğrultu ya da açılı çapraz doğrultu uygulaması tavsiye edilmektedir. Enine doğrultuda aralar uniform olmadığında daha az gürültü oluştuğu bildirilmektedir [24].

1.8.3.1.3. Yüzeydeki Agregaları Açığa Çıkarma

Taze beton yüzeyi düzeltildikten sonra üstteki agregalar arasında kalan çimento hamuru kısmı uzaklaştırılır. Bunun için iki teknik kullanılır. Birincisi beton plastik kıvamda iken yüzeyin çimento hamuru, su ve dönen fırça yardımıyla uzaklaştırılır. İkincisi ise yerleştirmeden hemen sonra yüzeye hidratasyonu geciktirici kimyasal püskürtülür. 24 saat sonra yüzeydeki gevşek hamur bir fırça yardımıyla uzaklaştırılır. Sonuçta yüzeyde sadece agrega danelerinin kırık yüzeylerinden oluşan bir yapı (exposed aggregate texturing) ortaya çıkar. Avrupada ortaya çıkan bu pürüzlendirme tekniğinin başarılı olabilmesi için kullanılan agreganın oldukça sert ve cilalanma direncinin yüksek olması gerekir. Gerekli mikrodokuyu oluşturabilmek için en az %30 silisli kum kullanmak gerektiği bildirilmektedir.

1.8.3.1.4. Yüzeye Mıdır Döküp Sıkıştırma

Belçikada uygulanmış bir teknik olup taze beton yüzeyine mıdır dökülüp tamamen gömülecek şekilde bastırılır. Büyük makro pürüzlülük ve yüksek sürtünme sağlar. Ancak fazla gürültü yapar. 14–20 mm ebatta aşınmaya direnci yüksek mıdır kullanılır.

1.8.3.1.5. Geçirimli (Poroz) Karışım Kullanma

Boşluk oranı %20 olan beton karışımlar kullanıldığında yüzeydeki yağış suları beton içinden kolayca drene olmaktadır. Ancak bu tür kaplamaların donma çözünme dirençleri iyi değildir. Çimento miktarının fazla tutulması ve polimer eklenmesi gerekir. Kullanılan alanları ılıman iklimlerle sınırlıdır. Küçük parçacıkların gözenekleri tıkanması için yüzey düzenli olarak temizlenmelidir.

1.8.3.2. Sert Beton Yüzeyi Pürüzlendirme

1950 lerde Kaliforniyalı yol mühendislerinin geliştirdikleri makine (bump cutter) ile başlattıkları bir uygulamadır. Mevcut beton yol yüzeylerinin 1–3 mm lik üst kısmı

aşındırılarak gürültüsü azaltılır ve yüzey sürtünmesi yenilenmiş bir yol meydana getirilir. Kullanılan tekniğe göre isimlendirilir.

1.8.3.2.1. Öğütme (Diamond Grinding)

Dönen uzunca bir tambur üzerine çok sayıda ve düzensiz aralıklarla yerleştirilmiş elmas uçların yüzeyi aşındırması şeklinde uygulanır. Kaplamanın özellikle mikrodokusunu ve makrodokunun bir kısmını iyileştirir. Sürtünme katsayısını artırırken gürültüyü azaltır. Etkili bir tekniktir.

1.8.3.2.2. Yiv Açma (Diamond Grooving)

Elmas uçların 19 mm arayla yerleştirildiği dönen tambur kullanılır. Boyuna doğrultuda kanallanmış hem sürtünme katsayısı yüksek ve hem de daha sessiz düzgün bir yüzey oluşturulur. Kavşaklarda enine doğrultuda da yapılabilir. Oldukça etkili bir tekniktir. Özellikle hava alanlarında, köprülerde ve kaza riski yüksek olan yol kesimleri için tavsiye edilmektedir. Havalanı pistlerinde enine doğrultuda yapılır.

1.8.3.2.3. Kum Çarptırma (Shotblasting)

Kum ebadındaki sert parçacıklar yüzeye hızla çarptırılarak yüzeyden ince bir tabaka (0–6 mm) uzaklaştırılır. Çimento hamuru ve agrega danelerinin yüzeylerinde çok iyi bir mikrodoku oluşturulur.

1.8.4. Sürtünme Katsayısı

Hayatın olmazsa olmaz kanunlarından biri sürtünmedir. Sürtünme olmasa yürüyemeyiz, araçlar hareket edemez ve duramazlar.

Yüzeyler ne kadar düz görülürse görülsün pürüzlüdürler. Bir mikroskopla bakılan cilalı cismin yüzünde bile girinti ve çıkıntılar vardır. Birbirine dayalı iki cisim halinde bir cismin çıkıntıları öteki cismin girintilerine girmiştir. Cismi kaydırmak ya da hareket ettirmek için giren çıkıntıları çıkarmak gerekir. Bu da çıkıntıların eğilmesi ya da kırılması

ile olabilir. Hareketin zıt yönünde oluşan sürtünme kuvvetlerinin nedeni budur. Cismi yüzey üzerinde kaydırmak veya yuvarlamak için yüzeye paralel kuvvetin belli bir değeri aşması gerekir. Bu durum yüzeyde harekete zorlayan kuvvetin zıt yönünde ve sürtünme kuvveti denen kuvvetlerin ortaya çıktığını gösterir. Harekete zorlayan kuvvet belli bir değere ulaştıkça cisim kaymaya ya da dönmeye başlar. Bu anda sürtünme kuvveti en büyük değerine ulaşmıştır. Hareketi sürdürmek için gerekli kuvvet, harekete başlanan kuvvetten küçüktür.

Bir cisim öteki cisim üzerinde yuvarlanırsa sürtünme kuvvetleri kayarken oluşan sürtünme kuvvetlerinden daha küçük olur. Bu, yuvarlanma sırasında iç içe giren kesimlerin ayrılmasının daha kolay olmasından ileri gelir. Dayanma yüzeyinde oluşan çukurlaşma yuvarlanma sürtünmesini artırır. Kayma sürtünme kuvvetlerinden kurtarıp yerine küçük olan yuvarlanma sürtünme kuvvetlerini koyan tekerlek taşıt araçlarının en önemli parçasıdır. Tekerleğin keşfi uygarlıkta bir aşama olmuştur.

Motor, gücün iletiildiği tekerlekleri döndürür. Tekerlek ve yolun temas arayüzünde oluşan sürtünme kuvvetleri tekerleğinin kaymasını önler ve dönmesini sağlar. Dönme de aracı hareket ettirir. Tekerlek ile yol arasında sürtünme kuvveti, tekerleği döndüren kuvvetten küçük ise tekrar kayar (patinaj). Sürtünme, harekete başlatmadakinden daha fazla hareketi durdurmada önem kazanmaktadır. Araçları durdurmak için tekerleklerin dönüşünü engelleyen balata denilen sürtünmesi çok levhaların kullanıldığı fren düzeneğine ihtiyaç vardır. Ancak tekerlek yol arayüzündeki sürtünme katsayısı değerleri en kritik noktadır. Tekerleğinin dönüşü engellense bile yol yüzeyi üzerinde kayma-kızaklama tehlikesi söz konusudur.

Birbirine göre hareketsiz yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetine ‘statik sürtünme kuvveti’ adı verilir. Hareketi başlatmak için gerekli kuvvetin en küçük değeri, statik sürtünme kuvvetinin en büyük değerine eşittir.

Max. statik sürtünme kuvvetinin büyüklüğünün normal kuvvetin büyüklüğüne oranına söz konusu yüzeylerin ‘statik sürtünme katsayısı’ adı verilir. Statik sürtünme kuvvetini F_s ile ifade ederek aşağıdaki bağıntıyı yazabiliriz.

$$F_s \leq \mu_s \cdot N$$

1.1

μ_s : Statik sürtünme katsayısı

N: Normal kuvvetin büyüklüğü

Kinetik sürtünme kuvvetinin büyüklüğünün normal kuvvetin büyüklüğüne oranına ‘kinetik sürtünme katsayısı’ adı verilir. Kinetik sürtünme kuvvetini F_k ile ifade edersek;

$$F_k = \mu_k \cdot N$$

1.2

eşitliği sağlanacaktır. Burada μ_k kinetik sürtünme katsayısıdır ve μ_s Statik sürtünme katsayısından küçüktür. Bazı cisimler arası sürtünme değerleri Tablo 1.3 de verilmiştir.

Tablo 1.3. Bazı durumlardaki statik ve kinetik sürtünme katsayısı değerleri.

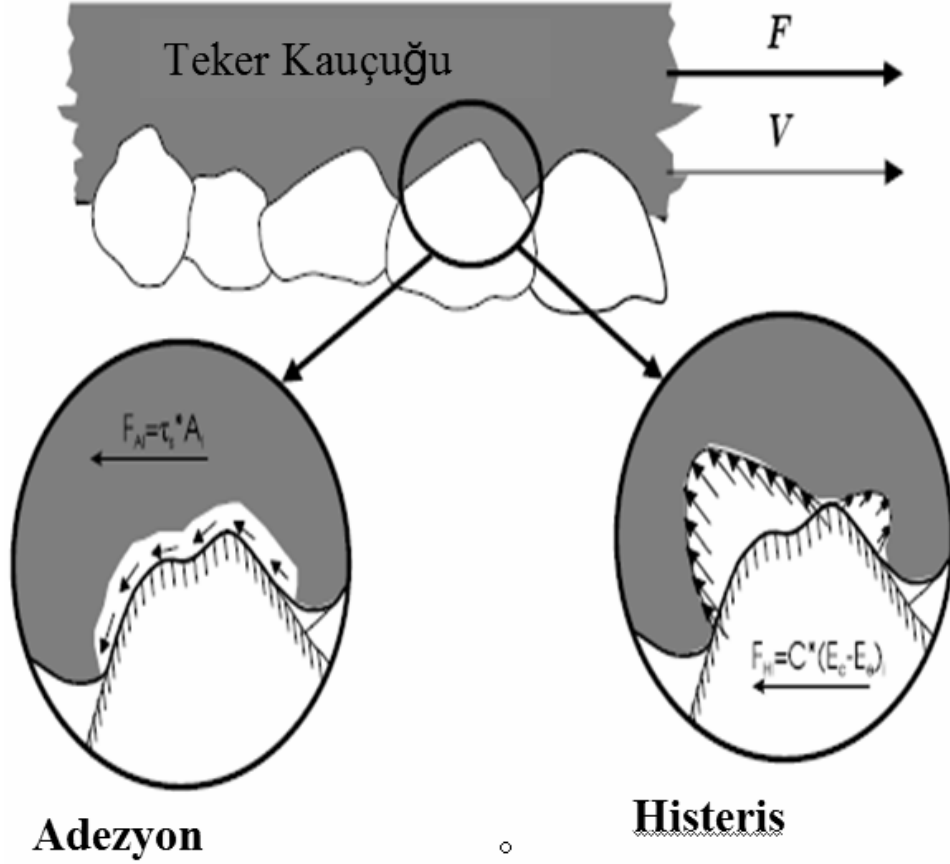
	Statik	Kinetik
Çelik üstünde çelik	0,15 – 0,25	0,1 – 0,3
Tahta üstünde tahta	0,4 – 0,7	0,2 – 0,3
Beton üstünde lastik	1	0,7

Yollardaki araçların seyir güvenliği için sürtünme kuvveti, hareketi kazandırmaktan çok özellikle yağışlı havalarda hareketi yönlendirme ve azaltma-durdurma faaliyetlerinin yoğunlaştığı iniş eğimli yollar, kurba, kavşak gibi manevra sahalarında fazla önem kazanmaktadır. Konunun önemine binaen tekerlek yol yüzeyi etkileşimi geçmişten günümüze hep araştırıla gelmiştir. Konunun, tekerlek özellikleri ve yolun yüzey özellikleri olmak üzere iki yönü vardır. Tekerlek özellikleri makine mühendislerinin sahasına girmekte ve sürekli yol tutuşu artırmanın çareleri araştırılmaktadır. Yol yüzeyinin özellikleri de araştırılmakta, en ideal seviyede ve uzun süre sürtünme katsayısı değerini muhafaza eden kaplama yüzeylerinin ortaya çıkarılmasına çalışılmaktadır.

1.8.4.1. Tekerlek-Yol Etkileşim Mekanizması

Sürtünme kuvvetleri kabaca iki kuvvetin toplamıdır. Birincisi arayüzdeki temas noktalarındaki küçük alanlarda yüzeylerin birbirini üzerinden kaymalarını engelleyen adezyon, diğeri ise bu noktalarındaki çıkıntılardan dolayı tekerlek kauçuğunun içeri doğru deformasyonunu sağlayan basınç-histerisdir (Şekil 1.15). Adezyon (adhesion) mikro

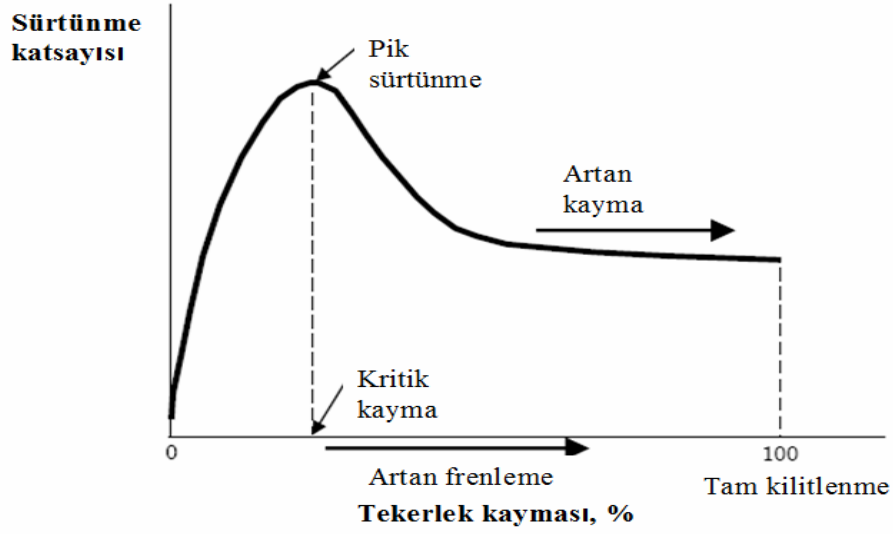
dokuyla ilgili iken histeris (hysteresis) makrodokuyla ilgilidir. Her ikisi de frenleme sırasında visko-elastik kauçuğun yerdeğişirmesine karşı direnç oluşturarak enerji kaybettir. Islak kaplamalardaki su filmi, temas eden yüzeyler arasında bir çeşit yağlanma etkisi yapar ve araç hızı arttıkça adezyon azalır [19, 21].



Şekil 1.15. Tekerlek ile yol temas noktalarındaki sürtünme kuvvetleri

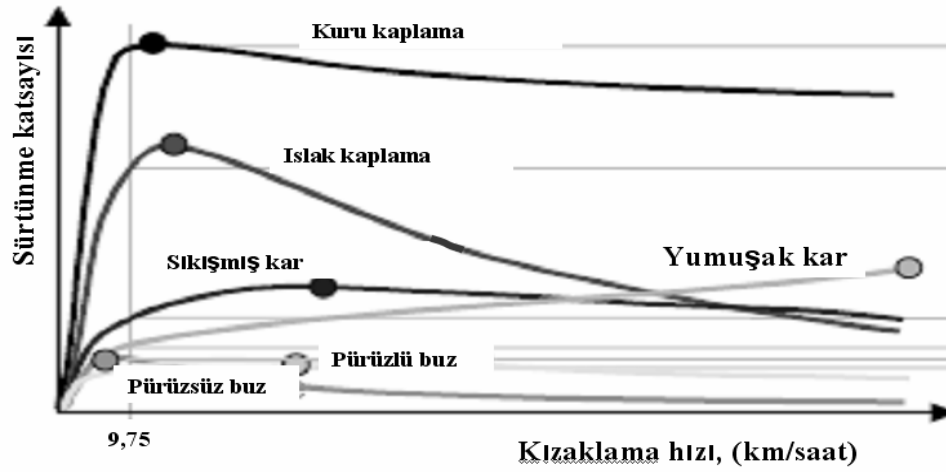
Hız arttıkça tekerlek-yol temas alanları küçülür ve sürtünme katsayısı azalır. Hız artışının karesi oranında fren mesafesi uzar[19].

.Sürtünme katsayısı aynı yol tekerlek şartlarında kayma-slip derecesine göre değişik değerler alabilmektedir. % 10–20 arasındaki kritik bir kayma noktasına kadar hızla yükselmekte sonra tam kızaklamadaki değerine kadar hızla azalmaktadır. Islak kaplamalardaki kayıp daha fazla olmaktadır. Bu durum Şekil 1.16 ve Şekil 1.17 de görülmektedir [19, 21].



Şekil 1.16. Sürtünme katsayısı değerinin frenleme derecesiyle değişimi

Elektronik kontrollü fren sistemli araçlarda tekerleğinin kayma derecesi maksimum sürtünme sağlayan kritik değer civarında tutulmaya çalışılarak aracın mümkün olan en kısa mesafede yavaşlaması ya da durması sağlanır.



Şekil 1.17. Sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi [21].

Pik sürtünme değeri yaklaşık 9,75 km/saat kızaklama değerinde meydana gelmekte, frenleme sırasında tekerlekteki kilitleme arttıkça sürtünme değeri de hızla düşmektedir [21]. Aynı yol kaplamasının farklı yüzey durumlarında elde edilen sürtünme katsayısı-kızaklama ilişkisi Şekil 1.7 de gösterilmektedir

Yol kaplama tabakasının malzemesine, ıslak olup olmamasına göre kızaklamadaki sürtünme katsayısı kaybı da farklı olmaktadır (Tablo 1.4). Islak yollarda en az kayıp beton kaplı yüzeylerde olurken, sonra asfalt yollarda olmaktadır. En çok kayıp yüzeyi buz tutmuş yollarda olmaktadır [19, 20].

Tablo 1.4. Yol yüzeyi durumuna göre ortalama pik ve kızaklama sürtünme değerleri

Yol Yüzeyi	Pik Değer	Kızaklama Değeri
Asfalt, Beton (Kuru)	0,8–0,9	0,75
Asfalt (Islak)	0,5–0,7	0,45–0,6
Beton (Islak)	0,8	0,7
Çakıl	0,6	0,55
Toprak (Kuru)	0,68	0,65
Toprak (Islak)	0,55	0,4–0,5
Kar	0,2	0,15
Buz	0,1	0,07

Kuru rijit yüzeyde aynı yük etkisindeki tekerleğin temas basıncı ya da tekerlek şişme basıncı artarsa adezyon tipi sürtünme azalır. Düşük yüklü test tekerleği ile kuru rijit yüzeyde yapılan ölçümlerde aynı tekerleğin ağır yüklerle yapılan ölçümlerinden daha fazla sürtünme değeri elde edilmektedir. Bunun sebebi düşük yükün daha fazla kayma gerilmesi oluşturması olabilir.

Yol yüzeyinin mekanik aşınması tekerlek yol yüzeyi arasındaki sürtünme nedeniyle olur ve toz etkisiyle aşınma hızlanır. Toz parçacıklarının büyüklüğüne göre iki tip aşınma oluşur. Birincisi aynı sertlikteki minerallerden oluşmuş agregaların yüzeylerindeki çıkıntılarının yuvarlaklaşması şeklinde olur ki bunun adı cilalanmadır. İkincisi ise sertlikleri farklı minerallerden oluşan agregalarda oluşana ki bunda yumuşak kısımların aşınmasıyla sert olanları çıkıntılar oluşturur. Pürüzlülük muhafaza edilmiş olur [21].

Bir yol kesimindeki sürtünme katsayısı mevsimlere göre değişir. Yazın sonlarında en düşük değerlerdedir. Ilıman kışın hâkim olduğu yerlerde de en yüksek değerlerdedir. Yazın yağış olmadığından tekerlek ile yol arasında sürekli toz parçacıkları vardır. Yol yüzeyinin mikro dokusu tozlarla doludur ya da aşınmıştır, sürtünme azalır. Fakat kışın yağın yağmur

suları bu tozları uzaklaştırır. Agregalar yıkanır, mikro doku ortaya çıkar, sürtünme artar. Karın fazla yağdığı küremenin yapıldığı yerlerde ise karlı gün sayısı önemlidir. Kar küreme faaliyetleri ve don çözücü kimyasallar yol yüzey dokusuna olumsuz yansır ve sürtünme katsayısı azalır.

Yol yüzeyi açısından, beton yol yüzeylerinin sürtünme katsayılarında, yüzeyin pürüzlendiriliş şekli en büyük etkiye sahiptir. İkinci derecede agregalar özellikle de ince agregalar etkilidir. Çeşitli şekillerde yüzeyi pürüzlendirilerek makrodokusu artırılmış yüksek cilalanma direncine sahip ince agrega içeren beton karışımlardan üretilmiş yol ların yüzeyi, fazla sürtünme ve dayanıklılık sağlar. Yüzey dokusu zaman içinde aşındığında agreganın direnci daha bir önem kazanır. Kalker tipi yumuşak agregalar cilalanarak, sürtünmesi düşük yol yüzeyi oluştururlar. Agrega kalitesini belirleyen özellikler sertlik, mineralojik yapı, dane şekli, köşe sayısı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma direncidir. Beton yolların yüzeylerinde sert mineralli, kırılma yüzeyleri pütürlü doğal yada yapay agrega kullanıldığında aşınmaya bağlı olarak sürtünme katsayısı değerinde oluşacak kayıp daha az olacaktır [21].

1.8.4.2. Yanal Sürtünme Kuvveti

Araçların şerit değiştirme, sollama, kurba ve kavşaklardaki dönüşlerinde ve rüzgârın neden olduğu yan basınçlarda, enine eğimi fazla yol kesimlerinde yanal sürtünme katsayısı önem kazanmaktadır. Asfalt yollardan farklı olarak beton yol yüzeyleri farklı şekillerde pürüzlendirilebildiğinden yol kesiminin durumuna göre yanal doğrultudaki sürtünme katsayısı büyük olacak şekilde yüzey bitirme işlemi yapılır.

1.8.4.3. Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri

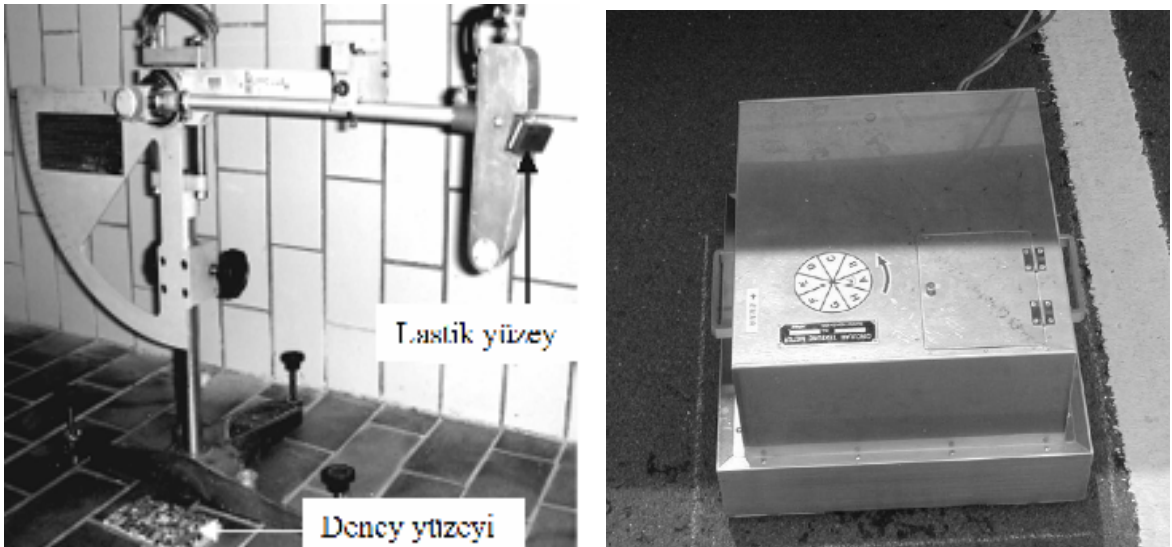
Sürtünme katsayısı ölçen cihazların bir ismi de tribometredir. Birçok ülkenin hatta aynı ülkenin değişik eyaletlerinin kendine has geliştirdikleri bir ya da daha fazla yol sürtünme katsayısı ölçen sistemleri vardır. Ve bunlarla yollarını sürekli ölçerek kontrol altında tutmaktadırlar. Henry kayda değer bulduğu 23 cihazı dört başlık altında toplamaktadır [21].

- Tam Kilitlenmede ölçenler;

- Yanal kuvvet ölçenler;
- Sabit kayma oranında ölçenler;
- Değişik kayma oranlarında ölçenler;

Aynı yol yüzeyinde ölçüm alınsa bile farklı iki ölçüm yöntemi arasında %5 fark olabilmektedir. Sürtünme aynı zamanda tekerleğin özelliklerinden de etkilenmektedir. Kauçuğun bileşimi-sertliği, tekerleğin eni, çapı, şişirme basıncı, hareket yönüyle açısı, taşıdığı düşey yük ve yuvarlanma yüzeyinin yivli(ribbed) ya da yivsiz(smooth) olması başlıca faktörlerdir. Yivsiz tekerlekler daha hassas olduğundan testlerde daha çok tercih edilmektedir. Ayrıca hava şartları ve mevsimsel zaman da fark oluşturan diğer etkenlerdir.

Labaratuvar ölçümleri için hâlihazırda yaygınlıkla kullanılan iki ana ölçüm metodu bulunmaktadır: British Portable Tester (BPT, ASTM E-303) ve Japon Dynamic Friction Tester (DFT, ASTM E-1890) (Şekil 1.18). BPT belli bir konumdan serbest bırakılan ucunda lastik bulunan kolun yüzeye belirli bir uzunluk boyunca sürttükten sonra çıkabildiği yüksekliğin 0-150 arası bir sıklada ölçülmesiyle kaybettiği kinetik enerjinin bulunması metoduyla çalışmaktadır. Yaklaşık 50 km/saat hızdaki tam frenlemedeki durumu yansıtır. DFT ise 0-90 km/saat arası istenilen hızda döndürülebilen bir diskin altına monte edilmiş üç lastiğin, dönme sırasında belirli bir basınçla yüzeye bastırılması neticesinde oluşan tork değişimlerinden hareketle hıza bağlı olarak sürtünme katsayısı değerini vermektedir [19].



Şekil 1.18. İngiliz sürtünme pandülü ve Japon dinamik sürtünme ölçer

Arazideki ölçümler içinse önceleri BPT kullanılıyordu. Ancak günümüzde artık araçlara ya da çekilen römorklara yerleştirilmiş yukarıda bahsedilen dört metoddan biriyle çalışan yazılım destekli dinamik sürtünme ölçüm sistemleri kullanılmaktadır (Şekil 1.19). Bunlar ölçüm tekerleğine etkiyen çekme kuvvetinin ya da çevirme momentinin frenleme boyunca sürekli ölçülmesiyle çalışmaktadırlar.



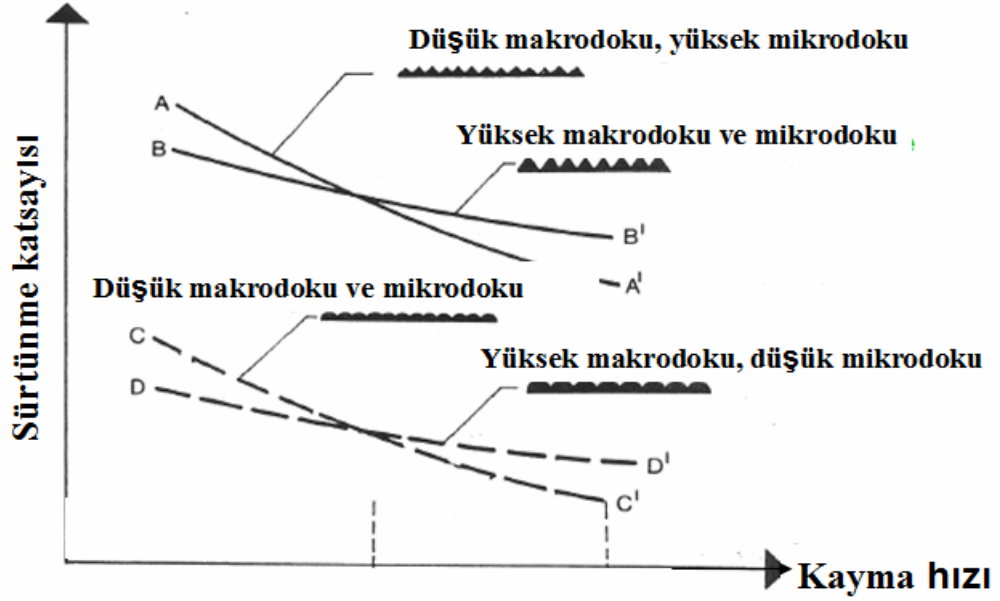
Şekil 1.19. Dinamik sürtünme ölçüm araçları

Bu şekilde çalışan bazılarının isimleri ve üretildikleri ülkeler şöyledir: SCRIM, Griptester, SRM (Stuttgarter Reibungsmesser), MuMeter, Skiddometer, BV-11 ve BV-14, British Pendulum Number, K J Law Friction Tester - 100% fix slip, K J Law Friction Tester Peak Friction, (ROAR)norsemeter-Norway, the Runway Friction Tester and the BV11 skiddometer, the Integrated Tire Test Vehicle-NASA, the Surface Friction Tester (SFT)-Saab, the Electronic Recording Decelerometer (ERD)-Transport Canada, IMAG-France.

1.8.4.4. Sürtünme Katsayısı- Pürüzlülük İlişkisi

Yıllarca sürtünme katsayısı değerleri ile onların ölçüldüğü yol yüzeyinin pürüzlülük parametreleri arasında sağlam bir korelasyon bulmak için çalışıldı. Tam bir korelasyon tespit edilememekle beraber mikro ve makro pürüzlülük değerinin yol tekerlek sürtünmesini hangi doğrultuda etkilediğinin tespit edilmiş olması önemlidir. Kuru yollarda pürüzlülük değeri çok fark yaratmazken yüzeyi ıslak yollarda hız artışıyla beraber makro

pürüzlülük önem kazanmaktadır. Yeterli makrodoku derinliği olmayan yollarda tekerlek yol arayüzünden su kısa zamanda uzaklaşamayacağından sürtünme değeri düşmekte, fren mesafeleri önemli oranlarda uzamaktadır. Hıza da bağlı olarak dört temel yüzey durumu için pürüzlülük sürtünme ilişkisi Şekil 1.20 de gösterilmektedir.



Şekil 1.20. Hız ve pürüzlülük durumuna göre sürtünme katsayısının değişimi [21].

Yol yüzeyinin makro ve mikro pürüzlülüğü trafik ve çevre şartlarının aşındırmasıyla zaman içinde azalacaktır. Pürüzlülük değerleri azalınca sürtünme de azalacaktır. Dolayısıyla pürüzlülüğü etkileyen her şey sürtünmeyi de aynı doğrultuda etkiler. Pürüzlülüğün uzun süre yeterliliğini korumasında yol yüzeyindeki agregaların cilalanmaya dirençleri en önemli role sahiptir.

1.8.4.5. Sürtünme Katsayısının Trafik Kazalarına Etkisi

Kuru yüzeyli yollarda genel olarak yeterli olmakla beraber yol ıslandığında yüzeyin mikro ve makro dokusuna bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri önemli ölçüde düşebilmektedir. Düşük seviyedeki ıslak sürtünme katsayısı araçların yavaşlama, manevra

yapma kabiliyetlerini önemli oranda azaltacağından bazı istenmeyen sonuçların ortaya çıkacağı açıktır.

Chelliah, düşük sürtünme değerinin, kazaların yaklaşık %25'inin nedeni olduğunu belirtiyor. Amerikan ulusal ulaşım güvenliği kürsüsü ve ulusal karayolları müdürlüğü toplam ölümlü kazaların yaklaşık % 13,5'inin ve toplam kazaların %25'inin ıslak yollarda meydana geldiğini belirtmektedir [22]. Yine de bu tür ıslak yollardaki kazalara sürtünme katsayısının yeterli olmamasının direkt olarak neden olduğu gibi bir görüş bugüne kadar doğrulanmış değildir. Bir trafik kazasının meydana gelmesinde bir ya da daha çok faktör etkili olmuş olabilir (sürücü, araç, yol faktörleri). Yol yüzeyinin sürtünme katsayısı durumu bunlardan sadece biridir. Ancak tekerlek ile yol yüzeyi arasında sürekli oluşan sürtünme, kazaları kontrol etmede ve azaltmada en kritik faktördür.

Kaza anında fren mesafesinin uzamasından dolayı yeterli sürtünmenin olmadığı yol kesimlerinde çarpışma şiddetinin arttığı ve bunun sonucunda da ölü ve yaralı sayısının, maddi hasarların çoğaldığı ortak görüşü vardır. 1966'da Teksas'ta McCullough tarafından yapılan bir araştırmada, trafik karakteristiği ve hacmi değişmeyen bir yol kesiminde sürtünme azaldıkça ölümlü ve yaralanmalı kaza sayısının arttığı bulunmuştur. Aynı yol kesiminde daha sonraları Agent, Wallman and Astrom tarafından yapılan tespitler de bu yöndedir. Bu konu geçmişten beri araştırılan bir konu olmakla beraber kesin bir şey söylemek için yeterli güvenilir istatistikî verilere henüz sahip olunmadığı belirtilmektedir. Bu konuda projeler, araştırmalar yapılmaktadır. 2002'de MDSHA tarafından başlatılan bir projede ıslak sürtünme, ıslak yoldaki kazalar, ortalama günlük trafik, ortalama günlük kamyon trafiği ve yüzey agregasının cilalanma değeri arasındaki ilişkiler araştırılmaktadır. Ağır aşındırıcı etkiye sahip olması nedeniyle kamyon trafiğinin yoğun olduğu yollarda cilalanmanın hızlı geliştiği, sürtünmenin daha kısa zamanda azaldığı, bu tür yollarda daha sert agrega kullanılarak sürtünme değerinin yüksek tutulmasının gerekli olduğu belirtilmektedir [26].

Özellikle kavşaklarda ve yol ayrımlarındaki birçok kazanın meydana gelmesinde düşük sürtünme katsayısının etkisi vardır. Özellikle ıslak yollarda oluşan kaymalı kazalarda sürtünme katsayısı için yol yüzeyinin dokusunu ve pürüzlülüğünü oluşturan agrega birinci derecede öneme sahiptir. Değişik yol kesimleri için tavsiye edilen agrega cilalanma-sürtünme katsayısı değerleri Tablo 1.5'de verilmektedir.

Tablo 1.5. Yol kesimine ve kamyon trafiği yoğunluğuna göre olması gereken agrega cilalanma değeri ve sürtünme katsayısı değerleri [26].

Yol kesiminin özellikleri	Agrega cilalanma değeri- PV						Proje sürtünme katsayısı	Kalite seviyesi
	Günlük şerit başına ağır ticari araç sayısı							
	250	1000	1750	2500	3250	4000		
Kavşaklara Yakın Yerler	7	7	8	8	9	9	55	Yüksek
%10 Dan Fazla Eğimli, 50 m den Uzun İniş Rampaları, 250 m den Dar Kurplar,	6	7	7	8	8	9	50	Yüksek
%5-10 İniş eğimli rampalar	6	6	7	7	8	8	45	Yüksek
Bölünmemiş Düzgün Yollar	5	6	6	7	7	8	40	Düşük
Bölünmüş Düzgün Yollar	5	5	6	6	7	7	35	Düşük

Bilinen birçok yol işareti, yol kaplamasında araçların kayabileceği hususunda ikazlarda bulunmaktadır. Bir yol kaplamasının kaymaya karşı dayanıklılığı, artan trafik miktarı, taşıt hızı, yüzey dokusu ve agreganın petrografik yapısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Islak kaplama üzerinde kayma ve su üzerinde kızaklama, sorunun en tehlikeli tarafını oluşturur. Bunun yanı sıra göz kamaşması ve su sıçraması da trafik kazalarına yol açabilmektedir. Trafik yüklerinden dolayı yolların cilalanmasına ve düzleşmesine karşı dayanıklı agrega seçilmesi ve yüksek hızlarda araç lastiklerinin altından su drenajına izin verecek şekilde yüzey dokusunun durumunun muhafaza edilmesi kaymaya dayanıklı kaplama inşasında önemlidir. Beton ve asfalt karışım yol kaplamasının her ikisi de, aşınma ve kaymaya karşı geliştirilmeye uygundur. Beton yol kaplamalarında, inşaat sırasında aşınmaya dayanıklı ince agrega ve mekanik yüzey bitirmesinin kullanılması, daha uzun aşınma ve daha fazla kaymaya dayanıklı yol kaplaması yapılmasını sağlar.

1.9. Beton Yolların Mekanik Özellikleri

Kaplama betonları daha çok karayollarında, havaalanı pistlerinde, liman sahalarında, köprü tablalarında ve parketme alanlarında kullanılmaktadır. Yüksek performans için

basınç dayanımı kadar zamana karşı iyi bir dayanıklılık da gereklidir. Dayanıklılık aşınma direnci, darbe direnci, geçirimsizlik ve donma-çözünme direncini kapsar.

1.9.1. Basınç Dayanımı

Yol betonundan alınacak küp ve kiriş biçimindeki örneklerin 28 günlük dirençleri tabloda gösterilen değerlerde olmalıdır. Normal Portland çimentolarında 7 gün sonunda tabloda belirtilen direnç değerlerinin en az %70'ine, yüksek kaliteli çimentolarda %80'ine ulaşılmaktadır. Tek tabaka halinde yapılan plaklarda ya da kaplama betonunda en az 350 kg dozaj, Tablo 1.6 deki 1. grup için 350 kg, 2. grup için 270 kg, 3. ve 4. grup için 250 kg çimento bulunmalıdır [27].

Tablo 1.6. Trafik yoğunluklarına göre olması gereken dayanım değerleri

Yolun Cinsi	Basınç dayanımı Kgf/cm ²
1. Ağır transit trafiği geçiren 1. sınıf Devlet yolları: Temel ve kaplama betonları	370
2. Orta ağırlıkta trafikli yollar: Kaplama tabakası yada tek tabaka temel betonu	300 250
3. Lokal trafikli konut yolları, kamyonlu park alanları: Kaplama tabakası yada tek tabaka temel betonu	250 200
4. Kamyonsuz park alanları: kaplama tabakası yada tek tabaka temel betonu	250 200

1.9.2. Eğilmede Çekme Dayanımı

Gevrek bir malzeme olan betonda, çekme dayanımı karakteristikleri kesin bir temele oturtulamamaktadır. Öncelikle çekme deneylerinin yapılmasında teknik zorluklarla karşılaşılır. Bu nedenle eğilmeye maruz kalan malzemenin durumu en güvenilir biçimde, doğrudan doğruya eğilme deneyi uygulanarak incelenir. Bu deneyde büyük çoğunlukla kare kesitli kirişlerin (10x10x40 cm) kullanılması öngörülür. Malzemenin tamamen gevrek cisim olduğu, ancak kırılma anına kadar Hooke Yasasına uygun davrandığı kabul edilir. TS 500 ve diğer yeni standartlarda eğilme dayanımı kavramı yer almamaktadır. Bununla birlikte özellikle yol ve hava meydanı pist kaplamalarının tasarımında betonun en az basınç

dayanımı kadar "eğilme - çekme" dayanımı veya "kopma - kırılma modülü" kavramına gereksinim duyulur [27].

1.9.3. Aşınma Direnci

Kullanım yerine göre betonda farklı aşınma şekilleri oluşur. Su yapılarında agregaların sökülmesi- erozyon oluşurken yollarda araç tekerleklerin etkisiyle genelde cilalanma şeklinde pürüzlülük değişimleri-kayıpları (abrasion) meydana gelir.

Aşınma direnci üzerine yapılan araştırmalarda, basınç dayanımı, yüzey bitirme şekli, kür şartları, agrega özellikleri ve test koşullarının (kuru-ıslak, vb) etkili faktörler olduğu belirtilmektedir

Cabrera; Sadegzadeh; Gjorv; Naik gibi birçok araştırmacı özellikle betonun aşınma direnci üzerine çalışmalar yapmışlardır. Özetle aşınma direncinin ana temelde betonun dayanım karakteristiklerine, aşındırıcı etkiye maruz kalan yüzeyinin mikroyapısal özelliklerine, yüzeyin bitirilme metoduna ve test metoduna bağlı olduğu tespit edilmiştir. İlk olarak basınç dayanımıyla ilgilidir. Aralarındaki ilişki hiperbolik formda olduğunda korelasyon kuvvetlidir. Doğrusal ilişki kurulduğunda da küçük karışımlar için yeterli güvenilirliğe sahiptir [28].

Aşınma ve darbe etkileri, betona fiziksel yönden zarar verebilecek etkenlerdir. Beton kaplamadaki aşınma direnci, doğrudan doğruya agrega tanelerinin yüklü taşıt tekerleklerinin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklılıklarının fonksiyonudur. Çimento harcında daha sert agrega danelerinin varlığı, beton üzerindeki aşındırıcı etkileri azaltır. Aşınmaya yatkın yapı gösteren kalker gibi yumuşak taşların bulunduğunu bilerek, yol yüzeyi gibi aşındırıcı etkenlerin çok sık rastlandığı yerlerde kullanılacak betonların, aşınmaya karşı dirençlerinin önceden saptanmış olması gerekir [27].

Aşınmaya karşı direncin yeterli olabilmesi için :

- Kullanılan hidrolik bağlayıcının basınç dayanımı ve inceliğinin yüksek olması;
- Bağlayıcı dozajının bütün agrega tanelerini tamamen saracak düzeyde saptanması; (iri agregalı betonlarda 400–450 kg, çimento harçlarında 500-550 kg),
- Aşınmaya dayanıklı sert agregaların kullanılması, gerekir.

Aşınmaya son derece dayanıklı beton için, sertliği yüksek olan kuvarz ve korendon gibi doğal kökenli agregalar, çelik tozu gibi metal kökenli agregalar kullanılır [29]. Beton yol plağı yüzeyine yakın yerlerde sert agregaların boyutunun 25 mm'yi aşmamasına, daha iri ve yumuşak danelerin alt katmanlarda yer almasına özen gösterilmelidir.

Taze betonun yüzeyini düzeltme işlemine yüzey bitirme denmektedir. Farklı yüzey bitirme işlemi ve kür koşulları en fazla birkaç milimetrelik yüzey tabakasında anlamlı derecede farklı yüzey mikrodokulu yapı meydana getirmektedir [30]. Bu kısmın aşınma direnci büyük oranda boşluk gözeneklerinin yapısına ve mikrosertliğine bağlıdır.

Tekerleğin yol yüzeyinde yaptığı mekanik aşınma eğer yüzeyde toz varsa daha hızlı olmaktadır. Tourenq ve Fourmaintraux yaptıkları çalışmada yüzeydeki toz parçalarının büyüklüklerine bağlı olarak iki durumun ortaya çıkabileceğini belirtmişlerdir [31]. Birincisi genel anlamda cilalanma ki agregaların yuvarlaklaşma eğilimidir. Tek tip mineralli agregalarda görülür. İkincisi ise farklı cilalanmadır. Agregaların yüzeyinde çıkıntılar oluşturur. Bu çok mineralli sert ve yumuşak mineraller içeren agregalarda görünmektedir. Yumuşak kısımlar aşınır sert olanlar çıkıntılar oluşturur. Çıkıntılar aşındıkça döngü devam eder ve yüzey hep pürüzlü kalır.

1.9.3.1. Aşınma Direnci Ölçüm Yöntemleri

Aşınma direncini ölçmek için birçok teknik ve test metodu vardır. Her birinin aşınma direncine yaklaşım açısı değişik olduğundan kullanımdaki şartlara uygun olanını testlerde kullanmak gerekir. Çelik bilyalarla aşındırma (ball bearing), aşındırıcı disk (dressing wheel), kuma çarptırma (shot blasting), kum çarptırma (sand blasting) gibi. Bunlardan literatürde en yaygın kullanılanları Los Angeles (ball bearing), Böhme (dressing wheel), Dorry (dressing wheel) ve Micro-deval (ball bearing) aşınma test aletleridir. Çelik bilyalarla aşındırma deneyleri beton ya da asfalt karışımlardaki agregaların danelerinin karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki kırılma, köşelerden ufalanma dirençlerini belirlemede kullanılırken; aşındırıcı diskli test aletleri, malzemenin kullanılacağı alanlardaki yüzey aşınmasına direncini belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 1.21. Böhme aşınma test aleti



Şekil 1.22. Los Angeles aşınma test aleti

1.9.4. Durabilite Özellikleri

Betonun üretildiği tarihte kazanmış olduğu özelliklerin zaman boyunca giderek zayıflamaması gerekir. Özelliklerin kalıcı olması betonun dayanıklılığını gösterir. Betonun

hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği olumsuz dış etkenler, donma-çözülme, ıslanma - kuruma, ayrıca zararlı kimyasal maddeleri içeren su ve hava gibi taşıyıcı ortamlardır. Çevre koşulları dikkate alınmadan yapılan uygulamalarda betonun ileri tarihlerdeki dayanıklılığı sorun oluşturmaktadır. Hizmet sırasında betonun bozulmasına neden olan başlıca etkenler donatının korozyonu, soğuk iklimlerde donma - çözülme etkisi, bozuk çevrenin fizikokimyasal etkileridir. Bu özellikler nedeniyle betonun tasarımı sırasında, ana amaç olan mekanik dayanımın yanısıra dayanıklılık özelliklerinin de irdelenmesi gerekir. Betonun dayanıklılığı, yerleştirme ve koruma aşamasında gösterilen özenle değişir. Optimum karışım hesabı, en özenli hazırlama tekniği, uygun olmayan yerleştirme ve koruma ile zedelenebilmektedir [27].

1.9.4.1. Donma Çözülme Direnci

Beton yolların donma çözülmeye dayanıklı olması için yüzeye yakın kısımda karışım içinde %3-%5 oranında mikron büyüklüğünde düzgün dağılmış hava kesecikleri olmalıdır. Amerika'da %5, İsveç'te %4, Almanya'da %3 önerilirken Belçika'da hava oluşturuca katkı yerine 375 dozluk, su/çimento oranı 0,4 ve yüksek yoğunluklu beton önerilmektedir [33].

Betonun herhangi bir nedenle çatlaması, bu çatlaklardan giren suyun hidrate olmamış tanecikleri aktive edip yeni direnç oluşturması anlamına gelmektedir. Diğer taraftan, zararlı çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılık özelliği taşıyabilmesi için yeterli doluluğa sahip olması gerekir. Doluluk üzerinde su/çimento oranı yanında minimum çimento miktarı da etkilidir. Mekanik direnç açısından da çimento miktarının sınırlandırılması gerekmektedir. Ortam ısısının sıfırın altına düşmesi durumunda, beton içyapısındaki boşluklarda bulunan su donarak yaklaşık % 8-9 oranında hacim artışı gösterir. Bu olay betonda çekme gerilmelerinin oluşmasına neden olur. Ortaya çıkan gerilmelerin betonun çekme direncini aşması durumunda betonda çatlaklar ve giderek parçalanmalar gözlenir. Betonun donma sonunda çatlamasına neden olan en baskın etken içerdiği su miktarıdır. Su miktarı fazlaştıkça betonun donma - çözülme süreci sonunda bozulup dağılma riski artar. Buna karşılık boşluklarında su bulunmayan betonlarda donma - çözülme olgusu zararlı etki yaratmaz [27]. Betonun donma - çözülme etkilerine karşı dayanıklı olması için önce karma suyunun az miktarda olması yani su/çimento oranının sınırlandırılması, daha sonra çatlaksız ve gözeneksiz yani doluluk oranı yüksek ve geçirimsiz olarak üretilmesi gerekir. Ancak

betonun boşluklarının az orandaki bir kısmının su tarafından doldurulması durumunda donma olayı zararlı etki oluşturmaz. Çünkü betonda donma sonucu oluşacak hacim artışı karşılayan boşluk bulunacaktır. Yapılan deney ve gözlemlerden betondaki boşluklara yaklaşık %85 'inden fazlasının su ile dolu olması durumunda betonun dondan zarar gördüğü anlaşılmıştır. Buna göre betondaki boşluk miktarının ancak belirli bir kısmının su ile dolmasına izin verilebilir. Bu sınır sağlanamıyorsa sertleşmiş beton içinde ufak bağımsız ve küresel hava boşlukları oluşturan hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılarak donma zararları önlenir. Karma suyu miktarları, su/çimento oranının maksimum değerleri belirtilerek sınırlandırılmalıdır. Katkı maddesi kullanılarak oran 0,30 – 0,40' a kadar düşürülmelidir. Şartnameler, donma - çözülme etkisine maruz kalacak betonlarda su/çimento oranını yapı boyutuna ve iklim koşullarına göre sınırlamaktadır. İri boyutlu, su emme yeteneği yüksek olan ve kılcal çatlak içeren agregaların, donma-çözülme olayının sık tekrarlandığı sert iklimli yörelerde kullanılması sakıncalıdır. Bu nitelikteki yörelerde donma - çözülme zararları daha çabuk ortaya çıkar. Havaalanı pistleri, yollar gibi açık hava ile temas eden büyük yüzeye sahip ve kalınlığı az olan yapılarda, alınacak önlemlerle betonların donmaya dayanıklı olmaları sağlanmalıdır. Özellikle yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu ve kapilarite yolu ile betona girebilecek potansiyele sahip sular ciddi önlemler alınarak uzaklaştırılmalı, kapilarite tehdidi önlenmelidir [27].

1.9.4.2. Kimyasal Maddelere Karşı Direnç

Hidrojen, sülfat, nitrat, magnezyum iyonlarını içeren kimyasal ortamlar, betonun dayanıklılığını son derece etkileyen ortamlardır. Çimentoların içinde bulunan zararlı maddeler hacim sabitliğini bozan maddelerdir. Kalsiyum Oksit, Magnezyum Oksit ve SO₃ 'ün belirli oranlardan fazla olmaları tehlikeli olmaktadır. Su karşısında, bu maddeler erken veya geç dönemde önemli hacim artışına neden olurlar. Betonun içyapısından kaynaklanan ve dayanıklılığı önemli mertebede değiştiren bir olay da aktif silisyum içeren kayalardan üretilen agregaların, çimento bünyesinde yer alan sodyum ve potasyum oksit bileşenleriyle girdiği alkali-agrega reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyon sonunda sonsuz genişleme yeteneğine sahip bir jel ortamı meydana gelir. Jelin ayrıca su emmesi hacmini defalarca artırır. Olay daha zararlı ve belirgin duruma gelir. Genellikle yavaş gelişen alkali-agrega reaksiyonlarının zararlı etkileri, beton üretiminden en az iki yıl geçtikten sonra, kütlede önemli çatlakların oluşması ve direncin kaybolması biçiminde ortaya çıkar. Alkali - agreg

reaksiyonlarının oluşmaması için, aktif silis içeren opal, riyolit, dasit, andezit ve fillat kökenli agregalardan kaçınılmalı, çimento bileşimindeki alkali yani sodyum ve potasyum oksit oranları %0,6 'yı aşmamalıdır. Beton üretimi aşamasında karma suyu olarak kullanılacak suda %1'den fazla SO₃ ve %3'ten fazla Sodyum Klorür bulunmamalıdır. Sertlik derecesi düşük saf sular, hidrasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti (serbest kireci) eriterek bünyeden uzaklaştırırlar. Kireci izleyerek hidrate C4A ve hidrate silikatların çözünmesi başlar. Bu reaksiyonlar son derece yavaş gelişir. Ancak suyun, betonun bir yüzünden girip diğerinden çıkması ile hızlanabilirler. Doğadaki suların saf olması oldukça seyrek rastlanan bir olaydır. Sürükledikleri maddelerin etkisiyle sular asit ortamı veya bazik ortamı olurlar. Beton kimyasal yapı yönünden bazik bir karaktere sahiptir. Bu bakımdan tüm anorganik ve organik asitler, konsantrasyon oranlarına göre betona az veya çok zarar verirler. Doğal sular içinde erimiş olarak bulunan karbon dioksidin oluşturduğu karbonik asit, çimento silikatlarının hidrasyonu sonucu oluşan sönmüş kireçle reaksiyona girerek, suda eriyebilen kalsiyum karbonat oluşturur. Karbonatlaşma adı verilen bu olay, betonun direnci üzerinde olumsuz etki oluşturur. Humuslu topraklardan geçen doğal sular hümik asit içerirler. Yüksek konsantrasyonda hümik asit taşıyan sular betonun iç yapısını etkileyip erozyona uğratırlar [27].

1.10. Beton Yollarda Kullanılan Malzemeler

1.10.1. Kullanılan Beton Çeşitleri

Bir yol betonu bileşim olarak, genelde diğer inşaat betonları ile benzer özellikler göstermekte ise de, yol betonu yine de diğer betonlara göre, kullanılma yeri ve kullanılış biçimi nedenleriyle bazı farklılıklar gösterir. Su/çimento oranı diğer betonlarda 0,50 civarında iken yol betonlarında bu oran 0,35–0,45 değerindedir. İşlenebilirliği azaltabilecek bir olumsuzluk gibi görünse de, uygun bir vibrasyonla iyi duruma getirilmekte, aynı zamanda beton dayanımında çok önemli artışlar sağlanmaktadır. Diğer betonlarda 40 mm olan maksimum agrega tane boyutu, yol betonunda 70–80 mm'ye çıkabilmektedir. Gerek su/çimento oranının düşürülmesi, gerekse maksimum dane boyutunun arttırılması ile yine oldukça yüksek dirençli beton imali öngörülmekte ve sağlanmaktadır [28]. Genelde daha az önemli bir parametre olarak görülen ve 0,60 olarak kabul edilen Kırmataş/Çakıl oranı, yol betonunda yine önem kazanmakta ve bu oranın

değeri 0,60 ila 1,00 arasında seçilmektedir. Çakıl malzemesi kırmataşa göre daha dirençli, ayrıca yuvarlak ve pürüzsüz bir malzeme olarak görülür. Bu nedenle Kırmataş/Çakıl oranının arttırılması, ilk bakışta beton dayanımı üzerinde olumsuz rol oynayabilecek bir görüntü vermekte ise de, gerçekte bu durumun tam aksi bir sonuçla karşılaşmaktadır. Çünkü kırmataş malzemesi, iç kenetlenmeyi ve içsel sürtünmeyi arttırdığı gibi, çok daha önemlisi beton yolun yüzeyindeki sürtünme katsayısının da artmasına ve böylece seyir güvenliğinin fazlaşmasına olanak vermektedir. Buna karşılık işlenebilirliğin azalması karşısında yine iyi bir vibrasyonla bu sakınca giderilmektedir [27].

Yol betonunun büyük bir yüzeyel alana sahip olması ve beton dökümü sonrasında büyük ölçüde rötreye maruz kalıp üzerinde rötre çatlaklarının oluşması nedeniyle, rötre azaltıcı katkı malzemesinin kullanılması, ısrarla önerilmektedir. Bunun yanısıra diğer bir katkı maddesi olarak priz çabuklaştırıcıların da uygulanması, soğuk havada beton dökümü ve yolun trafiğe açılmasında çabukluk gerektiren durumlarda zorunlu ve son derece yararlı olmaktadır.

Betonun işlenebilirliği serme makinalarına göre belirlenir. 1 ila 5 cm arasındaki çökme değerlerine göre makina seçimi yapılmaktadır. İşlenebilirlik deneyindeki akış süresi, plaklı aletlerde 15 - 20 saniye (2,50 ila 5,00 cm çökme), diğer aletlerde de 20 - 40 saniye (1,00 ila 3,00 cm çökme) olmalıdır [27].

Yol betonu içindeki hava boşluğu yüzdesinin %2 ila %6 arasında olması gerekir. Daha küçük oranlardaki hava yüzdesi, betonu dondan yeterince koruyamamakta, daha yüksek orandaki boşluk ise önemli bir direnç düşüklüğüne yol açmaktadır.

Yol betonlama şantiyeleri genellikle büyük miktarlarda betonu kısa zamanda tüketme eğilimi gösterirler. Çoğunlukla günlük tüketim miktarları 1000–3500 m³ arasında değişir. Bu bakımdan yol betonu üretimine tahsis edilecek merkezin kapasitesi 400 m³/saat düzeyine erişebilmelidir. Yol yapımında uzmanlaşan müteahhit sayısının artması ve hazır beton olanağının kayar kalıp, vibratör, titreşimli kiriş master gibi yol yapımını kolaylaştıran etkenlerle beton yol sayılarının artması mümkündür. Beton besleme konveyörü vasıtası ile beton, transmikserden kalıbın içine dökülür. Bu safhada beton teorik olarak % 30 hava boşluğu içermektedir. Beton yayma helezonları vasıtası ile kalıp boyunca beton yayılır. Kalıp boyunca belli bir açı ve yaklaşık 40–60 cm aralıkla yerleştirilmiş hidrolik vibratörler ile beton işlenir. Vibrasyondaki amaç beton içerisindeki hava boşluğunu almaktır. Betonun vibrasyonu iki aşamalıdır:

Birinci aşama yerleştirme (konsolidasyon) olarak adlandırılır ve bu esnada vibrasyon etkisi ile iri agrega tabana doğru itilir. İri parçaların tabana doğru itilmesi, beton içinde bir hareket oluşturur. Bu hareket esnasında beton içindeki hava kabarcıkları yüzeye doğru ilerler ve serbest kalır. Bu aşama sonunda hala beton içinde %5 hava boşluğu kalmıştır.

İkinci aşamada vibrasyon etkisi ile beton agregalar arasında kayar. Bu safhaya sıvılaşma denir. Bu etki ile agregalar arası bir film tabakası oluşarak sürtünme en aza iner. Bu safhadan sonra kalan hava miktarı %1 mertebelerindedir. Ancak hava sürükleyici katkı kullanılarak, bu yüzdenin istenilen oranda yükseltilmesi mümkündür. Sise(stinger) tipi vibratörler, beton içerisinde çalışırlar. Bu nedenle enerjinin en iyi kullanıldığı vibrasyon metodudur. Kalıbın vibre edilmesi veya tüpün vibre edilmesi yöntemlerinde, vibrasyon kaynağından başlayarak uzaklaştıkça vibrasyon etkisinin beton içerisinde aniden azalması nedeniyle etkili bir konsolidasyon ve sıvılaştırma mümkün değildir.

1.10.1.1 Silindirle Sıkıştırılabilen Beton

Silindirle sıkıştırılabilen beton (Roller Compacted Concrete–RCC) kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre yeni bir beton kaplama türü olup, karıştırılması serilmesi ve sıkıştırılması, beton asfalt kaplamalarda kullanılan benzer teknikler kullanılarak yapılmaktadır. Geleneksel beton kaplamalara göre daha düşük su/çimento oranına sahip olan RCC kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. RCC kaplamalar genellikle çift tamburlu titreşimli silindir ile sıkıştırılmaktadır. RCC ismini, kaplamanın yapım yönteminden almaktadır. Bu yapım tekniği kullanılarak, büyük miktarda beton, donatısız olarak yerleştirilmektedir. RCC kaplamaların maliyeti, geleneksel beton kaplamalardan %10 ile %30 arasında daha düşüktür. RCC kaplamalar genellikle düşük hızlı ağır trafiğe sahip olan yol kesimleri ile havaalanı pist ve taksi yolları gibi mukavemet, dayanıklılık ve ekonominin çok önemli olduğu yerlerde kullanılmaktadır [27]. Bilinen ilk modern örneği 1970 yılında, İspanya’da, düşük hacimli trafiğe sahip olan bir yolda uygulanmıştır. Ağır trafik taşıyan diğer bir RCC kaplama uygulaması da 1976 yılında Kanada’da yapılmıştır. Uygulanan RCC miktarı 1990 yılının sonunda toplam 12.000.000 m² yi aşmış olup RCC uygulamasının yarısı İspanya’da yapılmıştır. Otoyollarda kullanılan 1.500.000 m² RCC üzerine, yüzey düzgünlüğü sağlamak için beton asfalt aşınma tabakası yerleştirilmiştir. Geriye kalan 10.500.000 m² RCC kaplama, ikinci sınıf yol, sanayi ve askeri alanlar gibi

düşük hızlı trafiğin olduğu yerlerde kullanılmıştır. Bu kadar geniş alanda kullanılması, özel bir ekipmana ihtiyaç duyulmamasından ve beton asfalt kaplamaların yapıldığı makinalarla inşa edilebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte yapım kolaylığı, çalışan eleman sayısını azaltması, yüksek üretim hızı ve bunlara bağlı olarak maliyetinin düşmesi de büyük oranda kullanılmasının nedenleri olarak sıralanabilir. Ayrıca, RCC kaplamalar, geleneksel beton kaplamalara göre daha kısa bir sürede trafiğe açılabilir [27].

1.10.1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendiliğinden yerleşen beton, kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, ayrışma ve terleme gibi problemler yaratmadan kohezyonunu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür. Klasik beton dizaynından farklı olarak kendiliğinden yerleşen betonda; kimyasal katkı, viskozite artırıcı katkı ve çok miktarda inert veya puzolanik mineral katkının tümünün veya bir kısmının kullanılması ihtiyacı doğmaktadır. Bu malzemelerin seçimi ve beton dizaynında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve standartlar geliştirilmektedir [32].

1.10.2. Çimento

Beton yol üst yapı uygulamasında standartlara uygun ve çabuk işlenebilme bakımından belirli ek koşulları sağlayan bazı çimento türleri kullanılmaktadır. Genel tanım olarak çimento, su ile karıştırıldığında, az veya çok akıcı niteliğe kavuşan, sadece suyun etkisiyle priz yapan, katılaşan ve nihayet sertleşen ince taneli malzemedir. Tane boyutları büyük oranda 90 mikronun altına düşürülmüştür. Çimento, kimyasal yönden duyarlı iri çakıl, kırmataş, kum gibi mineral malzemelerin büyük miktarlarda ve değişik oranlarda bir araya gelerek katı bir cisim oluşturmasında bağlayıcılık rolü üstlenir. Teknik ve ekonomik yönden genel eğilim, ana bileşen olarak portland klinkeri yanısıra, puzolanlar, yüksek fırıncıruflarının ve termik santral uçucu küllerinin ikincil bileşen olarak kullanılmasıdır. Beton yollarda basınç dayanımı yeterli, eğilme çekme dayanımı yüksek, rötesi az ve yavaş priz yapan çimentolar tercih edilir.

Beton yollarda Portland Çimentosu kullanılır. Çimento için bazı ek koşullar da vardır. Çimento çok ince olmamalı ve 2 saatten önce priz almamalıdır. 1980'lerde 5–10 yıllık beton yollar üzerinde çatlamlar görüldü. Bu çatlaklar büyüyerek yolun bozulmasına neden oldu. Hasarlı yolların tümünde Na₂O miktarı % 1–1,4 arasında olan çimentolar kullanılmıştı. Bu çatlamların alkali agrega reaksiyonundan kaynaklandığı tam olarak doğrulanamadı. Çünkü agregalar farklı kaynaklardan elde edilmişti. Yüksek alkali miktarından oluşan reaksiyonlar sonucu iç ve dış gerilmeler artmaktadır. Bu olaylardan sonra alkali oranı % 1' in altında çimentolar kullanılmış ve bir daha bu olaylarla karşılaşılmamıştır [33].

1.10.3. Agrega

Mineral kökenli, genellikle 100 mm'ye kadar çeşitli boyutlarda danelerden oluşan malzemeye "Agrega" denir. Agrega elde edilmesinde yararlanılan kaynaklardan doğal kayalar; volkanik, tortul ve metamorfik olmak üzere üç ana başlık altında toplanmaktadır. Her bir gurup içinde çok değişik tipte kayalar bulunabilmektedir. Agregalar, doğal kum ve çakıl ocakları şeklinde de doğada bulunabilmektedir. Betonun hacim bazında %60 - %75'ini, ağırlıkça da 4/5'ini agrega oluşturur. Agreganın karakteristikleri taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini, karışım oranlarını ve maliyetini önemli ölçüde etkiler. Beton agregası doğal kum ve çakıl karışımlarından, ayrıca yapay kırmataş (mıcır) malzemeden meydana gelir. Doğal agregalar taş ocaklarından, kurak mevsimde dere ve göl yataklarından, deniz ve nehir tabanlarından, çöllerden elde edilirler. Bu takdirde agregalar yuvarlak biçimli olup, "Doğal Kum" veya "Çakıl" olarak adlandırılırlar. Hedeflenen boyutların elde edilebilmesi için iri taş kütleleri konkasörde kırılıp agrega daha ufak dane boyutuna indirgenir. Bu durumda daneler köşeli ve pürüzlü yüzeyle olup, "kırmataş - mıcır" veya "kıрма kum" adını alırlar [27].

Beton üretimine uygun nitelikteki bir agrega temiz, sert ve sağlam olmalı, bu özelliklerinin yanısıra suyun etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir. Beton üretiminde kullanılacak agregaların yuvarlak (küresel) biçimde olması, işlenebilirlik yeteneğini ve betonun doluluğunu (kompasitesini) arttıracak nitelik gösterir. Bu bakımdan vibrasyon yöntemiyle kalıba yerleştirilecek olan betonlarda yuvarlak biçimli doğal agrega tercih edilir. Beton yollarda aşınma tabakasını

oluşturan üst betonda kullanılacak agreganın basınç dayanımı yüksek (en az 1500 kgf/cm²), aşınma direnci büyük ve hava etkilerine dayanıklı malzemeden sağlanması gerekir. Kırmataşın (mıcırın) dane biçimi, kübik forma yeterince yakın olmalıdır. Yassı ya da uzun dane formlu mıcırlar, betonun işlenebilme yeteneğini azaltırlar. Kırmataş yapımına uygun kayaç cinsleri granit, diyabaz, kuvars, kalker, andezit ve benzerleridir. Agreganın içinde %2'den fazla killi ve siltli toz kısım varsa, bu agregaya yığınının yıkanması gerekir. Agregaların jeolojik kökenleri, bunların beton üretiminde kullanılıp kullanılmayacağını belirler. Agreganın hangi kayaktan oluştuğu petrografik, içinde hangi minerallerin bulunduğu ise mineralojik analizlerle ortaya çıkar. Çimento hamuru ile en iyi aderansı gerçekleştiren kayaçlar kalsiyum karbonatlar yani kalkerler, en kötü aderansı sağlayanlar kalsiyum sülfatlı kayaçlardır. Beton yol yapımında kullanılan agregaların niteliğinde yapısal betondaki kullanımdan daha sıkı şartlar getirilmektedir. Betonun üst kısmında bulunan bölümde en az % 50'si 8 mm'nin üzerinde büyüklükte olmalı ve agregaların en az % 35' i kırılmış olmalıdır. Buna ek olarak, donma-çözülme ve aşınmaya karşı dayanıklılık kontrolü, yapısal betona göre daha dikkatli yapılmak durumundadır [33].

Kaymaya dayanıklı yol kaplama inşaatında ve kayma dayanımının zaman içinde korunmasında önemli olan kaplamanın yüzey yapısıdır. Beton yol kaplamalarında kullanılacak agregalar fiziksel, mekaniksel, kimyasal ve petrografiksel, dayanıklılık ve pürüzlülük açılarından kriterleri sağlamalıdır. Dane şekli kabaca kübik köşeli, basınç dayanımı yüksek, alkali reaksiyon açısından tehlike sınırının altında, aşınmaya ve cilalanmaya dirençli, yüzeyi biraz pütürlü ve ısıl genişlemesi az olmalıdır. İçerisinde sertlik değerleri çok az da fark etse değişik mineraller bulunmalı ki trafik altında aşınma sırasında farklı aşınma nedeniyle yüzeyde sürekli olarak gerekli pürüzlülük olabilsin. Genel olarak asfalt yollarda sürtünmeyi kaba agregaya özellikleri belirlerken beton yol kaplamalarında ince agregaya kısmı daha çok etkilidir. [21, 34].

Agrega gradasyonunda kaba agregaya için maksimum dane çapı ve ince agregaya için incelik modülü parametreleri beton karışım oranlarının belirlenmesinde gereklidir.

1.10.3.1. İnce Agregaya

Normal bir beton yolda yüzeydeki çıkıntıları genelde ince agregaya daneleri oluşturur. Kaba agregaya danelerinin aralarını dolduran ince agregaya çimento hamuru yüzey pürüzlendirme sırasında şekillenerek çıkıntılar oluştururlar. Özellikle beton taze iken

yapılan yüzey şekillendirme işlemleri sırasında, gerek çuval, yapay çimen veya fırça çekilmesi ve gerekse ince kanal açma (tining) sırasında yüzeydeki birkaç mm lik çimento hamuru şekillenerek çıkıntılarının büyük kısmını oluşturmaktadır [20, 21]. Dolayısıyla ince agreganın kübik şekilli, kırılma yüzeyleri pütürlü, aşınmaya dayanıklı sert kayaç kökenli danelerden oluşması gereklidir. Çivili lastik kullanan araçların seyrettiği yollarda ise ince agregalı kısımlar, çimento hamurunun direncine de bağlı olarak bir süre sonra aşınmakta, geriye sadece kaba agregaların çıkıntı oluşturduğu bir yüzey kalmaktadır [21, 34].

1.10.3.2. Bileşim ve Doku

Bazı agrega tanecikleri farklı sertliklere sahip minerallerden meydana gelmişlerdir. Bu tür bir agrega taneciğinin farklı aşınması ve üniform bileşimi, diğer agregalara göre istenilen mikro dokunun daha uzun bir süre korunmasını sağlar. Örnek olarak, çözülmez tortu olarak kuvars tanelerine sahip karbonatlı agregalar, kompoze üniform karbonatlardan daha iyi bir performans gösterirler.

Kalsit ve kuvarsın farklı sertliğe sahip olması agregaların kayma performansları üzerinde önemli bir etki oluşturur. Döküntü tortul kayaçlar (yumuşak karbonat çimentosu ile kuvars kırma taş gibi) aynı zamanda servis sırasında kaba bir dokuyu muhafaza eder. Üniform bileşim ve tane büyüklüğüne sahip sert kuvarsitin yüzeyi, karışık bileşimli agregalardan daha hızlı olarak cilalanıp parlar [34].

1.10.3.3. Aşınma -Cilalanma Direnci

Agregaların aşınma dirençlerinin tayini için kabul görmüş yöntemler bir çelik tamburun içinde çelik bilyelerle döndürmek, magnezyum sülfat çözeltisiyle işleme tabi tutmak şeklindedir. İlk yöntemin suyla karışık yapıldığı deney Mikro Deval aşınma testidir(AASHTO T 327). Kuru yapılan test ise Los Angeles Aşınma testidir(ASHTO T 96). İkisi arasında detay farkları olsa da prensipte aynıdırlar ve hepsinin sonuçları birbiriyle iyi bir korelasyon gösterirler.

Los Angeles aşınma deneyine tabi tutulacak agrega Tablo 1.7 de belirtilen dane çaplarındaki miktarlarda yıkanmış ve kurutulmuş olarak 5000 gr olmalıdır. Deney aletinin tamburuna koyulan agrega içindeki çelik bilyelerle beraber iki saniyede bir devir hızıyla

500 defa döndürülür. Kapağı açılarak hiçbir kayba meydan vermeden agregaya çıkartılır ve 1,7 mm elekten elenir ve yıkanarak kurutulur. Kayıp ağırlığın ilk 5000 gr ağırlığa oranı aşınma yüzdesini verir (ASTM C 131–69/C535–69).

Agrega danelerinin tekerlekle temas eden kısımlarında cilalanma oluşur. Yani mikro dokusu azalır. Kaymaya karşı koyma direnci düşer. Kaplama aşınma tabakasında kullanılacak agreganın cilalanmaya yatkınlığının belirlenmesi için geliştirilen yöntemler hızlandırılmış Accelerated Stone Polishing Test ve özellikle kalker türü agregalarda kullanılan asitle muameleye tabi tutmadır.

Tablo 1.7. LA aşınma deneyinde kullanılacak agreganın daneleri ve alınacak miktarlar

Elek (mm)		Belirtilen boyutların ağırlıkları (gr)			
Geçen	Kalan	A	B	C	D
38,0	25,4	1250±25	-	-	-
25,4	19,0	1250±25	-	-	-
19,0	13,2	1250±10	2500±10	-	-
13,2	9,5	1250±10	2500±10	-	-
9,5	5,6	-	-	2500±10	-
5,6	4,7	-	-	2500±10	-
4,7	2,3	-	-	-	5000±10
	Toplam	5000±10	5000±10	5000±10	5000±10

Cilalandırma deneyinde bir tambur üzerine yapıştırılmış kaba agreganın daneleri, üzerlerine basarak serbest dönen lastik tekerlek ve su-aşındırıcı toz etkisinde aşındırılmakta ve sürtünme katsayısı değerindeki azalmaya göre değerlendirme yapılmaktadır.

1.10.4. Donatı

TS 500'de donatının tanımı, belirtilen ilke ışığında, "Betonla birlikte çalışmak üzere, yapı elemanlarının betonu içine sıyrılmayacak bir biçimde yerleştirilmiş çelik çubuklar" ifadesiyle verilmiştir. Bu genel ilke yanısıra, yol betonlarında kullanılan donatıların diğer önemli bir işlevi de betonun rötresinden kaynaklanan şekil değiştirmelerin ve kılcal çatlakların, beton ve donatı arasındaki aderansın yardımıyla, üniform olarak dağıtılmasıdır. Bu durumda yüksek aderans sağlayan donatı tipleri seçilmelidir. Beton yol inşaatında diğer bir donatı kullanma alanı da derzlerdir ve düşey yük transferinin sağlanması için "Kayma Demirleri" kullanılır. Bu demirlerin çapları plağın kalınlığına bağlı olarak 20 mm'den fazla

seçilir. Boyları genellikle 80–100 cm'dir. Demirin yüzeyi kaymayı sağlamak için nervürsüz olmalıdır. Sertleşmiş betonun içinde, plağın genişmeden kaynaklanan şekil değiştirmesine engel olmamak için plastik veya bitümlü bir film tabakası ile kaplanmış olurlar [27].

Derzlerin veya çatlakların zamanla açılıp genişlemelerini önlemek amacıyla kullanılan donatılara "Bağlantı Demiri" denmektedir. Yüksek aderanslı olan bu tip donatılar genellikle 12 mm çaplı ve en az 80–100 cm uzunluğunda olurlar. Sürekli betonarme yol tekniğinde kullanılan plak donatıları da yüksek aderanslı türden seçilirler. Kullanılan demir çapları 12–16 mm'dir. Firkete boyları genellikle 12–18 m'dir. Beton yol tekniğinde kullanılan diğer bir donatı türü de kaynak ile çubukları bağlanmış prefabrike hazır demirlerdir.

1.10.5. Karma Suyu

Beton karışımının üretilmesinde kullanılan suya özel itina gösterilmesi gerekmektedir. Çünkü beton malzemesinin önemli bileşenlerinden biri olan karma suyunda bulunabilecek eriyik ve askıdaki çeşitli maddeler çimentonun priz sürelerini, betonun direncini ve işlenebilme yeteneğini etkileyebildikleri gibi, beton yüzeyinde lekelenmelere ve donatının korozyonuna yol açabilmektedir. Çeşitli standartlarda veya şartnamelerde genelde beton karma suyundan istenen nitelik "içilebilir su" olmasıyla belirtilmektedir. Bu tanım, karma suyunda beton özelliklerini olumsuz etkileyebilecek ölçüde zararlı madde bulunmaması gerektiği anlamına gelmektedir. Eğer beton karışım suyunun niteliğinden şüphe ediliyorsa laboratuarda suyun kimyasal analizi yaptırılabilir veya bu suyla üretilen betonun dayanımı, kalitesinden emin olunan suyla üretilen özel örnek betonun dayanımıyla karşılaştırılır. Karışımda kullanılacak karma suyunda asidik ortam bulunmaması yani pH değerinin 7'nin üzerinde olması istenmektedir. Karma suyundaki asitli ortam, çürümüş bitki köklerinden oluşan hümik asitten kaynaklanır. Bu asit priz olayını geciktirir. Suyu kanalizasyon karışıyorsa, şeker ve nişasta gibi organik maddelerin olası varlığı priz geciktirici rol oynar. Endüstriyel bölge atık sularında rastlanabilecek ağır metal oksitleri ve tuzları(Hg, Pb, Zn) priz süresini etkiler. Olası deterjan ve sıvı yağ kirlenmeleri, karma suyunun priz, katılaşma ve sertleşme üzerindeki rolünü geriletir [27].

Manganez, Magnezyum, Amonyum ve tuzları hidrate olmuş çimento bileşenlerini iyon değişme yolu ile tahrip ederler. Donatı demirlerinin paslanmasına yol açacak Klor ve Sülfat iyonlarının üst sınırları sırasıyla 0,5 gr/lt ve 1 gr/lt dir. Aşındırıcı özellik taşıyan

karbonik asit ve priz geciktirici yağların karma suyunda bulunmaması gerekir. Bulanık suların bulanıklığa neden olan askıdaki kil ve silt gibi maddelerin miktarı 2 gr/lt den fazla değilse beton karışım suyu olarak kullanılmasına izin verilmektedir [27].

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Amaç

Beton yollar yapısal olarak trafik ve çevre yüklerine karşı dayanabilmektedirler. Ancak yapısı sağlam bir beton yolun yüzeyi trafiğin ve iklimin aşındırıcı etkilerine dayanıksız olabilmektedir. Yüzey özellikleri, hem araçların seyir güvenlikleri, konforu ve hem de lastiklerinin aşınmasıyla iç içe olduğundan yol ve trafik mühendisliği açısından daha büyük önem taşımaktadır.

Karayollarının, olabildiğince uzun bir hizmet süresi boyunca özellikle yeterli ıslak sürtünme katsayısı değerini muhafaza etmesi beklenir. Bunun için, yolların inşasında yüzey ve karışım özelliklerinin bu doğrultuda iyi dizayn edilmesi çok önemlidir.

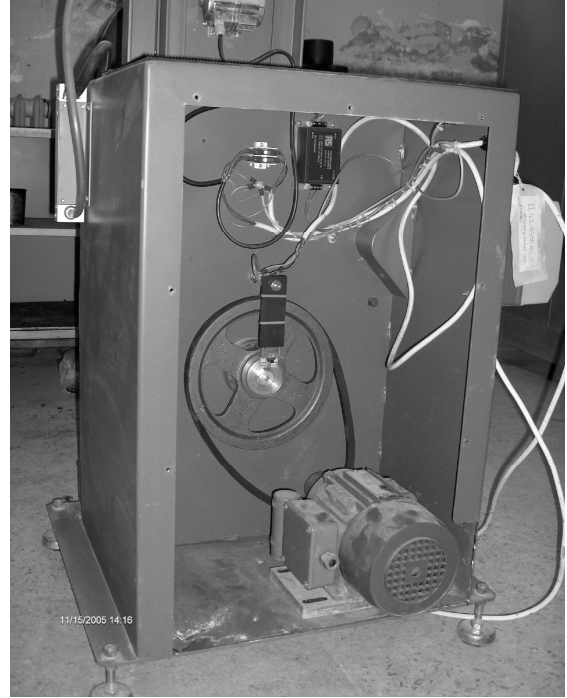
Normal bir beton yolun yüzeyindeki çıkıntıları iri agrega danelerinden daha çok çimento hamuru içindeki ince agrega daneleri oluşturmaktadır [20, 21]. Aşınma-kopma yoluyla sürekli değişerek pürüzlülük ve dolayısıyla sürtünme katsayısına direkt etki eden ince agreganın, incelik modülü ve mineralojik yapıya göre etkisinin nasıl değiştiğini belirlemek amacıyla bu çalışma yapılmıştır.

2.2. Kapsam

Bu çalışmanın kapsamında öncelikle, ağır taşıtların tekerlek kauçuğundan imal edilmiş bir lastik tekerleğin, pürüzlendirilmiş beton yüzeye sabit düşey ve yatay gerilme uyguladığı bir aşındırma deney düzeneği geliştirilmiş; sonrasında 16-4 mm aralığındaki kalker kökenli kırmataş kaba agregası, 0,4 su/çimento oranı ve 400 kg çimento dozajı sabit olan; ancak ince agregası kalker, kalker-bazalt karışık (%50bazalt-%50kalker) ve bazaltdan her biri üç farklı incelik modülünde dokuz beton karışım hazırlanarak geliştirilen deney düzeneğinde aşınmaya tabi tutulmuş; 0, 1000, 5000, 25000 ve 100000 tekerlek yükü geçiş sayılarında, toplam yirmi yedi beton numune yüzeyinin ıslak sürtünme katsayıları, iki boyutlu yüzey profilleri, toplam temas alanı içindeki temas noktalarının kapladığı alan yüzdesi ölçülmüş; elde edilen sürtünme, temas alanı ve profil verileri, karışımların basınç dayanımları ve eğilmede çekme dayanımlarıyla karşılaştırılmıştır.

2.3. Deney ve Ölçüm Düzenegi Gelistirme

Deney düzenegi için agregaların trafik altında cilalanmaya yatkınlığını ölçmede kullanılan standart Hızlandırılmış Cilalanma Deney Aleti (British Accelerated Polishing Machine) modifiye edilmiştir. Bu deney aletinde serbest dönen belirli bir yük etkisindeki 20 cm çapındaki lastik tekerlek, tekerlek-agrega temas ara yüzeyine ince kum ve su karışımı akarken, 40 cm çaptaki tambur üzerine yerleştirilmiş dizili agregaların yüzeylerini aşındırmaktadır. Arka kısımdaki bir elektrik motoru, dış yüzeyinde 5 cm genişliğinde ve 3,5 cm (agrega danelerinin tek sıralı olarak yerleştirilmesine yetecek) derinlikte yuvası olan 40 cm çapındaki tamburu çevirmekte, tambur da kendisinin üzerine yapıştırılmış agregalara basmakta olan serbest dönme hareketi yapan 20 cm çapında lastik tekerleği çevirmekte, gerginliği ayarlanabilen bir yay vasıtasıyla da tekerleğin bağlı olduğu kirişe düşey yük uygulanmaktadır.



Şekil 2.1. Deney düzeneginin önden ve arkadan ilk hali

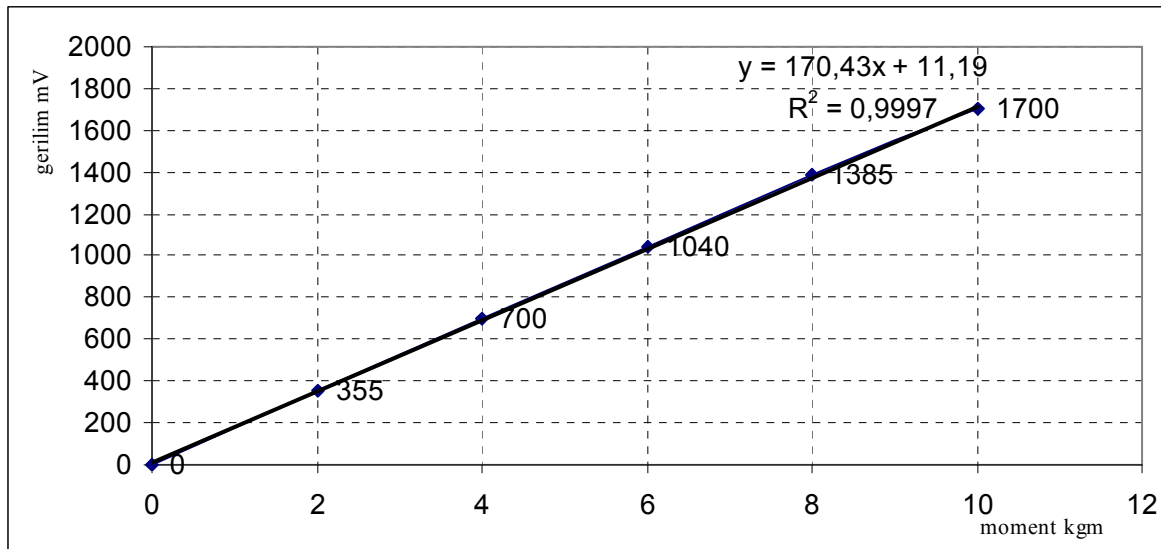
Deney aletindeki tekerleğin kauçuk kısmının içi doludur. Bu tekerleğin basma yüzeyi düz ve izsizdir. Kauçuğun lastik sertliği, sanayide kauçuk ürünler imal eden bir işyerinden

temin edilen kauçuk sertliği ölçer (Shore-A metre) ile ölçülmüş ve 70 değerinde olduğu görülmüştür.

Yapılan deneme turlarında serbest dönüş yerine kısmi frenlemeyle sürtünme etkisinde kalan tekerlekte, kauçuğun kolay aşındığı ve yanak kısmında çatlaklar olduğu görüldü. Bu cihaz laboratuvara çok önceden geldiğinden zamana bağlı yaşlanmanın meydana geldiği ve bu haliyle kullanılamayacağı anlaşıldı.

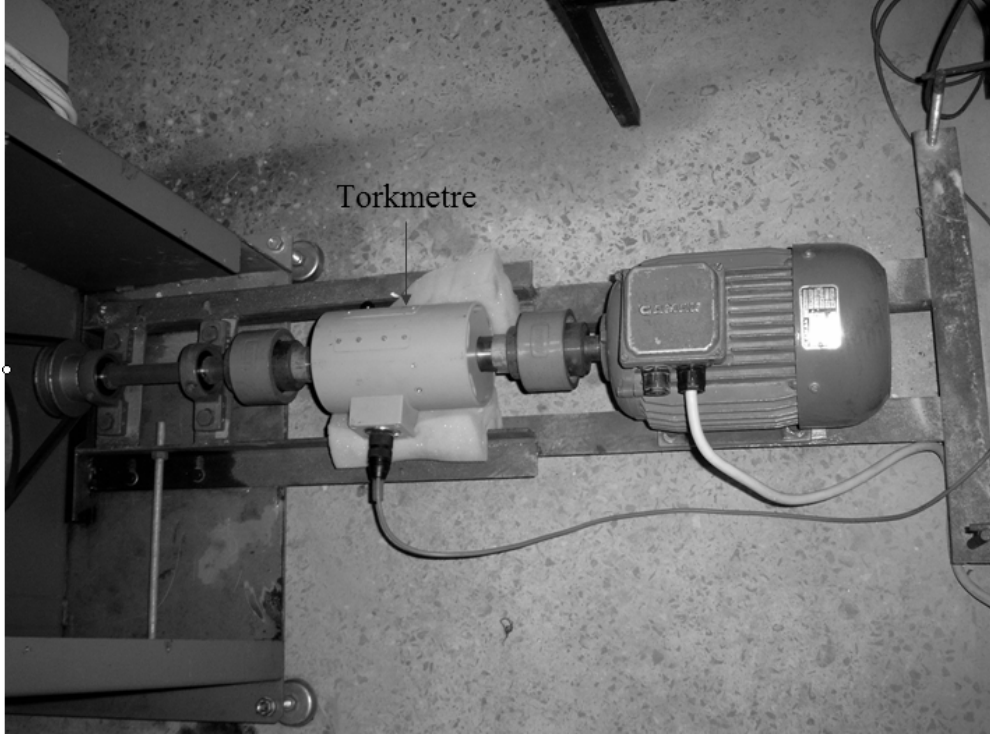
Tasarlanan şekliyle sürtünmeli ve ağırlığı artırılan numune tamburunu çevirmekte mevcut motor yetersiz kaldığından yerine daha güçlü başka bir elektrikli motor kullanıldı. DC Motorun 3 fazlı elektrik bağlantısını sağlamak için deney odasına 50 m kablo çekildi ve motorun istenilen zamanlarda durmasını sağlamak için zaman ayarlı akım kesici konuldu.

Motor direkt olarak tamburu çevirdiğinde, tekerleğin bir noktadan geçiş hızı yaklaşık 80 km/saat gibi yüksek bir değer olduğundan kayış kasnak sistemiyle tekerleğin beton numune yüzeylerinden geçiş hızı 40 km/saat e düşürüldü. Motorun hemen sonrasına çevirme momentini ölçecek 200 Nm kapasiteli dönen tip bir torkmetre yerleştirildi. Torkmetrenin kalibrasyonu, bir tarafı sabitlenip diğer tarafına 20 cm uzunlukta kol takılıp bu kola ağırlık asarak oluşan gerilmeleri milivolt (mV) türünden kaydederek yapıldı. Elde edilen kalibrasyon eğrisi şekil 2.1. de verilmektedir. Böylece tekerlek-beton ara yüzündeki toplam sürtünmenin oluşturduğu moment ölçüldü.



Şekil 2.2. Torkmetrenin kalibrasyon eğrisi

Düzeneğin arka kısmındaki mevcut yer yetmediğinden, aynı ekseninde dönen motor-torkmetre-yatak-kasnak sistemi dışarıya doğru uzanan ilave bir kızak üzerine monte edildi ve kayış gerginliğini sağlamak için kenardan gerdirme koyuldu.



Şekil 2.3. Değişimden sonra arka kısım

Mevcut tambur yüzeyindeki yuva derinliği ve genişliği tek sıra agregaya göre olduğundan, bir beton karışımı temsil edebilecek büyüklükteki sert numuneleri yerleştirmek için çok yetersiz kaldığından, beton numunelerin koyulacağı 10 cm yuva derinliğine ve 10 cm genişliğe sahip aynı dış çapta yeni bir tambur imal edildi (Resim 2.3.)

Tambur değiştiğinden kalıpların da yenilenmesi gerekti. Mevcut kalıplar tek tek imal edilmişlerdir. Numunelerin pürüzlendirilecek, test edilecek yüzeyleri eğri dış yüzeyleridir. Taze beton harcının, tek tek yapılmış, aşınacak yüzeyi açık bu derece eğrilik yarıçapına sahip bir kalıba dökülmesi durumunda kenarlara doğru çökmeden, eğrilik çapını bozmadan katılaşmaya kadar beklemesi çok zor olacaktır. Kaldı ki elde edilen numunelerin tamburda yan yana dizilmesiyle oluşturulan yüzey de düzgün olmayabilecektir.



Şekil 2.4. Yeniden imal edilen derin yuvalı tambur

Bu sakıncaları gidermek için kalıp, tamburun yan yüzü açık durumunu temsil edecek şekilde bütün yapıldı. Test edilecek yüzey tarafı kapatıldı. Çelik bir alt düzlem üzerine, içte 20 cm çapta dış yüzü eşit aralıklarla enine kanallanmış bir silindir ve onun dışına aynı merkezde olacak şekilde 40 cm çapında 1 mm kalınlıkta demir sacdan kıvrılarak hazırlanmış, açılıp kapanır ikinci bir silindir yan kenarları üzerine yerleştirildiler. 1 mm lik sac levhadan kesilen dörtgen parçalar bu iki tamburun arasını 15 ayrı odacığa bölecek şekilde yerleştirildi. Bunun için kıvrılmış sac silindirin iç yüzeyine ara bölmelerin girmesi için küçük parçalar perçinlenerek yuvalar oluşturuldu. Bu iki silindirin sürekli aynı

merkezde kalması için alt çelik düzlem üzerinde yuvalar ve ayrıca sabitleyici pimler yapıldı. Bir beton karışımın farklı koşullardaki deneylerinde çok sayıda numune gerekeceğinden kalıptan üç adet yapıldı.



Şekil 2.5. İmal edilen kalıplar ve çıkan numuneler

Numunelerin yüzeylerinin pürüzlendirilmesi, gerçek yol şartlarına yakınlığın sağlanması ve deney sırasında aşınmanın ölçülebilmesi açısından şarttır. Ancak beton yollardaki pürüzlendirme çeşitli şekillerde yapılmakta olduğundan kesin bir pürüzlendirme standardı olmamakla birlikte dikkat edilmesi gerektiği söylenen kriter ortalama pürüzlülük derinliğinin 0.8 mm den az olmaması gerektiğidir. Deney sırasında teste tabi tutulacak tüm numune yüzeylerinin aynı şekilde pürüzlendirilmiş olması da oldukça önemlidir. Kalıbın kapalı kalan eğri yüzeyinde aynı ölçüde pürüzlendirme sağlamak için yapılan denemelerde, Türkiye piyasasında şerit halde satılan ortalama pürüzlülük derinliği değeri kum yagma yöntemi uygulanarak 0,8 mm bulunan en kalın zımpara kağıdı kullanıldı. Kalıbın iç yüzeyine zımpara kâğıdı bütün şerit halinde yapıştırıldı. Yapıştırıcı olarak Japon diye tabir edilen çok akıcı ani yapıştırıcı türü kullanıldı. Şeridin tüm noktalardan yapışarak kalıbın tam şeklini almasına dikkat edildi.

Kalıba dökülen betonla zımpara kâğıdının aderansını engellemek için yüzey çok az da olsa yağlandığında kalıp sökümünde zımpara kâğıdındaki bu yağın kaybolması, hatta bazı yerlerde betonun yüzeyinde açıkça görülmesi nedeniyle yağ kullanılmadı. Beton dökümünden hemen önce zımpara kâğıdı yüzeyi sisleme yapılarak ıslatıldığında ve beton dökümünden yaklaşık 24 saat sonra kalıp sökümü gerçekleştirildiğinde aderansın büyük oranda engellendiği tespit edildi.

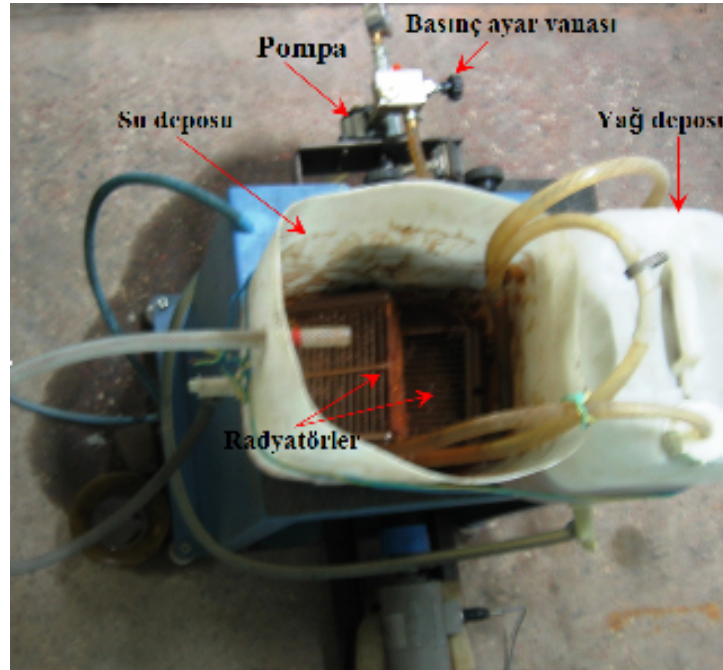
Kalıptan çıkarılan beton numuneleri deney düzeneği üzerindeki dönen tambur üzerinde sıkıca tutmak, fırlayıp çıkmalarını ya da ses yapmasını önlemek için, onları dış eğri yüzeylerinin kenarlarından sıkacak, fakat gerilme etkisiyle zamanla gevşemeyecek özellikte iki adet dar şerit halinde çelik gergi hazırlandı. Bunun için kalın çelik profillerin kesiminde sanayide kullanılan şerit hızar ağzından kenarları düzeltilerek faydalanıldı. Gerdirmeyi sağlamak için gergi uçlarına kısa köşebent ve civata yerleştirildi. Bu gergiler tek noktadan gerdirilerek kullanıldığından, gerdirme sırasında beton yüzeyi-gergi alt yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı numunelerin konumlarının bozulmaması, birbirlerine göre farklı yüzey yüksekliğine sahip olmalarını sağlamak için, gerginin alt yüzeyi röntgen film şeritleriyle kaplandı ve gergi-plastik ara yüzeyi gresle yağlandı.

Üzerine değişik yoğunluklarda numuneler yerleştirilmiş tamburun dönüşü sırasında, ağırlık merkezinin kaçması nedeniyle deney düzeneğinde oluşan sarsıntıları gidermek için tamburun balans ayarı, tambur kenarlarına küçük ağırlıklar yapıştırmak suretiyle makine mühendisliği bölümü motorlar laboratuvarındaki balans ayar makinesi kullanılarak yapıldı. Ancak balans ayar cihazı üzerindeki mevcut mil tambura ince geldiğinden tambura göre

yeni bir mil imal edildi. Tamburdaki numuneler her değiştiğinde deneye başlamadan önce bu balans ayarı işlemi tekrar edildi.

Tekerleğin baskı yzeyi ile beton numunelerin pürüzlü dış yzeyi arasında zamanla değişmeyecek şekilde belirli bir srtünme kuvvetinin oluşturulması için alternatifler araştırıldı. Çevirme gücünü üreten motorun tamburu çevirdiği ve tamburun da kendisiyle temas halindeki tekerleği çevirdiği sistemde, tekerleğin de yağ basıncı sabitlenmiş küçük bir dişli yağ pompasının milini çevirmesi durumunda, basit ve etkili olarak değişmeyecek bir kısmi frenleme yapılabileceğine karar verildi. Bilindiği gibi hareket sırasında ısınan yağın viskozitesi düşeceğinden geçişi kolaylaşacak ve çalışma süresi içinde pompanın çalışması için gerekli güç azalacaktır. Bu durumda bir boru kesitinden geçen yağın basıncını sabitleyen yağ basıncı ayar vanası kullanarak pompada sabit basınç ve dolayısıyla tekerlek-beton ara yzünde sabit srtünme sağlanmış olacaktır.

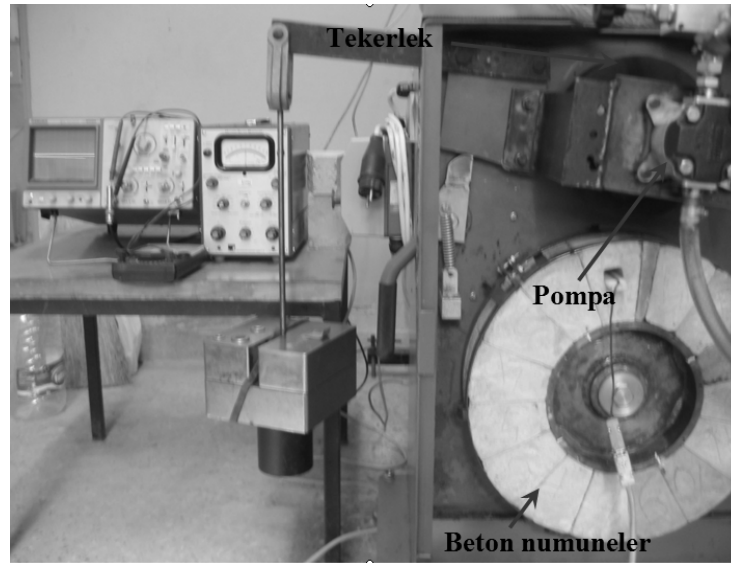
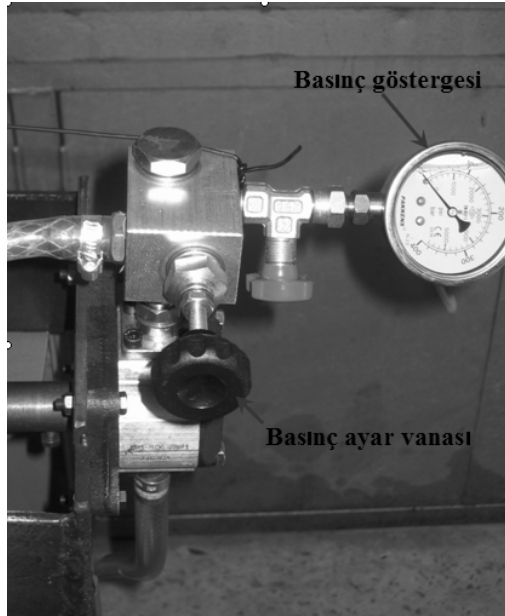
Tekerleğe, aynı eksende çalışacak şekilde bir yağ pompası takıldı. Eksenlerin çakışmasındaki hataları gidermek için tekerlek-pompa mili arasına küçük bir şaft yerleştirildi. Deney düzeneğinin üzerine koyulan, alt kısmı yağ pompasından daha yukarı seviyede olan içine hidrolik yağı koyulmuş bir bidona, alttaki musluk kısmından pompaya gidiş, üst kapaktan ise pompadan dönüş verilerek, pompa-depo arası yağ alış veriş döngüsü sağlandı.



şekil 2.6. Yağ ve su döngüsü bağlantıları

Döngü sırasında yağın, ısınma nedeniyle viskozitesinin azalmasından dolayı pompadan geçişi kolaylaştığından, tekerleğin pompayı çevirmesi için gerekli moment azalacaktır. Dolayısıyla tekerlek-beton ara yüzündeki sürtünme de azalacaktır. Bunu gidermek için pompanın çıkışına basınç sınır vanası takıldı. Basınç sınır vanasına yardımcı olması açısından yağın fazla ısınmasını engellemek için döngü halindeki yağ, içinde soğuk su bulunan kabdaki iki küçük radyatörden geçirildi.

Basıncın sabit kalıp kalmadığı torkmetrede oluşan gerilimi gösteren osiloskop ekranından ve yağ basınç göstergesinden takip edilerek doğrulandı.

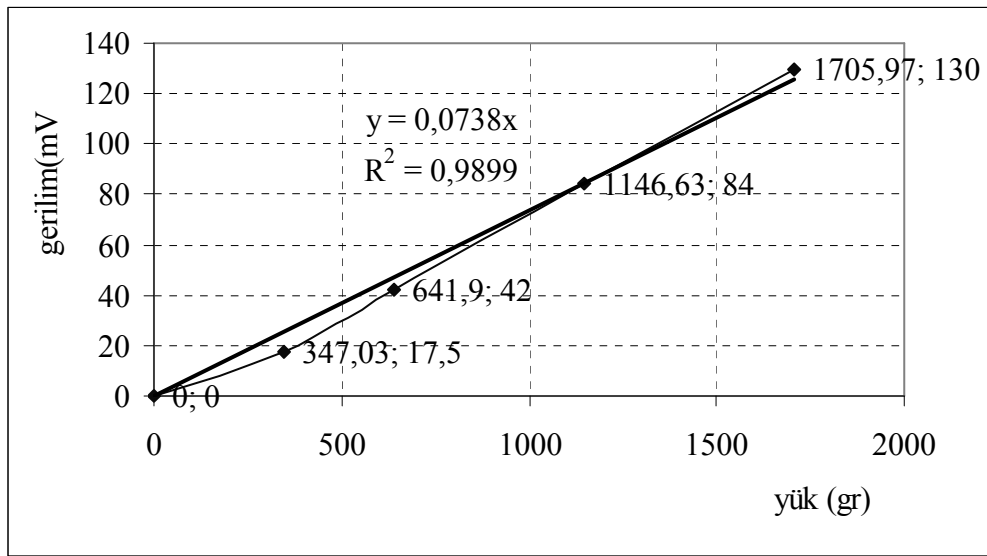


Şekil 2.7. Tekerleğe frenleme yaptıran yağ pompası ve genel görüntüsü

Mevcut durumda tekerleğin bağı olduğu bir ucundan mafsallı kirişin diğer ucuna yay takılarak tekerleğe düşey yük uygulanmıştı. Bu yay küçük kaldığından ve yay uzama boyunun küçük değişimlerinde uygulanacak yük de değişeceğinden, daha basit ve emniyetli olduğu düşüncesinden hareketle, uzatılan kirişin ucuna ağırlık asmak suretiyle tekerleğe istenilen düzeyde sabit düşey yük uygulandı.

Tekerleğin beton yüzeye uyguladığı basıncı ölçmek için, mevcut deney düzeneğinde herhangi bir teçhizat yoktur. Tekerleğin bağı olduğu kiriş tartılarak ağırlığı belirlenir ve moment dengesinden bulunan tekerlek yükünün tekerlek-beton temas yüzey alanına bölünmesiyle bu ara yüzeydeki ortalama temas basıncı bulunmuş olmaktadır. Hâlbuki tekerleğin bastığı yüzeyde oluşan basınç dağılımı boyuna doğrultuda çan eğrisi şeklinde olup ortalaması ile maksimum değeri arasında fark vardır [17]. Bu fark, tekerleğin dolgu ya da şişme olmasına, şişme basıncına, çapına, yüküne bağlı olarak değişmektedir. Deney düzeneğinde tekerlek çapının küçük ve yol yüzeyini temsil eden beton yüzeyin de dairesel olduğu dikkate alınır bu fark normal şartlardakinden daha fazla olabilecektir.

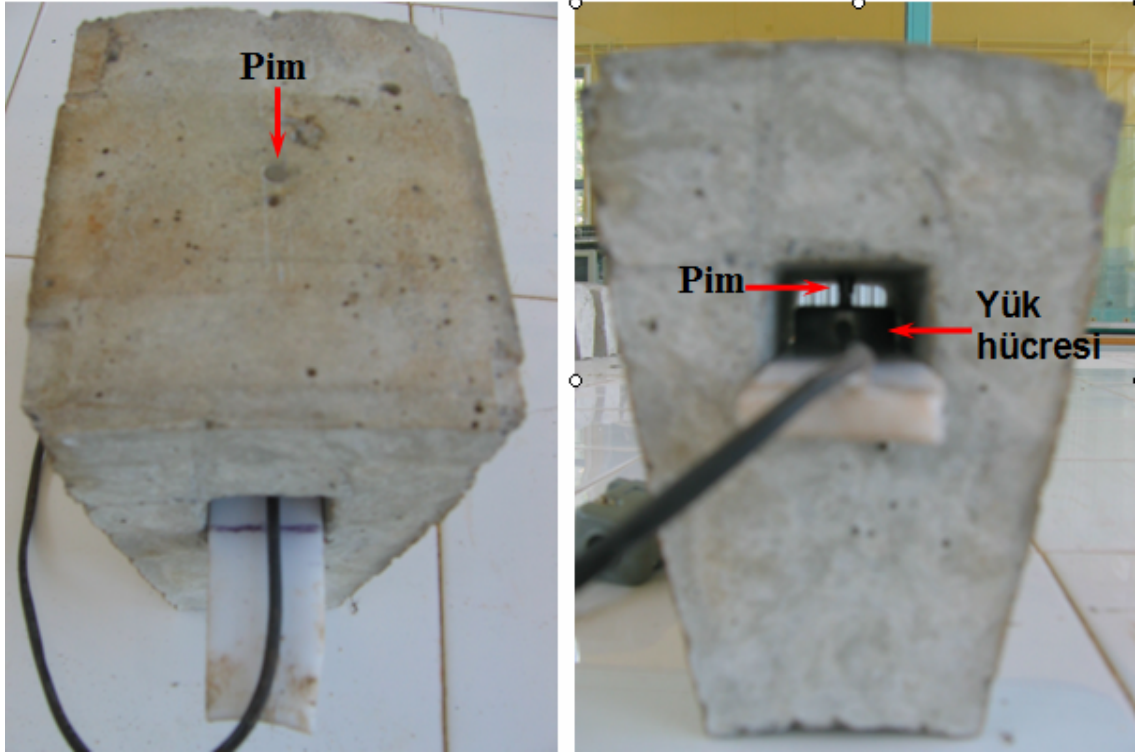
Temas alanındaki gerilme dağılımını bulabilmek için ölçüm yüzeyi çapı 3 mm tabanı 20 mm olan küçük bir yük hücresi kullanıldı. Önce kalibrasyonu yapıldı. Tamamen yatay bir düzlem üzerine yerleştirilen yük hücresinin ölçüm alınan üst kısmına çeşitli ağırlıklar konuldu ve oluşan gerilimler mili volt (mV) türünden okundu. Elde edilen kalibrasyon eğrisi Şekil 2.8. de verilmektedir.



Şekil 2.8. Yük hücresinin kalibrasyon eğrisi

Temas alanının orta ekseninden 3mm çaptaki küçük alandan yük ölçümü alabilmek için beton numune içersinde, yük hücresinin yerleştirileceği düzgün bir boşluk ve yüzeydeki bu orta noktadan içerdeki boşluğa yükü ara bir çubukla iletmek için dik tünel oluşturuldu. Bunu sağlamak için dikdörtgen prizma şeklindeki plastik bir parça kalıp içine dik olacak şekilde yapıştırıldı. Kalıbın eğri yüzeyi ile bu prizma arasına iç çapı 3mm olan bir borucuk sabitlendi. Taze beton kalıp içine itinayla yerleştirildi.

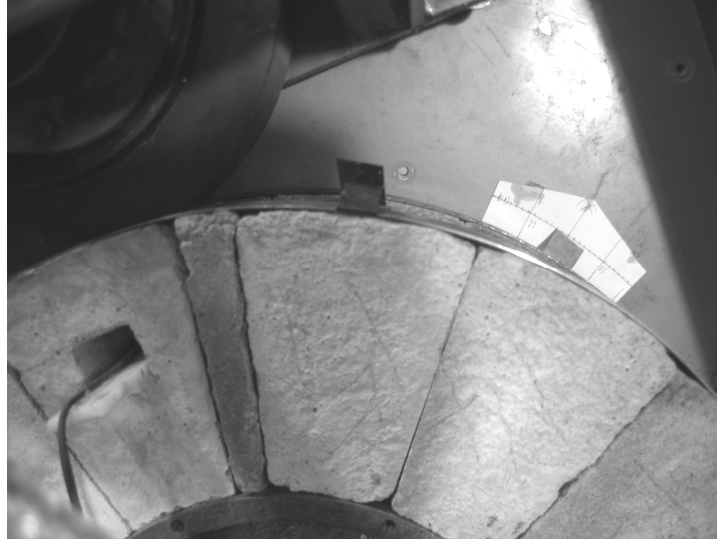
Bir gün sonra kalıp açılarak numune çıkarılıp su tankında bir hafta kür edildi. Bir ucu diğerine göre daha dar olan plastik parça beton numuneye zarar vermeden çıkarıldı. Elde edilmiş olan ortası delik içi boşluklu numune toplam bir ay kür edilerek basınç dayanımı arttırıldı. Yük hücresi, ölçüm yüzeyi yüzeye açılan tünele denk gelecek şekilde bu boşluğa rijit olarak yapıştırıldı. Aradaki pimin uzunluğu yüzeyde çikıntı oluşturmayacak, yüzeye teğet olacak şekilde ayarlandı.



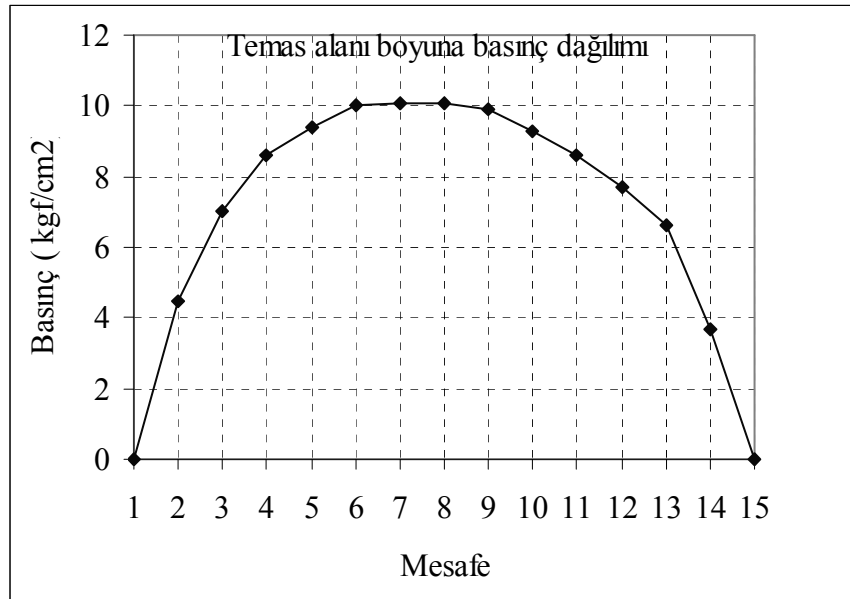
Şekil 2.9. Düşey basınç dağılımını ölçmek için oluşturulan düzenekli numune

Düşey basınç dağılımını ölçmek için oluşturulan düzenekli numune tamburdaki diğer numunelerin arasına yerleştirilip gergiler sıkıldıktan ve tambur deney aletindeki yerine yerleştirildikten sonra ölçüm alımına geçildi. Önce boyuna eksen üzerindeki pimin küçük

alanında (0.07cm^2) pik noktasındaki basınç değeri 10 kg/cm^2 olacak şekilde kol ucuna ağırlık asılarak düşey yük ayarlandı. Sonra ölçüm noktası üzerinden geçişinde tekerlek, 45 mm lik temas boyunun 15 te biri olan 3mm lik küçük sabit aralıklarla çevrildi. Her bir duruşunda yük değerleri ölçüldü. Ortalama basınç gerilmeleri hesaplanarak çan eğrisinin tüm basınç gerilmeleri gerçeğe yakın bir şekilde elde edildi.

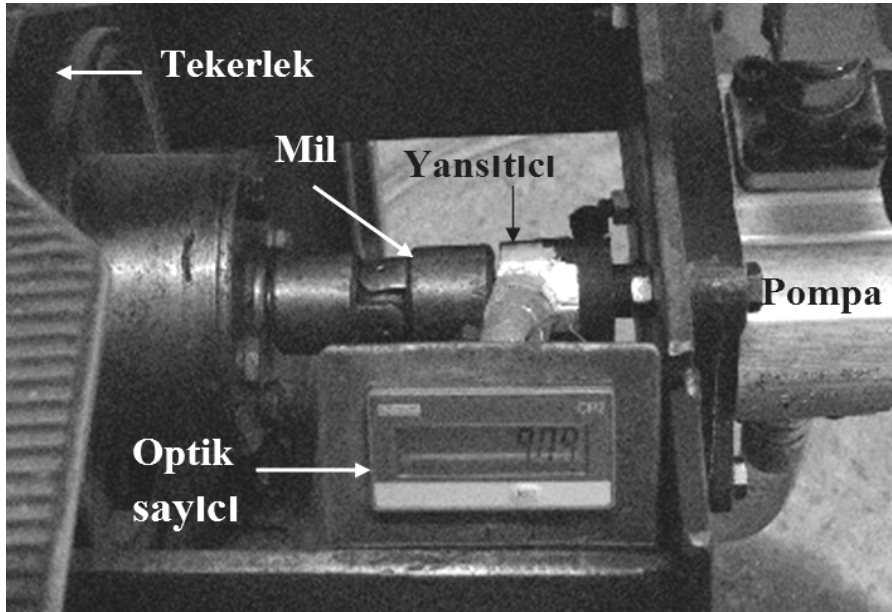


Şekil 2.10. Eşit aralıklarla temas basıncı ölçümü alınması



Şekil 2.11. Tekerlek-beton temas alanının ortası boyunca eksenini üzerindeki basınç dağılımı

Deney sırasında tekerlek yükü tekerrür sayısının belirlenmesi için devir sayısı göstergesinden ziyade bir toplam sayıcıya gerek vardır. Deney düzeneğinin üzerinde mevcut bir sayıcı (numaratör) olmayıp sadece tamburun devir sayısını veren bir gösterge mevcuttur. Sekiz haneli bir numaratör, düzenekte tekerleğin kısmi frenleme yaparak dönmesi esas olduğundan dolayı sürtünmeyi sağlayan pompanın mili üzerinden gelen ışık yansımalarının tetiklemeyle çalışacak şekilde düzeneğe ilave edildi. Bunun için bina içi elektriğine bağlı ışık kaynağı kullanıldı. Böylece, pompanın herhangi bir sebeple devre dışı kalması durumunda, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde bir kriter olan sürtünme kuvvetinin en son hangi tekerrür sayısına kadar sağlandığı belirlenmiş oldu.



Şekil 2.12. Toplam tur sayıcısının konumu

Düzenekteki tekerleğin kullanma talimatında 15-25 °C deki karanlık ortamda bekletilmesi ve yılda bir değiştirilmesi gerektiği belirtilmektedir [65]. Düzeneğin uzun süredir kullanılmadığı, tekerleğin açıkta düzenek üzerinde olduğu ve yapılan deneme turlarındaki aşırı aşınma şekliyle mevcut tekerleğin kauçuğunun zamana bağlı sertleşmeye maruz kaldığı anlaşıldığından yenilenmesi gerekli oldu. Tekerlek için çelik kalıp yaptırılarak ağır taşıt tekerlerine sıcak karışım kaplama yapan bir işyerinden sağlanan pişmemiş kauçukla sanayide Yan-San kauçuk sanayi A.Ş. ye dökürülen kauçuk kısım, çeşitli kuvvetli yapıştırıcılarla orijinal sert plastik jantın üzerine tespit ettirilmeye çalışıldı. Ancak deney sırasında tekerlek ısındığında yapıştırıcı koptuğundan yeni bir çelik jant imal

edilerek üzerine tekrar kauçuk kısım dökürldü ve tekerlek kullanıma hazır hale getirildi. Son haliyle tekerleğin Shore kauçuk sertlik değeri 67 olarak ölçüldü. Bu değer ağır taşıtların lastik sertlikleriyle aynıdır.

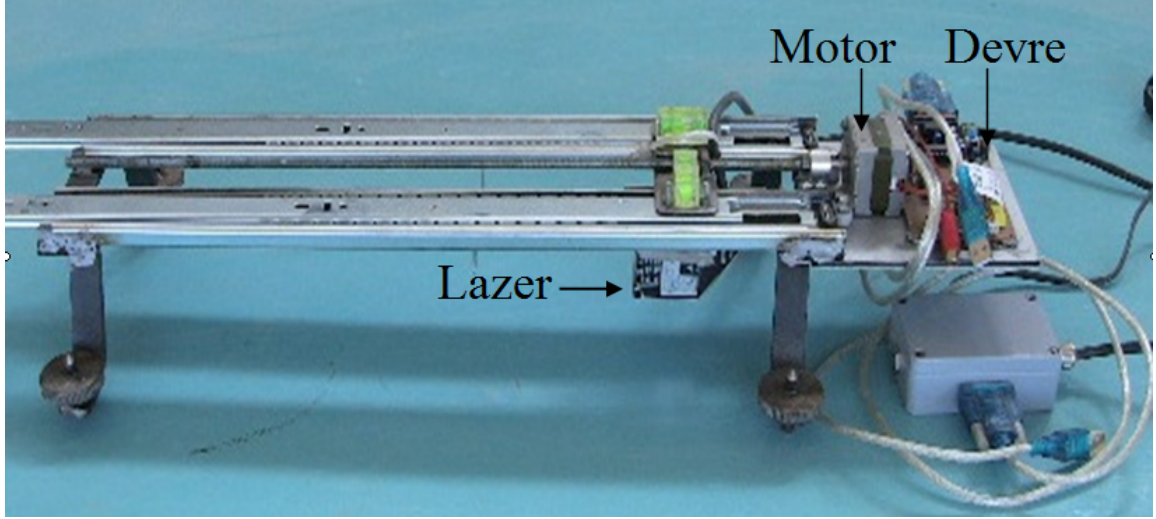


Şekil 2.13. Tekerleğin kauçuk kısmının yenilenmesi için yaptırılan kalıp ve yeni tekerlek

Tambura dizilerek dairesel bir yüzey oluşturan beton numunelerin sürtünme katsayısı ve kenardan diğer kenara boyuna çizgisel profil ölçümlerinin yapılabilmesi için bir düzenek tasarlandı. Balans işleminde kullanılan mil üzerinde iken, V şeklindeki rulmanlı yataklar üzerine yatay konumda koyulan tambur, yanal doğrultuda da sabitlenmiştir. Hem V yataklara ve hem de yan sürtünme yüzeyine küçük rulmanlar yerleştirilerek hareketler kolaylaştırılmıştır. Sürtünme katsayısı ölçümü sırasında, her iki yandaki vidalar sıkılarak tambur sabitlenmekte; üst tabla üzerine ayarlanmış konumda yerleştirilen İngiliz pandilium friction tester aletiyle de ölçümler alınmaktadır (Şekil 2.15).

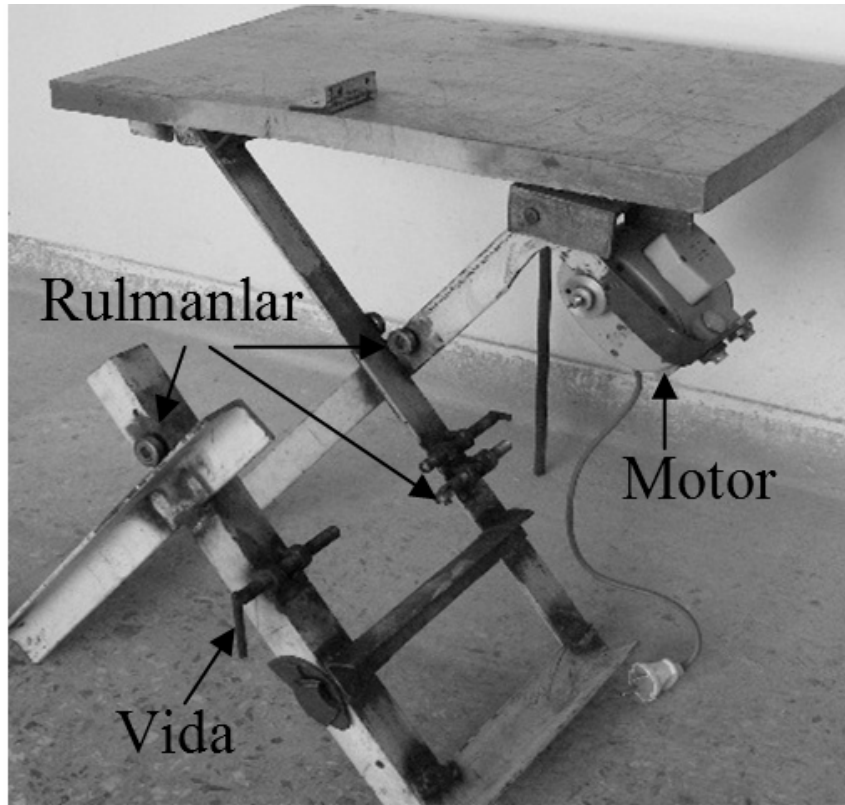
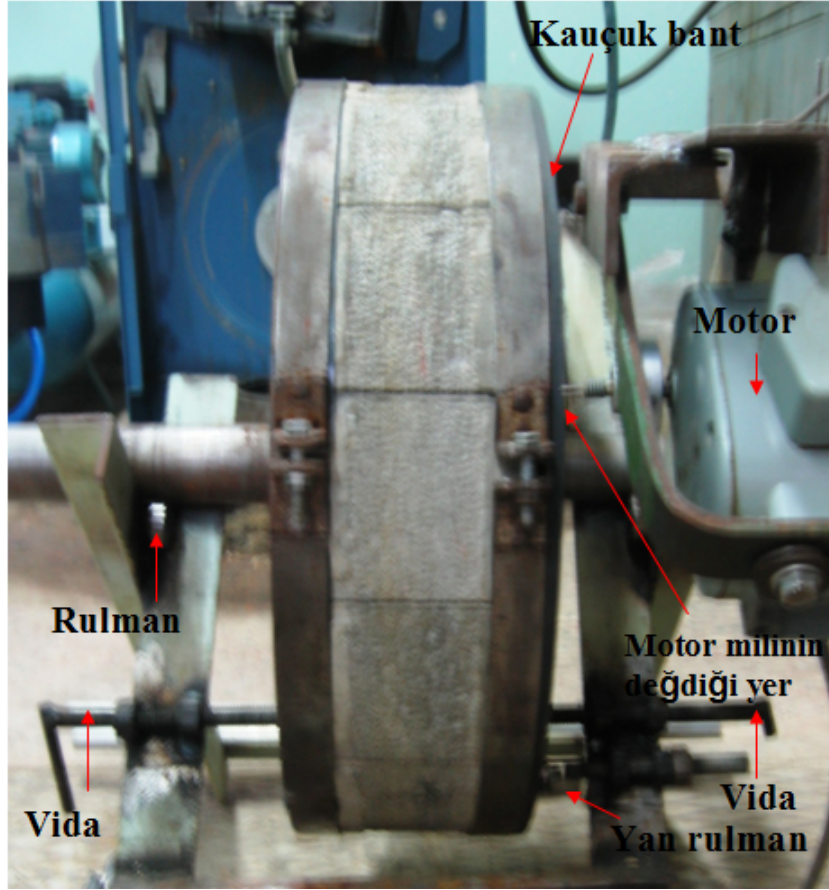
Beton numunelerin yüzey profillerini kenarındaki bir noktadan diğer kenarındaki noktaya kadarki çizgi boyunca iki boyutlu olarak mikron hassasiyetinde 0-12 mm lik bir aralıkta çıkaracak bir lazer mesafe algılayıcı KTÜ BAP biriminin desteğiyle alındı. Danışman hocamın katkısıyla bir düzeneğe yerleştirilen bu lazer algılayıcıyla hem noktasal olarak ve hem de üzerindeki bilgisayar komutlu küçük motorla ileri geri hareket ederek arazide direkt olarak yollardan ölçüm alınabilecek duruma gelindi. KTÜ Bilgisayar bölümü öğretim elemanlarından Murat EKİNCİ'nin katkısıyla da yazılımı yazıldı. Bu

sayede okunan mesafeler grafiksel olarak naklen görülmekte, profil analizleri yapılabilmektedir.



Şekil 2.14. Lazer profilometrenin görünüşü

Düzenli aralıklarda ve sabit hızda profil ölçümü alabilmek için tamburu yavaşça çevirecek düşük devirli bir küçük motor düzeneğe yerleştirilmiştir. Profil ölçümü sırasında lazer profilometre üst tablaya yerleştirilmekte, tamburu sıkı vidalar geri çekilmekte, düşük devirli motorun mili tamburun kenarı üzerine temas ettirilerek tamburun beton yüzeyi sabit düşük hızda hareket ettirilmektedir. Motor mili-tambur kenarı ara temasının iyi olması için ince kauçuk bir halkayla tambur kenarı ölçüm sırasında kaplanmaktadır. Bilgisayar bağlantısı yapılan lazer profilometreyle sürekli tek noktadan alınan ölçüm değerleri kaydedilmektedir. Bu sayede eğri numune yüzeyleri düzmüş gibi algılanmakta, hesaplama ve değerlendirmeler kolaylaşmaktadır.



Şekil 2.15. Sürtünme katsayısı ve yüzey profili ölçümleri için yapılan düzenek

2.4. Beton Özellikleri

2.4.1. Malzeme Özellikleri

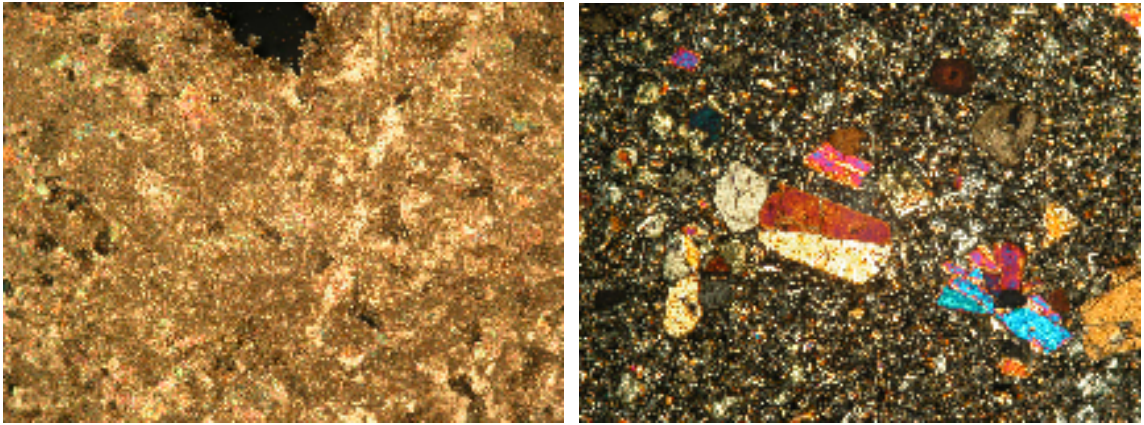
2.4.1.1. Agregası

Üretilen betonlarda Trabzon ili zigana dağı taş ocaklarından temin edilen kırmataş kaba ve ince kalker agregası, Trabzon Yomra Özdil vadisindeki bazalt taşocağından kırmataş agregası üreten Güsey Bazalt Beton Ltd.Ştd. den temin edilen kırmataş ince bazalt agregası kullanılmıştır. Malzemeler elenerek sınıflandırılmış, istenen miktarlarda alınarak karışımlara katılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerlere yakın olması nedeniyle agreganın hacimce % 57 si kaba agregası, kalan % 43 ü de ince agregası olarak belirlendi. En büyük dane çapı 16 mm alındı.

2.4.1.1.1. Mineralojik Yapı

Kalker agregasının yapılan petrografik incelemesinde; sparit çimentolu, içinde fosil parçaları ve kalsit damarcıkları bulunan biyosparit olduğu anlaşılmıştır.

Bazaltın yapılan petrografik incelemesinde; mikrolitik porfirik ve glomerafirik dokulu, plajiyoklas (An 50-68), piroksen (ojit) ve olivin minerallerinden oluştuğu ve ayrıca kloritleşme ve silisleşme mevcut olduğu görülmüştür.



Şekil 2.16. Kalker ve bazalt kökenli agregaların petrografik görüntüleri

2.4.1.1.2. Aşınma (Los Angeles) Direnci Deneyi

Yolların aşınma tabakasında kullanılacak agregaların aşınma direncini ölçmek için kullanılan standart bir yöntemdir. Bu çalışmada kaba agrega ve ince agregalara bu deney yöntemi birinci bölümün 1.10.3.3 başlığında anlatıldığı şekilde uygulanmış ve elde edilen değerler Tablo 2.1. de verilmiştir. Aşınma tabakası için istenen maks. %35 aşınma yüzdesi şartını sağlamışlardır.

Tablo 2.1. Los Angeles (LA) Aşınma testi sonuçları

	Kalker Kaba Agregası	Kalker İnce Agregası	Kalker+Bazalt İnce Agregası	Bazalt İnce Agregası
LA Aşınması (%)	28,5	33,1	27,8	21,3

2.4.1.1.3. Elek Analizi

Bu analiz, özellikle agrega olarak kullanılacak malzemelerin granülometrisinin saptanması için agrega danelerinin büyüklüğü ile her bir agrega sınıfının toplam kuru agrega ağırlığının yüzdesi olarak karışıma katılma miktarını belirlemek amacıyla yapılır.

Elek analizine tabii tutulmak üzere yeterli miktarda malzeme alınarak, iyice yıkandıktan sonra kuruması için 105°C deki etüve konulur. 24 sat sonra malzeme, karışımda kullanılacak agrega sınıflarını oluşturabilecek göz açıklığına sahip (elekler yukardan aşağıya göz açıklığı büyük olandan küçük olana doğru) elek serisinin en üstündeki eleğine konularak sarsma makinesi ile yaklaşık 10 dakika eleme işlemine tabi tutulur. Elek üzerinde bulunan malzeme miktarı, eleme sırasında tüm tanelerin rahatlıkla hareket edebileceği şekilde ayarlanmalıdır. Elek limitlerini aşan ağırlıklar eleğin deformasyona uğramasına sebep olur. Eleme işlemi sonunda her elek üzerinde kalan malzeme tartıldıktan sonra her bir elek için geçen yüzde (%P) değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır.

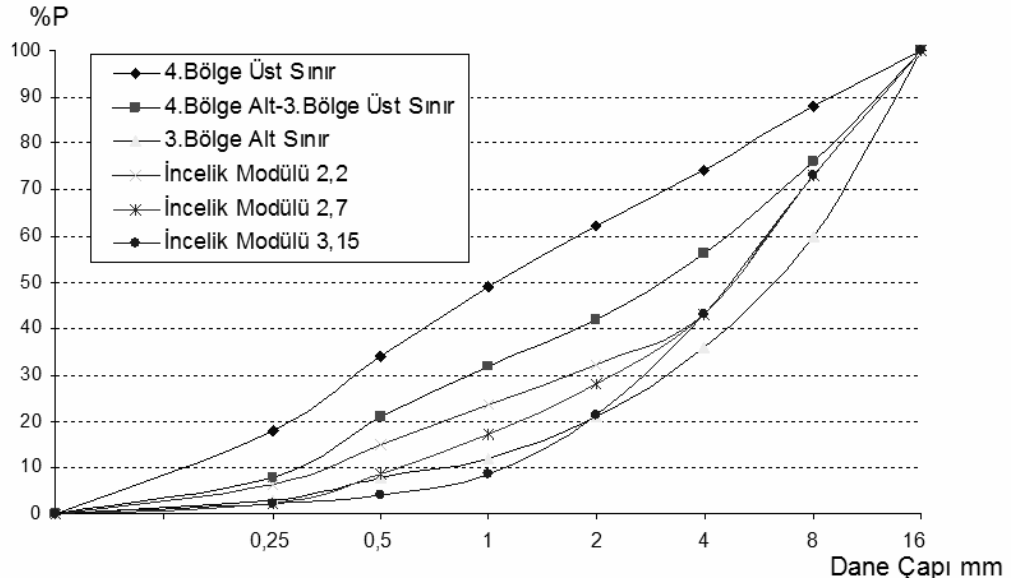
$$\%P = \frac{\text{Elekten Geçen Miktar}}{\text{Elemeye Tabi Tutulan Miktar}} \quad 2.1$$

Bu şekilde bulunan agrega granülometreleri Tablo 2.2’de verilmektedir.

Tablo 2.2. Agrega granülometreleri

ELEK AÇIKLIĞI (mm)	ŞARTNAME SINIRLARI (TS 706)				KULLANILAN		
	% GEÇEN				% GEÇEN		
	4. Bölge		3. Bölge		A	B	C
	Üst	Alt	Üst	Alt			
16	100	100	100	100	100	100	
8	88	76	60	73	73	73	
4	74	56	36	41,7	41,7	41,7	
2	62	42	21	31,27	27,10	20,85	
1	49	32	12	22,93	16,68	8,34	
0,5	34	21	8	14,60	8,34	4,17	
0,25	18	8	3	6,25	2,09	2,09	
Tava	0	0	0	0	0	0	
İncelik modülü				2.2	2.7	3.15	

Bu agrega granülometrelerinin eğrileri Şekil 2.17’de verilmektedir.



Şekil 2.17. Beton agregası referans eğrileri ve karışım granülometreleri

İncelik Modülü, agreganın İncelik veya kalınlığını ifade eden bir terim olup, delik açıklığı birbirinin iki misli artan elekler üzerinde kalan malzemenin kümülatif yüzdeler toplamının yüze bölünmesiyle elde edilen rakamdır. İncelik modülü hiçbir zaman granülometriyi ifade etmez, zira çeşitli agregaların granülometrelerinden elde edilecek İncelik modülleri aynı değeri verebilir.

2.4.1.1.4. Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri

Bu deney gerek karışım hesapları gerekse agreganın fiziksel özelliklerinin ve agreganın porozluğunun tayini için yapılmaktadır. Agregada ince ve iri olarak iki sınıfa ayrılır. İnce agregada en büyük tane büyüklüğü 4 mm'dir. Bu iki grup üzerinde deney ayrı ayrı uygulanır.

2.4.1.1.4.1. İnce Agregada Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranı (TS 3526)

Deneyin amacı, ince taneli agregaların birim hacimdeki ağırlıklarını tespit etmektir. Agreganın birim hacimdeki, ağırlığının çok veya az olması betonun özellikleri ve kullanma alanlarının seçiminde önemli bir unsurdur. Deney için malzemeyi tam temsil eden deney numunesi çeyrekleme yöntemi ile Tablo 2.3. de belirtilen miktar kadar alınır. Alınan numune tam doygun hale gelinceye kadar en az 24 saat su içinde bekletilir.

Tablo 2.3. İnce Agreganın Birim Hacim Ağırlığı İçin Numune Miktarı

En Büyük Tane Büyüklüğü (mm)	0,25	0,5	1	2	4
Deney Numunesi Miktarı (kg)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Suya doygun hale gelmiş numune, ince taneleri kaybolmayacak şekilde süzülür ve doygun kuru yüzey (DKY) haline getirilir. DKY malzemedden yaklaşık 400 gr kadar alınır ve bu değer M_2 olarak kaydedilir. Daha sonra malzeme etüve konularak etüv kurusu haline getirilir. Oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur. Soğuyan numune cam ölçü kaplarına koyulur ve birlikte tartılır. Ölçü kabının daha önce saptanmış olan darası bu değerden çıkarılır ve numunenin kuru ağırlığı M_1 olarak kaydedilir. Ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile yarıya kadar doldurulur ve vakuma bağlanarak içindeki hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Bir saat bekletildikten sonra ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile 500 ml işaret çizgisine kadar doldurulur ve tartılır (M_3). Boş ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile 500 ml işaret çizgisine kadar doldurulur ve tartılır (M_4). İnce agreganın kuru birim hacim ağırlığı, DKY birim hacim ağırlığı, görünen birim hacim ağırlığı aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanır. Deney üç

numune için üç defa tekrar edilir ve deneylerin sonuçları arasındaki fark %2 den küçük ise üç deneyin sonuçlarının ortalaması ince agreganın birim hacim ağırlığı olarak alınır (35).

M_0 : Malzemenin doğal ağırlığı

M_1 : Malzemenin kuru ağırlığı (etüv kurusu)

M_2 : Malzemenin DKY ağırlığı

M_3 : Ölçü kabı + su + Numune ağırlığı

M_4 : 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı

ρ_{iK} : İnce agreganın kuru birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iK} = M_1 / (M_2 + M_4 - M_3) \quad 2.2.$$

ρ_{iD} : İnce agreganın DKY birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iD} = M_2 / (M_2 + M_4 - M_3) \quad 2.3.$$

ρ_{iG} : İnce agreganın görünen birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iG} = M_1 / (M_1 + M_4 - M_3) \quad 2.4.$$

m_{es} : İnce agreganın su emme oranı,

$$m_{es} = (M_2 - M_1) / M_1 \quad 2.5.$$

m_{ds} : İnce agreganın doğal su oranı,

$$m_{ds} = (M_0 - M_1) / M_1 \quad 2.6.$$

Deney, her farklı kökenli agregada ayrı ayrı üç numune için yapılmış, sonra ortalama değerleri alınmıştır.

Kalker kökenli ince agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi, formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak:

Kuru Birim Hacim Ağırlığı,	= 2,57 gr/cm ³
DKY Birim Hacim Ağırlığı,	= 2,63 gr/cm ³
Görünen Birim Hacim Ağırlığı,	= 2,58 gr/cm ³
Su Emme Oranı,	= 0,0233
Doğal su Oranı	= 0,004

olarak belirlenmiştir.

Kalker ve Bazalt karışık ince agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi, formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak:

Kuru Birim Hacim Ağırlığı	= 2,69 gr/cm ³
DKY Birim Hacim Ağırlığı	= 2,75 gr/cm ³
Görünen Birim Hacim Ağırlığı	= 2,72 gr/cm ³
Su Emme Oranı	= 0,0206
Doğal Su Oranı	= 0,0120

olarak belirlenmiştir.

Bazalt kökenli ince agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak:

Kuru Birim Hacim Ağırlığı	= 2,98 gr/cm ³
DKY Birim Hacim Ağırlığı	= 3,02 gr/cm ³
Görünen Birim Hacim Ağırlığı	= 3,01 gr/cm ³
Su Emme Oranı	= 0,0145
Doğal Su Oranı	= 0,0103

olarak belirlenmiştir.

2.4.1.1.4.1.2. İri Agreganın Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini

Deneyin amacı, iri daneli agregaların birim hacimdeki ağırlıklarını tespit etmektir. Agreganın birim hacimdeki, ağırlığının miktarının bilinmesi betonun kullanım alanlarını tespit etmede önemli unsurlardan birisidir. Deney için malzemeyi tam temsil eden deney numunesi Tablo 2.4. de belirtilen miktarın karışımından çeyrekleme yöntemi ile önerilen miktarda alınır (M_0).

Tablo 2.4. İri Agreganın Birim Hacim Ağırlığı İçin Numune Miktarı

En Büyük Dane Büyüklüğü (mm)	4	8	16
Deney Numunesi Miktarı (kg)	0,8	1,5	2

Alınan numune tam doygun hale gelinceye kadar en az 24 saat su içinde bekletilir. Suyu doygun hale gelmiş numune, ince taneleri kaybolmayacak şekilde süzülür ve doygun kuru yüzey (DKY) haline getirilir. DKY malzemedan bir miktar alınır ve bu değer M_2 olarak kaydedilir. Daha sonra malzeme etüve konularak etüv kurusu haline getirilir. Oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur ve tartılır (M_1). Numune ölçü kabına konularak yaklaşık 20°C su ile doldurulur, ağzı kapatılır. Bu işlem sırasında kapak kenarlarında hava kabarcığı kalmamasına özen gösterilir. Ölçü kabı, numune ve suyun ağırlıkları tartılır (M_3). Boş ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile doldurulur ve yine kabarcık kalmayacak şekilde kapağı kapatılarak tartılır (M_4). İri agreganın kuru birim hacim ağırlığı, DKY birim hacim ağırlığı, görünen birim hacim ağırlığı ince agreganın için kullandığımız yukarıdaki bağıntılar ile hesaplanır. Deney üç numune için üç defa tekrar edilir ve deneylerin sonuçları arasındaki fark %2 den küçük ise üç deneyin sonuçlarının ortalaması iri agreganın birim hacim ağırlığı olarak alınır.

Deney üç numune için ayrı ayrı yapılmıştır. İri agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak:

$$\text{Kuru Birim Hacim Ağırlığı} = 2,70 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{DKY Birim Hacim Ağırlığı} = 2,72 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Görünen Birim Hacim Ağırlığı} = 2,702 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Su Emme Oranı} = 0,0074$$

$$\text{Doğal Su Oranı} = 0,001$$

olarak belirlenmiştir.

2.4.1.2. Çimento

Trabzon Aşkale Çimento Fabrikasından alınan PÇ 42,5 normal portland çimentosu kullanılmıştır. PÇ 42,5'in Birim Hacim Ağırlığı $\gamma_c : 3,10 \text{ gr/cm}^3$ tür.

2.4.2. Taze Beton Bileşimi Tasarımı

Yapılan çalışmada, su / çimento oranı düşük olduğundan ve kalıp üzerindeki 15 adet bölmeye üçer adet numunesi koyulacak beş karışımın da peş peşe karılıp yerleştirilmesi gerektiğinden, priz geciktiricili Sika marka Sikament R4 süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanıldı. Literatürdeki çalışmalarda kullanılan değerlere yakın olması nedeniyle agreganın hacimce % 57 si kaba agregaya, kalan % 43 ü de ince agregaya olarak alındı.

Betonun dozu 400, su/çimento oranı 0,40, hava yüzdesi 2 olarak seçildi. Yapılan deneme karışımları sonucunda süper akışkanlaştırıcı miktarı çimento miktarının ağırlıkça %1 inin uygun olduğu görüldü. 1m^3 beton harcı için yapılan hesaplar aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Hava Miktarı (H)} & : 20 \text{ lt} \\ \text{Çimento Miktarı (C)} & : 400 \text{ kg} \\ \text{Su Miktarı (W)} & = C \times (W / C) \\ & = 400 \times 0,40 \\ & = 160 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{Agrega Hacmi (V}_{Ag}) & = 1000 - (C / \gamma_c + W + H) \\ & = 1000 - (400 / 3,10 + 160 + 20) \\ & = 690,97 \text{ lt} \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \text{İri Agreganın Hacimce Yüzdesi} & : 57 \\ \text{İri Agregaya Ağırlığı} & = 690,97 \times 0,57 \times 2,72 \\ & = 1071,29 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Alınacak İri Agreganın Ağırlığı, } A_{\text{iri}} &= A \times (1 + DN) / (1 + DS) & (2.9) \\
&= 1071,29 \times (1,001) / (1,0074) \\
&= 1064,48 \text{ kg}
\end{aligned}$$

İri agregaya katılacak

$$\text{doyma suyu miktarı} = 1071,29 - 1064,48 = 6,80 \text{ kg}$$

$$\text{İnce Agreganın Hacimce Yüzdesi} : 0,43$$

$$\text{İnce Agreganın Ağırlığı} = 2,63 \cdot 0,43 \cdot 690,97 = 781,41 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
\text{Alınacak kalker ince agreganın ağırlığı} &= 781,41 \times (1 + DN) / (1 + DS) \\
&= 781,41 \times (1,0013) / (1,0225) \\
&= 765,21 \text{ kg}
\end{aligned}$$

İnce agregaya katılacak

$$\begin{aligned}
\text{doyma suyu miktarı} &= 781,41 - 765,21 \\
&= 16,20 \text{ kg}
\end{aligned}$$

1 m³ Kalker İnce Agregalı Beton Karışımları İçin:

$$\Sigma \text{ İri Agreganın Ağırlığı} = 1064,48 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Kalker İnce Agreganın Ağırlığı} = 765,21 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
\text{Doyma Suyu} &= 6,80 + 16,20 \\
&= 23,0 \text{ kg}
\end{aligned}$$

$$\Sigma \text{ Karma Suyu} = 183 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Çimento Miktarı} = 400 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
\Sigma \text{ Akışkanlaştırıcı} &= 400 \times 0,01 \\
&= 4 \text{ kg}
\end{aligned}$$

%50 kalker-%50 bazalt ince agregalı beton karışımları için ve bazalt ince agregalı beton karışımları için de yukarıdaki hesaplama adımları uygulanmış, sonuçlar toplu olarak Tablo 2.5 de verilmiştir.

2.4.3. Karışım Oranları

Karışımındaki agreganın hacimce %57'si kaba agregadır, %43'ü ince agregadan oluşturulmuştur. Kaba agregası kırmataş kalker olmak üzere kalker, bazalt ve kalker-bazalt

karışımı şeklinde üç farklı mineral kökünde ince agregaya kullanıldı. Ayrıca bir kalker-bazalt karışımı yapılmasının amacı, farklı mineral sertliğe sahip ince agregalardan oluşan karışımlardaki aşınmanın üniform olmayacağı ve dolayısıyla sürtünme katsayısı performansının daha iyi olabileceği düşüncesinin incelenmesidir.. Her bir ince agregaya için üç incelik modülünde üç granülometri seçildi. Çimento dozajı, su/çimento oranı ve kaba agregaya miktarı değerleri sabit, sadece ince agreganın mineralojik yapısı ve incelik modülleri farklı olan dokuz karışım hazırlandı. Karışımlarda şehir şebeke suyu kullanıldı.

Tablo 2.5. 1m³ beton harcı için deney karışımlarındaki oranlar

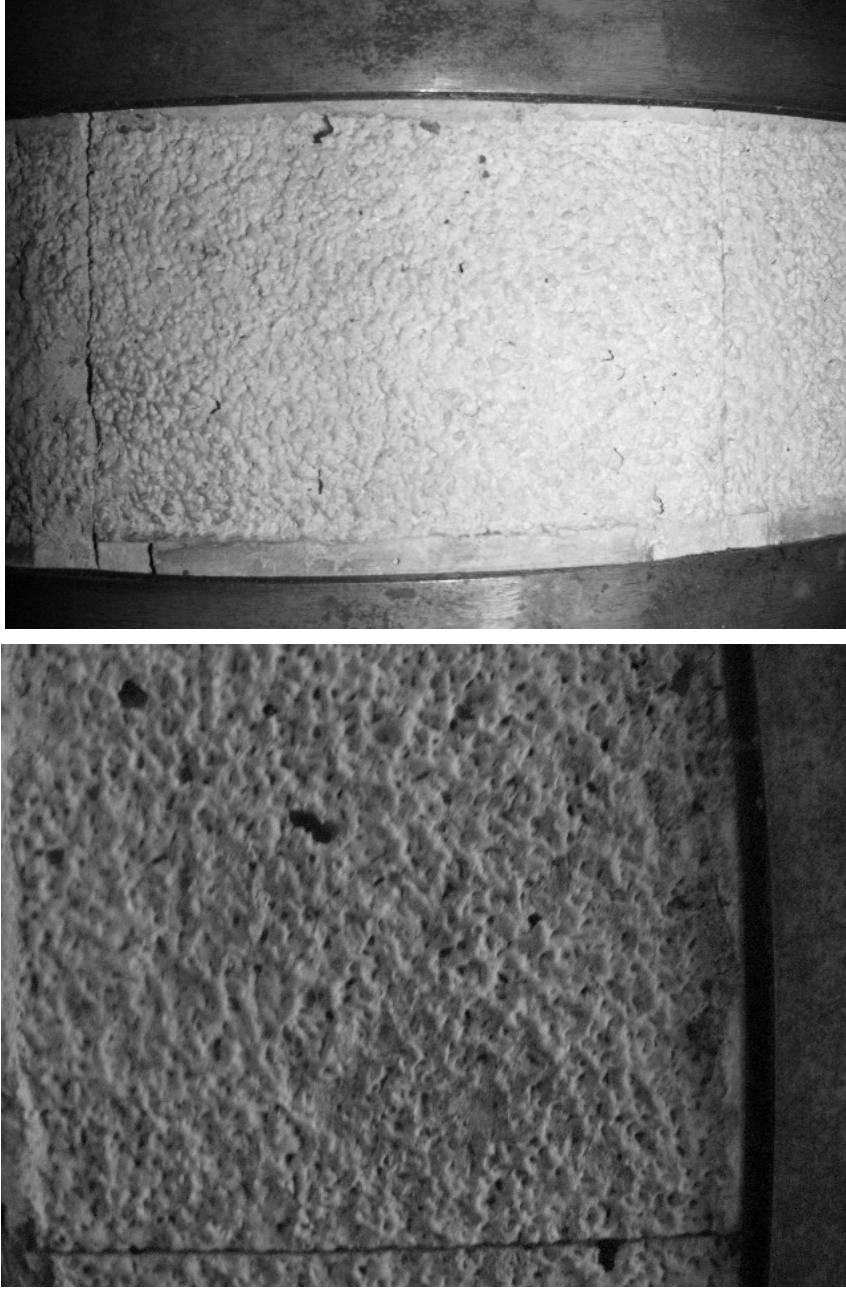
İnce Agregaya Kökeni	Karışım no	Çimento (kg)	S/Ç oranı	Su (kg)	Akışkanlaştırıcı (kg)	Kaba Agregaya (kg)	İnce Agregaya (kg)	Slump (cm)
Kalker	K1	400	0.40	183	4	1064,48	765,21	2,5
	K2	400	0.40	183	4	1064,48	765,21	3
	K3	400	0.40	183	4	1064,48	765,21	5
Kalker+Bazalt	K4	400	0.40	174	4	1064,48	810,19	2,5
	K5	400	0.40	174	4	1064,48	810,19	3
	K6	400	0.40	174	4	1064,48	810,19	5
Bazalt	K7	400	0.40	171	4	1064,48	893,58	2,5
	K8	400	0.40	171	4	1064,48	893,58	3
	K9	400	0.40	171	4	1064,48	893,58	4

2.4.4. Kür Şartları

Yukardaki bilgilere göre karışımı yapıp basınç, eğilmede çekme ve aşınma-pürüzlülük kaybı deneyleri için ilgili kalıplara yerleştirilen beton numuneler, bir gün sonra kalıplardan çıkartılarak 20°C deki su içinde 28 gün bekletilmişlerdir.

2.4.5. Yüzey Özellikleri

Pürüzlülük kaybı deneyinde kullanılacak beton numuneler için yapılmış olan kalıpların iç yüzeylerine kum yama yöntemiyle belirlenen ortalama makro doku derinliği 0.8 mm olan rulo bez zımpara kağıdı şerit halinde yapıştırılmıştı. Karışım harçlarının kalıba yerleştirilmesinden bir gün sonra kalıp açıldığında ortaya çıkan yüzey görüntüsü aşağıda (Şekil 2.18) verilmiştir. Sand-blasting (kum çarptırma) tekniğiyle yüzeyi şekillendirilmiş yol yüzeyi gibi bir görüntü elde edilmiştir.



Şekil 2.18. Beton numunelerin yüzey görüntüsü

2.5. Gerçekleştirilen Deneyler

2.5.1. Taze Beton Karılması

Beton karışımların hazırlanmasında Yapı ve Malzeme laboratuvarında bulunan 50 lt kapasiteli bir beton mikseri kullanılmıştır.. Her bir karışım için 35 lt lik beton harcı hazırlanmıştır. Betoniyer önce kuru beton parçalardan arındırılmış, sonra basınçlı suyla

yıkanıp iyice süzmesi beklenmiştir. Karışım yapılırken önce iri agreganın yarısı, sonra ince agrega ve çimento ve sonra kalan iri agrega katılmış ve karışım üniform oluncaya kadar 1,5 dakika beklenmiştir. Sonra suyun yarısı yavaş yavaş ilave edilmiş, priz geciktiricili süper akışkanlaştırıcı katılmış kalan yarısı daha sonra katılmış, 2 dakika karıştırılmıştır. El arabasının teknesine alınan karışım ilgili deney kalıplarına segregasyona uğratılmadan yerleştirilmiş, sarsma tablası üzerine koyulan kalıplar, beton yüzeyine çıkan kabarcıklar azalana kadar sarsılarak betonun yerleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 2.19. Kalıplara yerleştirilen aşınma, basınç ve eğilmede çekme deney numuneleri

2.5.2. Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Beton dökümünden bir gün sonra basınçlı hava zoruyla kalıplarından çıkartılan ve 28 gün suda kür edilen 15x15x15 cm ölçülerindeki beton küp numuneler, sudan çıkartılıp bir gün de açık havada bekletildikten sonra Yapı Malzemesi laboratuarındaki kırıcı pres kullanılarak belirli bir hızda yüklemeye tabi tutularak kırılmış, basınç dayanımları ölçülmüştür.

2.5.3. Eğilmede Çekme Dayanımının Belirlenmesi

10x10x40 cm ölçülerindeki kalıplara, hazırlanan karışımlardan yerleştirilerek elde edilen beton numuneler Yapı Malzemesi laboratuvarındaki tek noktadan yükleme yapan bilgisayar destekli eğilmede çekme test düzeneğinde kırılarak karışımların eğilmede çekme dayanımları bulunmuştur.

2.5.4. Yüzey Aşınma Direncinin Belirlenmesi

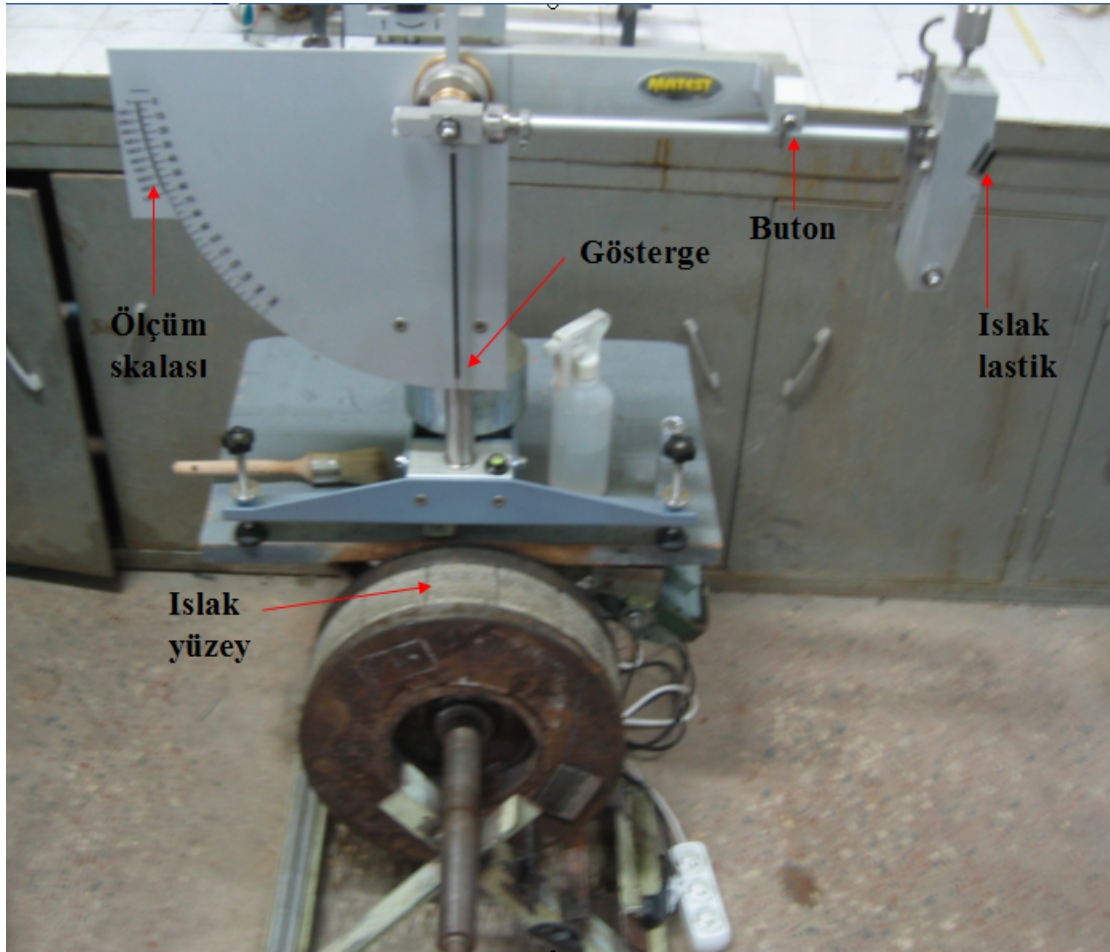
Tambura yerleştirilmiş beton numunelerden başlangıç (0 geçiş) sürtünme katsayısı, profil ve temas noktaları ölçümleri alındıktan sonra, temas alanına maksimum 10 kg/cm² düşey basınç uygulayacak şekilde koluna ağırlık asılan ve 1 kg/cm² ortalama sürtünme gerilmesi uygulayacak şekilde yağ pompa vanası ayarlanan aşınma düzeneğinin ve osiloskopun kablo bağlantıları yapıldı. Su döngüsü başlatıldı. İlk çalıştırmada torkmetrenin fazla zorlanmaması için düşey yükleme başlangıçta yapılmadı. Alet çalıştırıldı. Sonrasında düşey yük kolu indirilerek tekerlek beton numuneler üzerine bırakıldı. Tekerleğin herhangi bir numune üzerindeki bir noktadan toplam geçiş sayısı ya da diğer ifadeyle tamburun toplam tur sayısı istenen değeri buluncaya kadar çalıştırıldı. 1000, 5000, 25000 ve 100000 toplam geçiş sayılarında sistem durdurularak tambur üzerindeki numunelere başlangıçta yapılan ölçümler tatbik edildi. Tekerlek kauçuğunun normal yol koşullarına göre çok daha kısa zaman diliminde hızlı yüklenip boşalmasından kaynaklanan fazla ısınmasını engellemek için tekerlek baskı yüzeyine, kompresörden gelen basınçlı hava yakın mesafeden püskürtüldü. Aşındırma sırasında tekerlek-beton teması ara yüzeyine aşınmayı etkileyecek su ya da aşındırıcı toz verilmedi. Her beş bin de bir sistem durdurularak lastiğin soğuması beklenip tekrar çalıştırıldı.

2.5.5. Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında imal edilen yeni kalıplara beton yerleştirilmesinden en fazla bir gün sonra kalıbın dışı, vidaları açılıp çıkartıldı. Betonda varsa yapışmış zımpara tozları sivri uçlu bir aletle yüzeye zarar vermeden temizlendi. Halka şeklinde birbirini tamamlayan toplam on beş adet numune teker teker kalıp dışına alınıp kür için suya kondu.

28 gün sonra sudan çıkarılıp bir gün de açık havada bekletildikten sonra aşınma deney aletinin tamburuna belirli sırada yerleştirildi. Birbirlerine göre yükseklik farkı yapacak şekilde yerlerinden oynamalarına müsaade etmeden tamburun her iki kenarından gergilerle kademeli olarak sıkıştırılıp sabitlendiler.

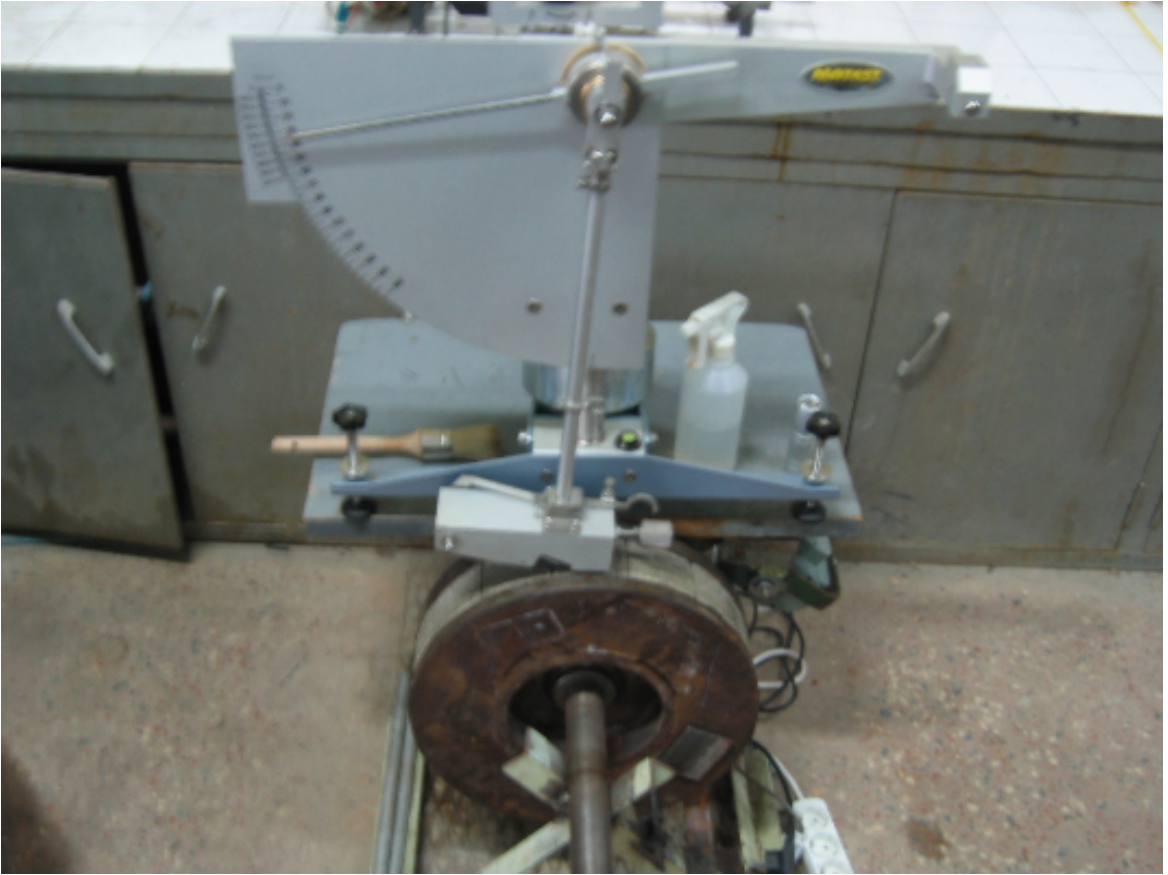
Ağırlık balans ayarı da yapıldıktan sonra numuneli tambur çalışma kapsamında imal edilen sürtünme ve profil ölçüm düzeneğine yerleştirildi. Düzenek tablası normal konumuna alınıp üzerine kalibrasyonu yeni yapılmış İngiliz sürtünme pandülü ölçüm aleti yerleştirildi. Sürtünme pandülünün salınım yönü ile tambur üzerindeki numunelerin boyuna yönünün paralel olmasına, alet üzerindeki düzecin tam düşeyi göstermesine, pandül salınım yaptığında lastik takozun aşınan beton numune yüzeyinin ortasına sürtmesine ve aletin ölçüm sırasında sarsılmamasına [36] dikkat edildi. Sonra tambur iki taraftan vidalarla sıkıştırılıp sabitlendi.



Şekil 2.20. Sürtünme katsayısı ölçümünde düzeneğin durumu

Ucuna lastik sürtünme takozu takılı pandül numune üzerine getirildi. İlk değdiği noktayla son değdiği nokta arasındaki sürtünme boyu, alet üzerindeki ayar vidası yardımıyla yukarı aşağı oynanarak, yatayda 76 mm olacak şekilde kumpasla llerek ve yakın ışık kaynağıyla iyice görülerek hassas bir şekilde ayarlandı.

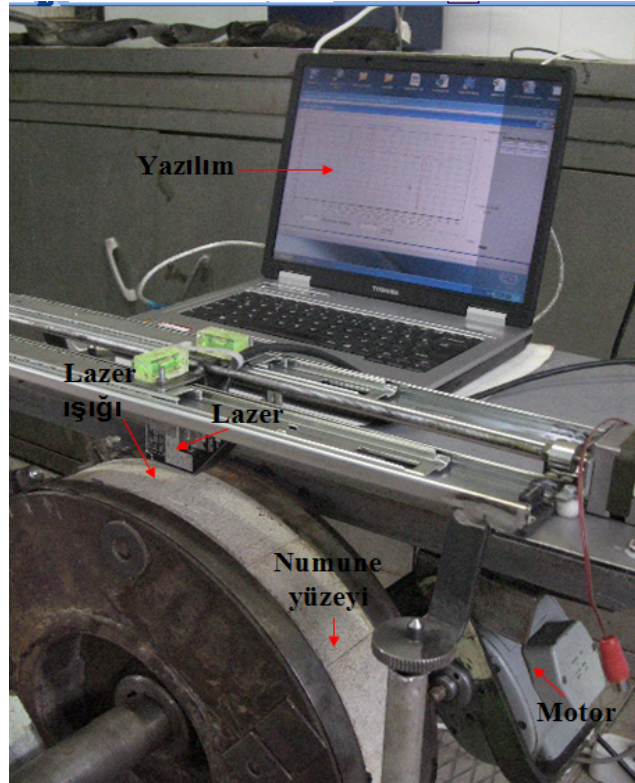
Daha önceden ıslatılıp nemlendirilmiş beton numune yüzeyleri ve lastik takoz bol suyla tekrar iyice ıslatıldı. Sürtünme kaybını gösterecek ibre dikeydeki sıfır konumuna getirildi. Sonra yukarıdaki pozisyonunda bekleyen pandül, butonuna basılarak serbest bırakıldı ve salınım yapıp geri döndüğünde numune yüzeyine değmeden elle tutuldu. İbrenin gösterdiği kkk yazılı F skaladaki değer, tamsayı olarak kaydedildi. Bu şekilde her bir numune için peş peşe her seferinde ıslatma işlemi yapılarak beş salınım yapıldı ve son üç okumanın ortalaması alınarak [37] tabloya kaydedildi.



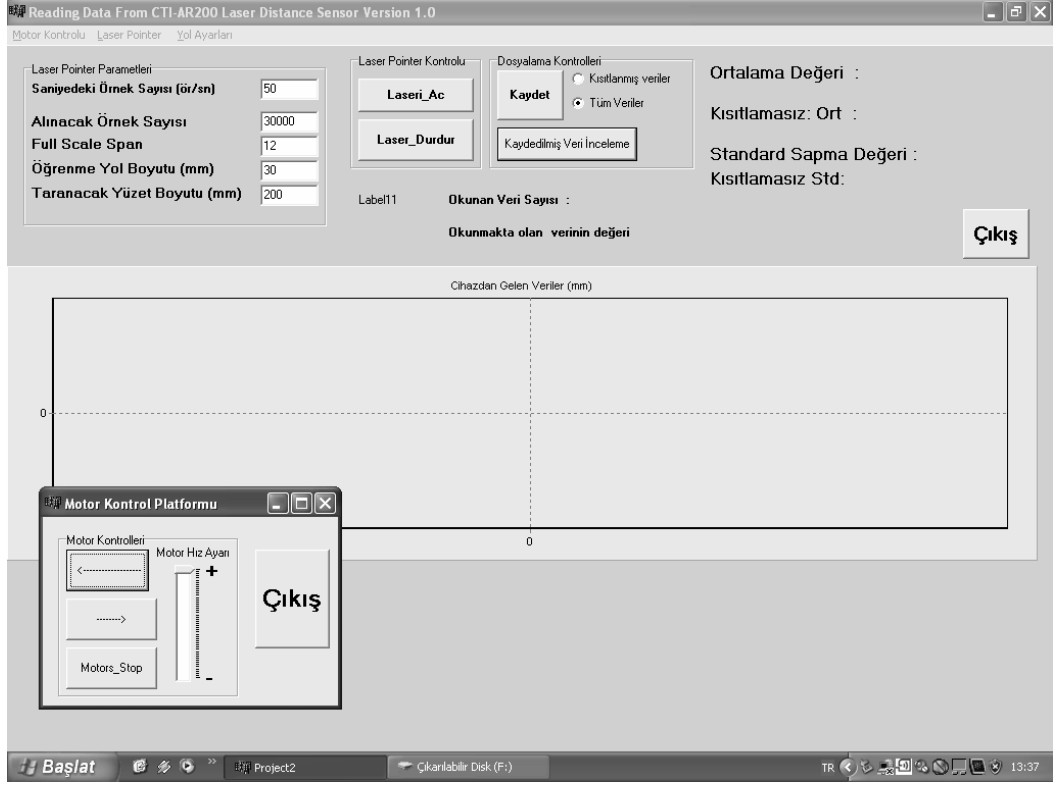
şekil 2.21. Numunelerden sürtünme katsayısı ölümü alınması.

2.5.6. Yüzey Profil Derinliğinin Belirlenmesi

Sürtünme katsayısı ölçümleri alındıktan sonra düzenekteki tamburu sabitleyici vidalar geri çekildi. Düşeyde serbest bırakılan düşük devirli motorun mili kauçuk halka geçirilmiş tambur kenarına temas ettirildi. Lazer profilometre tabla üzerine yerleştirildi ve lazer ışığı, ölçüm alımında sürekli başlangıç noktası olarak kullanılacak olan işaretli yere getirildi. Burası yüzeyin boyuna orta eksenini üzerinde kenara yakın, aşınmadan etkilenmeyecek çok küçük ince bir çukur ya da tepedir. Bilgisayar açılıp lazer profilometrenin yazılımı hazır konuma getirildi ve motorla beraber aynı anda çalıştırıldı. Bu sırada yüzeyin iki boyutlu profili bilgisayar monitöründen canlı olarak takip edildi (Şekil 2.22). Lazer ışığı numunenin bitişiğindeki diğer numuneyle olan ara boşluğuna geldiğinde hem motor ve hem de yazılım durduruldu. Sonuçlar kaydedildi. Kaldığı yerden tekrar lazer ve motor hareket ettirilerek aynı şekilde diğer numunelere ait veriler elde edilip kaydedildi. Kullanılan yazılıma ait ana sayfa görüntüsü (Şekil 2.23) ve elde edilen yüzey profilli görüntüleri (Şekil 2.24 ve Şekil 2.25) aşağıda verilmektedir.



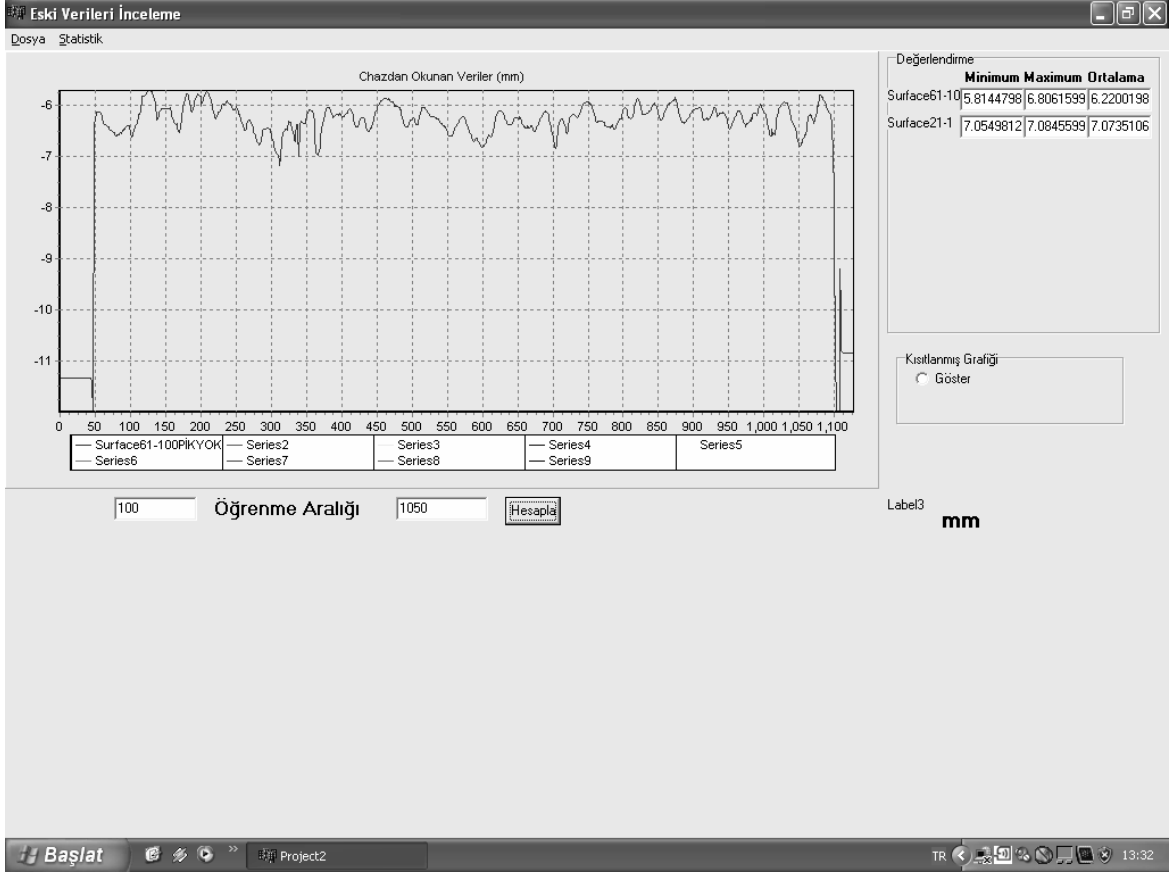
Şekil 2.22. Lazer profilometreyle numunelerden yüzey profili ölçümü alınması



Şekil 2.23. Lazer profilometre yazılımının ilk açılış ekran görüntüsü



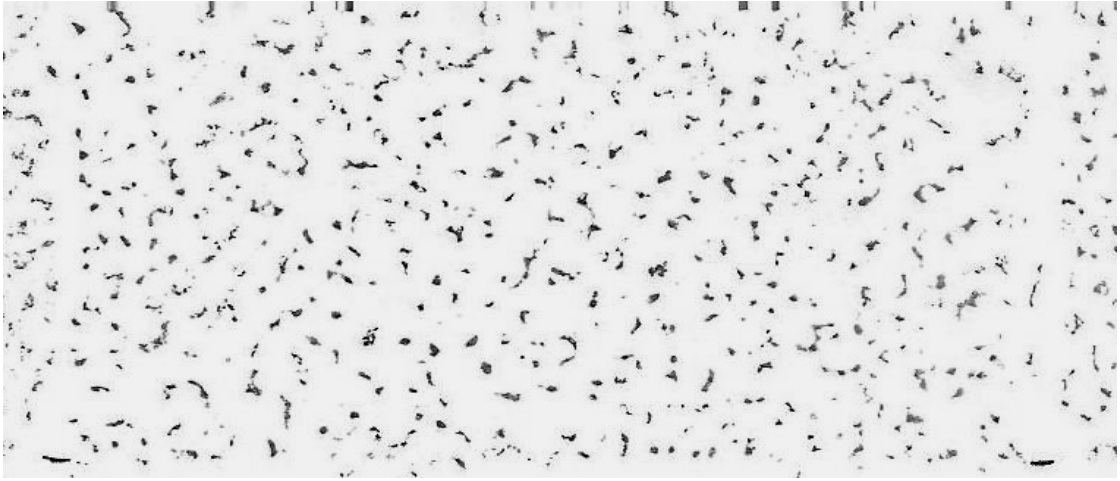
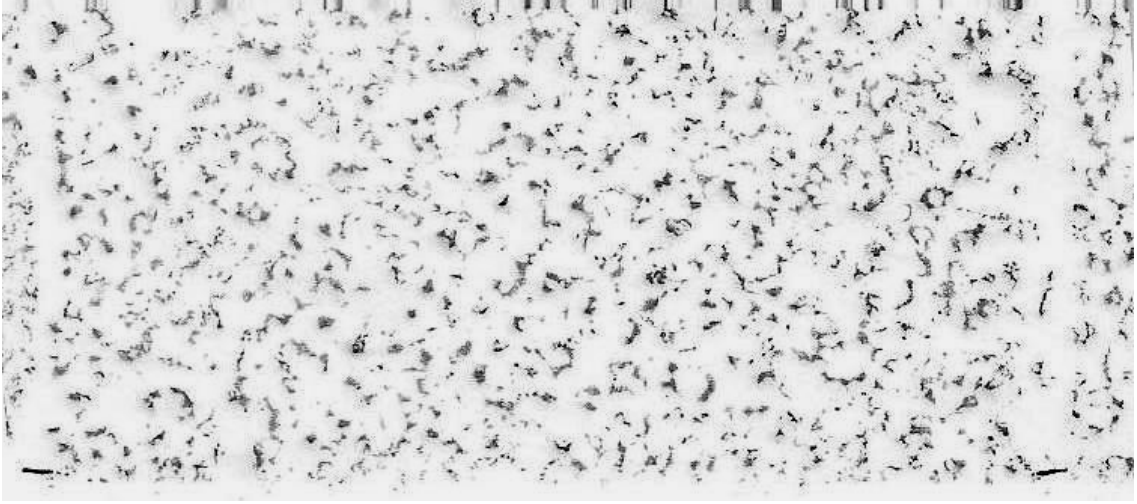
Şekil 2.24. Yazılımın profil alındıktan sonraki ekran görüntüsü



Şekil 2.25. Bir yüzey profilinin düzeltilmiş piksiz görüntüsü

2.5.7. Temas Noktaları Alanlarının Görüntü Tekniğiyle Belirlenmesi

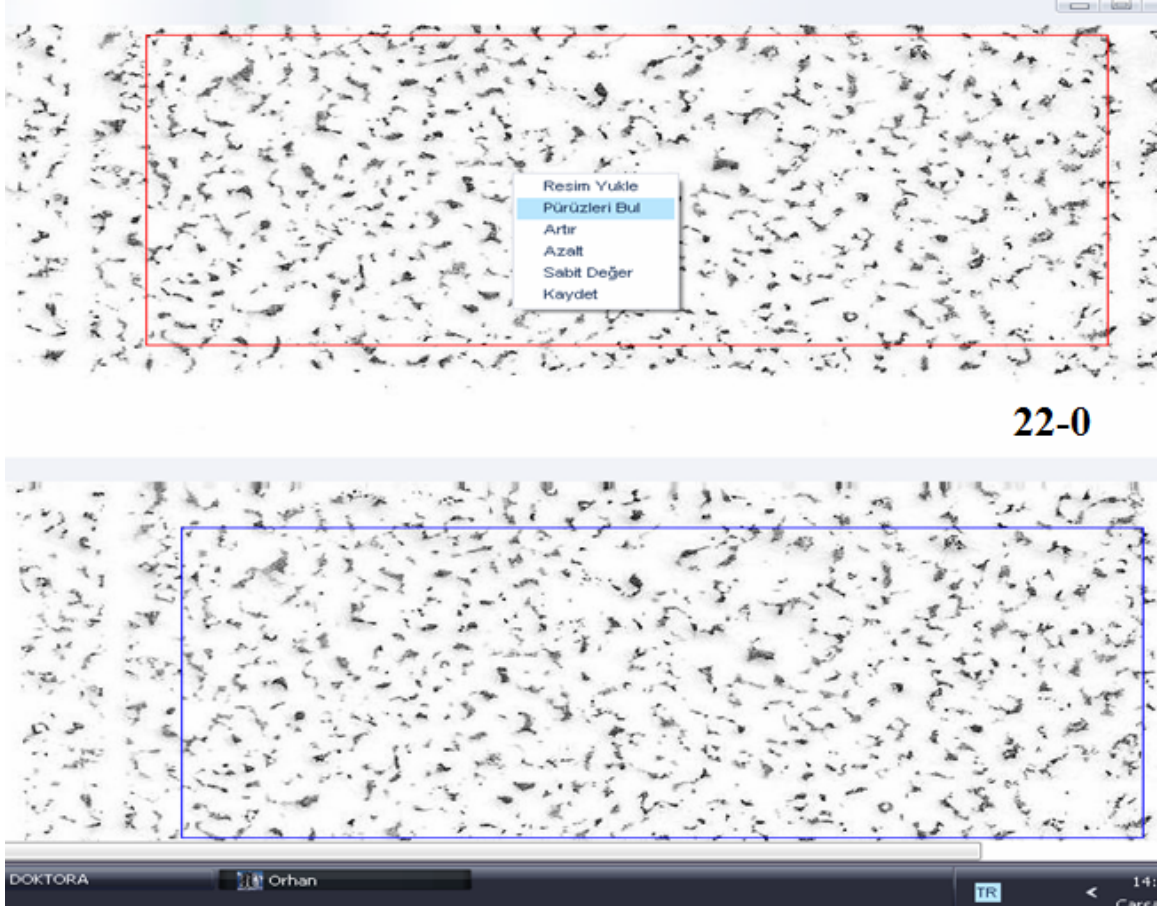
Tekrarlayan tekerlek düşey ve yatay sürtünme kuvvetleri etkisinde yüzeydeki çıkıntılarda aşınmalar meydana geleceğinden temas edilen kısımlardaki baskı alanları da değişecektir. Bu değişimleri incelemek için danışman hocamın teşvikiyle karbon kâğıtlı baskı metodu kullanıldı. Tambur aşınma deney düzeneğinde normal yerinde iken, tekerlek numune başlangıcına yakın konuma getirilip tekerlek-beton numune ara yüzüne, altta hassas karbon kâğıdı üstte normal beyaz kâğıt olacak şekilde kâğıtlar yerleştirilip, tambur yavaşça elle çevrilerek tekerlek numune üzerinden geçirildi. Bu ölçüm, beyaz kâğıdın üzerine röntgende kullanılan esnek röntgenfilmden koyularak tekrar edilmiştir. Kâğıtta çıkan görüntü tipleri aşağıdaki (Şekil 2.26) gibi olmaktadır.



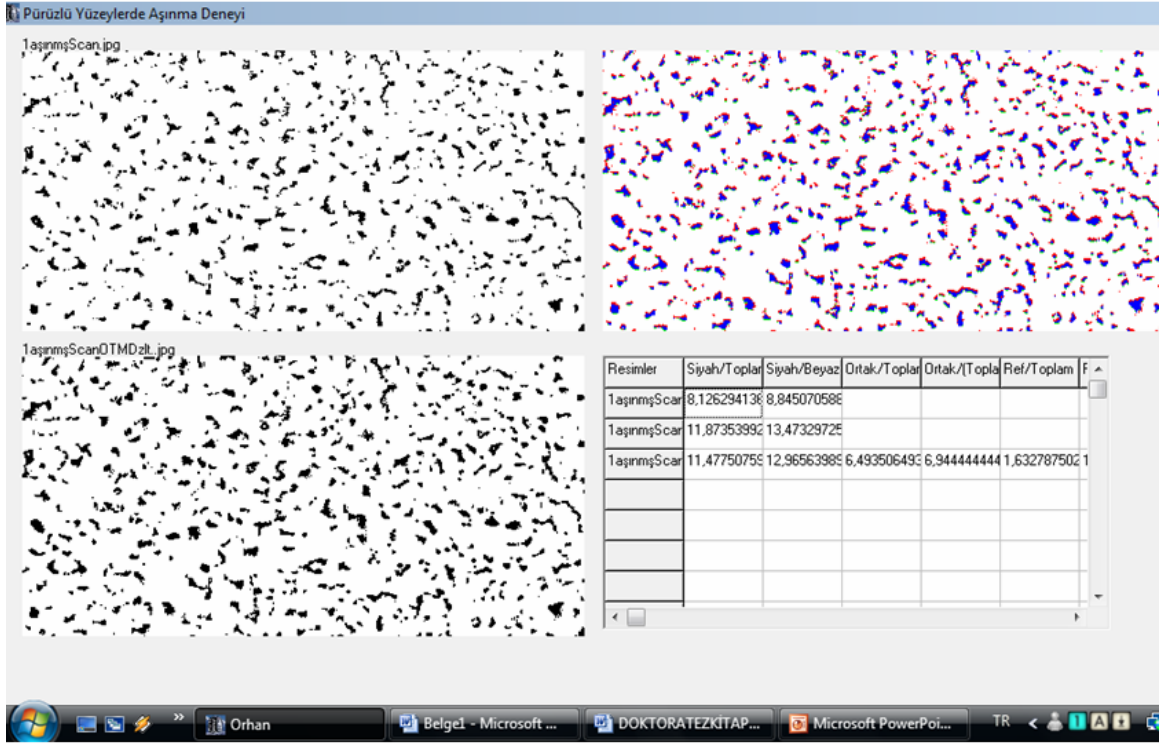
Şekil 2.26. Aynı numuneye ait temas noktalarının röntgen filmsiz ve filmli görüntüsü

Tüm numunelerden belirtilen tekerrür sayılarında aynı şekilde alınan ölçümler tarayıcıdan geçirilip görüntüler bilgisayara aktarılmış ve analiz edilmiştir. Programda öncelikle başlangıç resmi yüklenmekte sonra karşılaştırma yapılacak ikinci resim yüklenmektedir. Birinci ile ikinci üzerinde sol üst ve sağ alt köşelerde ortak olan noktalar belirlendikten sonra birinci resimde sol üstteki noktaya tıklanıp sağ alt köşeye çekilmekte ve seçim tamamlandığında tuş bırakılmaktadır. Program otomatik olarak seçilen alan kadar bir bölgeyi ikinci resim üzerinde göstermektedir (Şekil 2.27). İkinci resim üzerindeki bu alan kaydırılarak ilkiyle aynı noktalara temas ettirildiğinde seçim tamamlanmakta ve *karşılaştır* komutu verilerek hem görüntü olarak ve hem de sayısal tablo olarak karşılaştırma sonuçlarına erişilmektedir (Şekil 2.28). Karşılaştırma görüntüsünde ilk resme

ait noktalar yeşil, ikinci resme ait noktalar kırmızı ve çakışan bölgeler de mavi renkle gösterilmektedir.



Şekil 2.27. Resim yükleme ve alan seçimi penceresi ekran görüntüsü



Şekil 2.28. Görüntü tekniğinde resim pürüzlerini karşılaştırma penceresi görüntüsü

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Basınç Dayanımı ve Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları

Laboratuarda hazırlanan beton numuneler üzerinde 3'er defa basınç ve 2'şerdefa eğilmede çekme dayanım değerleri alınmış ve ortalama değerleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de gösterilmiştir. Ortalama basınç dayanım değerleri 572 ile 656 kgf/cm² arasında değişmektedir. Bu iki basınç değeri arasında %14.8 fark bulunmaktadır. Bazalt ince agregalı karışımların (K9, K8, K7) ortalama basınç dayanım değerlerinin en yüksek, sonra kalker+bazalt karışık (K6, K5, K4), en zayıf olarak da kalker ince agregalı karışımların (K1, K2, K3) olduğu anlaşılmaktadır. Eğilmede çekme dayanım test sonuçları için ise yine bazalt ince agregalı karışımların (K9, K8, K7) kalker ince agregalı karışımlardan (K1, K2, K3) büyük fakat kalker+bazalt karışık ince agregalı karışımlardan (K4, K5, K6) düşük değerlere sahip oldukları anlaşılmaktadır. Genel olarak eğilmede çekme dayanımlarında karışımlar için önemli farkların bulunmadığı söylenebilir. K5 nolu karışımın diğer karışımlar içersinde her iki mukavemet değerinin en uygun mukavemet değerlerine sahip olduğu anlaşılmıştır. Test sonuçlarına göre kum incelik modülündeki farklılığın basınç ve eğilmede çekme dayanımları üzerinde belirgin bir etkisi görülmemektedir.

Tablo 3.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

BASINÇ DAYANIMLARI (kgf/cm ²)						
KARIŞIM		İncelik Modülü	1.	2.	3.	ORT.
(Kalker ince agregalı)	K1	2,2	476	636	604	572,0
(Kalker ince agregalı)	K2	2,7	449	640	649	579,3
(Kalker ince agregalı)	K3	3,15	667	636	667	656,6
(Kalker+bazalt ince agregalı)	K4	2,2	622	520	627	589,6
(Kalker+bazalt ince agregalı)	K5	2,7	653	662	653	656,0
(Kalker+bazalt ince agregalı)	K6	3,15	580	642	604	608,6
(Bazalt ince agregalı)	K7	2,2	622	602	618	614,0
(Bazalt ince agregalı)	K8	2,7	598	636	616	616,6
(Bazalt ince agregalı)	K9	3,15	667	652	573	630,6

Tablo 3.2. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

EĞİLMEDE ÇEKME DAYANIMLARI (kgf/cm ²)			
	1.	2.	ORTALAMA
K1	16,92	15,77	16,345
K2	14,27	16,38	15,325
K3	16,74	14,79	15,765
K4	18,58	15,6	17,09
K5	16,34	17,14	16,74
K6	16,17	16,63	16,4
K7	16,62	16,75	16,685
K8	15,65	16,49	16,07
K9	15,94	15,66	15,8

3.2. Sürtünme Katsayısı Bulguları

İngiliz Sürtünme Pandülü (BPT, ASTM E-303) ile, 9 farklı karışımdan oluşan 27 adet beton numuneler üzerinde 3'er tekerrür olarak yapılan testlerin sonuçları ve ortalama değerleri Tablo 3.3., 3.4. ve 3.5. de verilmiştir. Tablolara göre başlangıçta ortalama olarak 70 ölçülen sürtünme katsayısı değerleri 100.000 tekerlek geçişi sonrasında ortalama olarak 40 ölçülmüştür. Başlangıçta ölçülen sürtünme katsayısı değerleri ile numunelerin üzerinden 100.000 tekerlek geçişi sonunda ölçülen değerler arasındaki kayıp oranı her bir beton karışımı için aynı olmayıp aralarında çok belirgin bir genel farklılık da mevcut değildir.

En az kayıp yüzdesi 0-100.000 tekerlek geçişi için sırasıyla 6. karışım (% 27.31) ve 4. karışım (% 29.05) numunelerinde elde edilmiştir. Ortalama kayıp yüzdeleri bakımından genel bir sıralama yapmak gerekirse, en düşük % 50 bazalt + % 50 kalker (% 34.94), sonra sadece bazalt (K7, K8, K9) (% 38.26) karışımlar gelmektedir. Sadece kalker (K1, K2, K3) karışımlardaki kayıp yüzdeleri (% 39.36) olarak hesaplanmıştır. En fazla kayıp yüzdesi % 43.13 ile K2. karışım 2 numaralı numune üzerinde elde edilmiştir.

Aynı kayaç kökenli ince agrega kullanılan karışımlarda kum incelik modülündeki farklılığın sürtünme katsayıları üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir (Şekil 3.1, 3.2 ve 3.3). İncelik modülünün aynı olduğu farklı kayaç kökenli ince agrega kullanılan karışımlarda ise 2,2 dışındaki 2,7 ve 3,15 incelik modüllü karışımlarda kalker ince agregalı karışımların sürtünme katsayısı kayıp hızının biraz daha fazla olduğu göze çarpmaktadır (Şekil 3.5 ve 3.6). Kalker kökenli agregaların mineralojik yapısı bakımından cilalanmaya yatkınlığının bazalttan daha fazla olmasının bu durumun etkili sebebi olduğu

düşünülmektedir. Ayrıca incelik modülünün 2,7 ve üstü olmasının sürtünme katsayısına olan etkileri daha belirgin hale getirmiş olabileceği kanısına varılmıştır.

Tablo 3.3. Kalker ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları

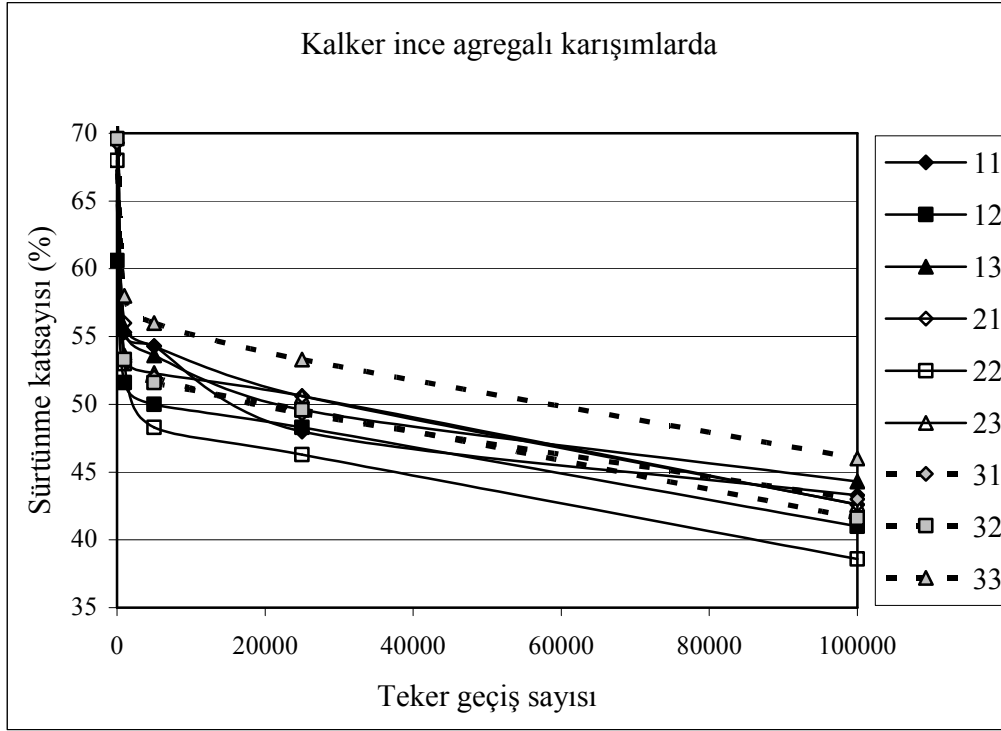
		Tekerleğin Geçiş (Tekerrür) Sayıları					KAYIPLAR %		
		Veri	0	1000	5000	25000	100000	0-100000	1000-100000
K1	11	1.	74	56	55	48	44	41,48	21,68
		2.	74	55	54	48	43		
		3.	74	55	54	48	43		
		ORT.	74	55,3	54,3	48	43,3		
	12	1.	62	52	50	48	41	32,41	20,64
		2.	60	51	50	47	41		
		3.	60	52	50	48	41		
		ORT.	60,6	51,6	50	48,3	41		
	13	1.	72	55	54	50	45	38,99	20,36
		2.	74	56	54	50	44		
		3.	72	56	53	49	44		
		ORT.	72,6	55,6	53,6	49,6	44,3		
K2	21	1.	72	56	55	51	43	41,01	23,81
		2.	73	56	54	51	42		
		3.	72	56	54	50	43		
		ORT.	72,3	56	54,3	50,6	42,6		
	22	1.	69	54	48	47	39	43,13	27,04
		2.	67	52	49	46	39		
		3.	68	53	48	46	38		
		ORT.	68	53	48,3	46,3	38,6		
	23	1.	74	53	53	52	43	41,81	20,49
		2.	73	54	52	50	43		
		3.	73	54	52	50	42		
		ORT.	73,3	53,6	52,3	50,6	42,6		
K3	31	1.	69	54	52	50	43	37,98	19,37
		2.	70	53	52	49	43		
		3.	69	53	52	49	43		
		ORT.	69,3	53,3	52	49,3	43		
	32	1.	70	53	52	50	42	40,19	21,87
		2.	70	54	52	50	42		
		3.	69	53	51	49	41		
		ORT.	69,6	53,3	51,6	49,6	41,6		
	33	1.	74	58	56	54	46	37,51	20,68
		2.	73	58	56	53	46		
		3.	74	58	56	53	46		
		ORT.	73,6	58	56	53,3	46		

Tablo 3.4. Kalker+bazalt karışık ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları

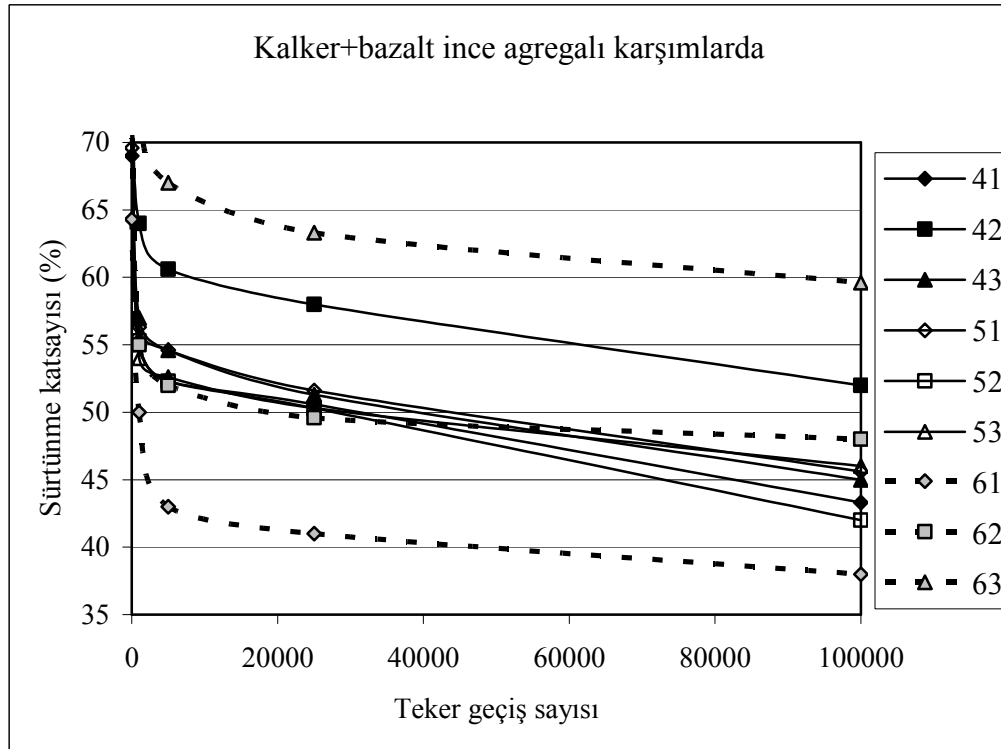
	Veri	Tekerleğin Geçiş (Tekerrür) Sayıları					KAYIPLAR %		
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	1000-100000	
K4	41	1.	70	56	53	51	44	37,24	21,69
		2.	69	55	52	51	43		
		3.	68	55	52	50	43		
		ORT.	69	55,3	52,3	50,6	43,3		
	42	1.	74	64	61	58	52	29,05	18,75
		2.	73	64	61	58	52		
		3.	73	64	60	58	52		
		ORT.	73,3	64	60,6	58	52		
	43	1.	72	57	55	52	45	36,26	21,05
		2.	70	57	55	51	45		
		3.	70	57	54	51	45		
		ORT.	70,6	57	54,6	51,3	45		
K5	51	1.	70	57	55	52	46	34,48	19,01
		2.	69	56	55	52	46		
		3.	70	56	54	51	45		
		ORT.	69,6	56,3	54,6	51,6	45,6		
	52	1.	72	56	53	51	42	40,51	24,05
		2.	70	55	52	50	42		
		3.	70	55	52	50	42		
		ORT.	70,67	55,3	52,3	50,3	42		
	53	1.	71	54	53	51	46	34,84	14,81
		2.	71	54	53	50	46		
		3.	70	54	52	50	46		
		ORT.	70,6	54	52,6	50,3	46		
K6	61	1.	65	50	43	41	38	40,91	24,01
		2.	64	50	43	41	38		
		3.	64	50	43	41	38		
		ORT.	64,3	50	43	41	38		
	62	1.	73	55	52	50	48	33,88	12,72
		2.	73	55	52	50	48		
		3.	72	55	52	49	48		
		ORT.	72,6	55	52	49,6	48		
	63	1.	82	73	67	64	60	27,31	17,56
		2.	82	72	67	63	60		
		3.	82	72	67	63	59		
		ORT.	82	72,3	67	63,3	59,6		

Tablo 3.5. Bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları

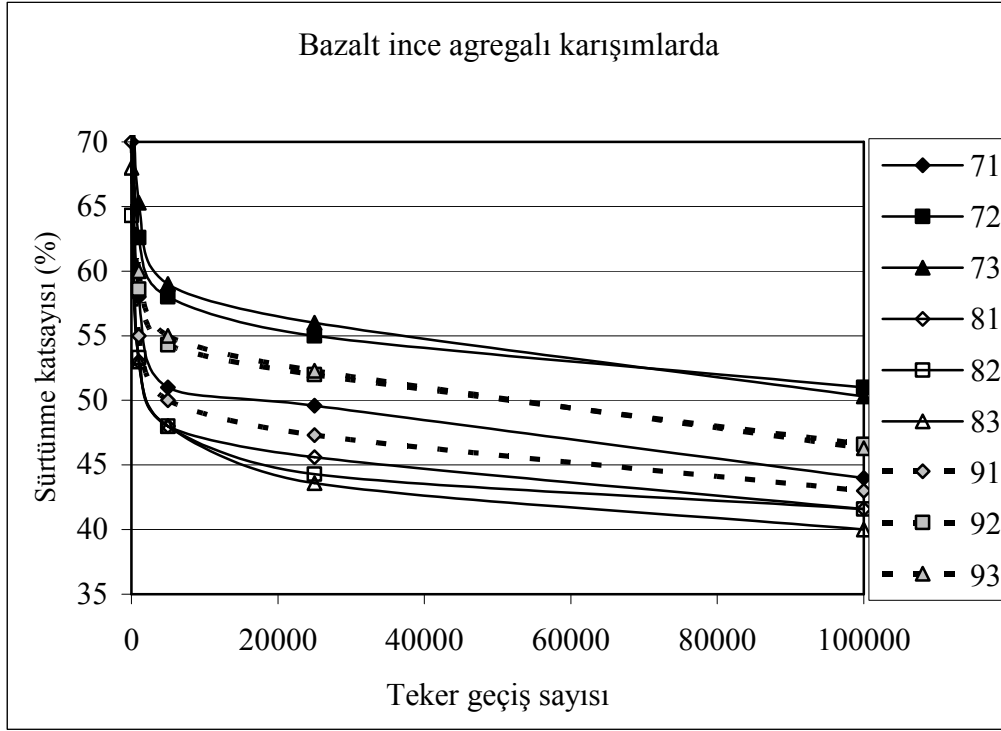
		Tekerleğin Geçiş (Tekerrür) Sayıları					KAYIPLAR %		
		Veri	0	1000	5000	25000	100000	0-100000	1000-100000
K7	71	1.	75	58	51	50	44	41,01	24,13
		2.	75	58	51	50	44		
		3.	74	58	51	49	44		
		ORT.	74,6	58	51	49,6	44		
	72	1.	76	63	58	55	51	32,89	18,53
		2.	76	63	58	55	51		
		3.	76	62	58	55	51		
		ORT.	76	62,6	58	55	51		
	73	1.	80	66	59	56	51	36,56	22,97
		2.	79	65	59	56	50		
		3.	79	65	59	56	50		
		ORT.	79,3	65,3	59	56	50,3		
K8	81	1.	70	53	48	46	42	40,57	21,51
		2.	70	53	48	46	42		
		3.	70	53	48	45	41		
		ORT.	70	53	48	45,6	41,6		
	82	1.	65	54	48	45	42	35,31	21,95
		2.	64	53	48	44	41		
		3.	64	53	48	44	42		
		ORT.	64,3	53,3	48	44,3	41,6		
	83	1.	68	53	48	44	40	41,17	24,52
		2.	68	53	48	44	40		
		3.	68	53	48	43	40		
		ORT.	68	53	48	43,6	40		
K9	91	1.	73	55	50	48	43	40,52	21,81
		2.	72	55	50	47	43		
		3.	72	55	50	47	43		
		ORT.	72,3	55	50	47,3	43		
	92	1.	76	59	55	52	47	38,11	20,47
		2.	75	59	54	52	47		
		3.	75	58	54	52	46		
		ORT.	75,3	58,6	54,3	52	46,6		
	93	1.	75	60	55	53	47	38,26	22,83
		2.	75	60	55	52	46		
		3.	75	60	55	52	46		
		ORT.	75	60	55	52,3	46,3		



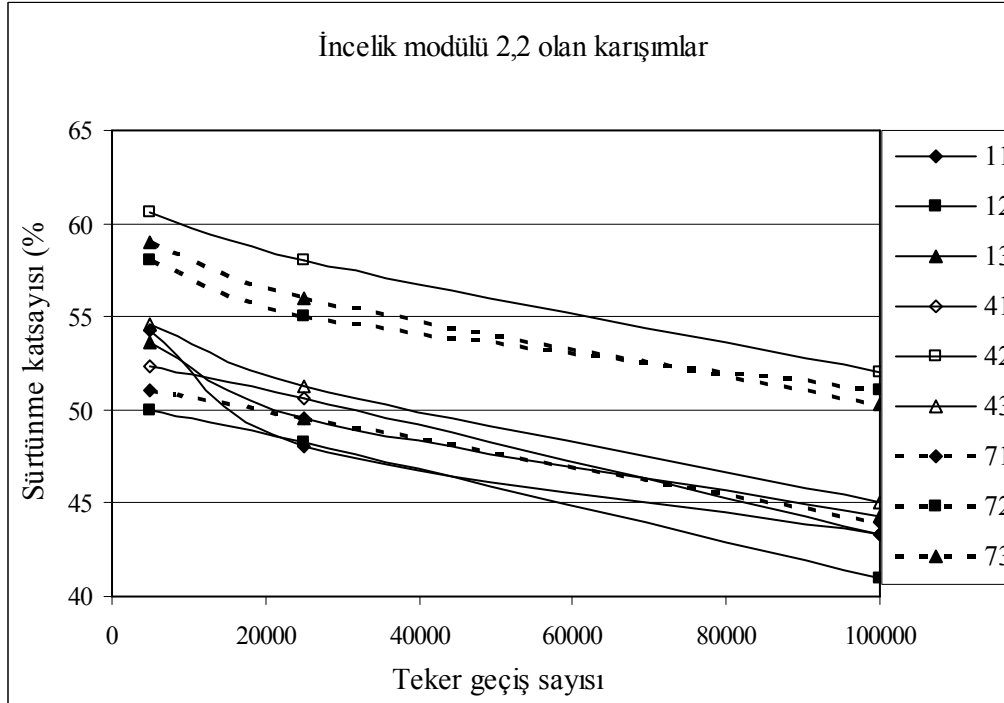
Şekil 3.1. Kalker ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



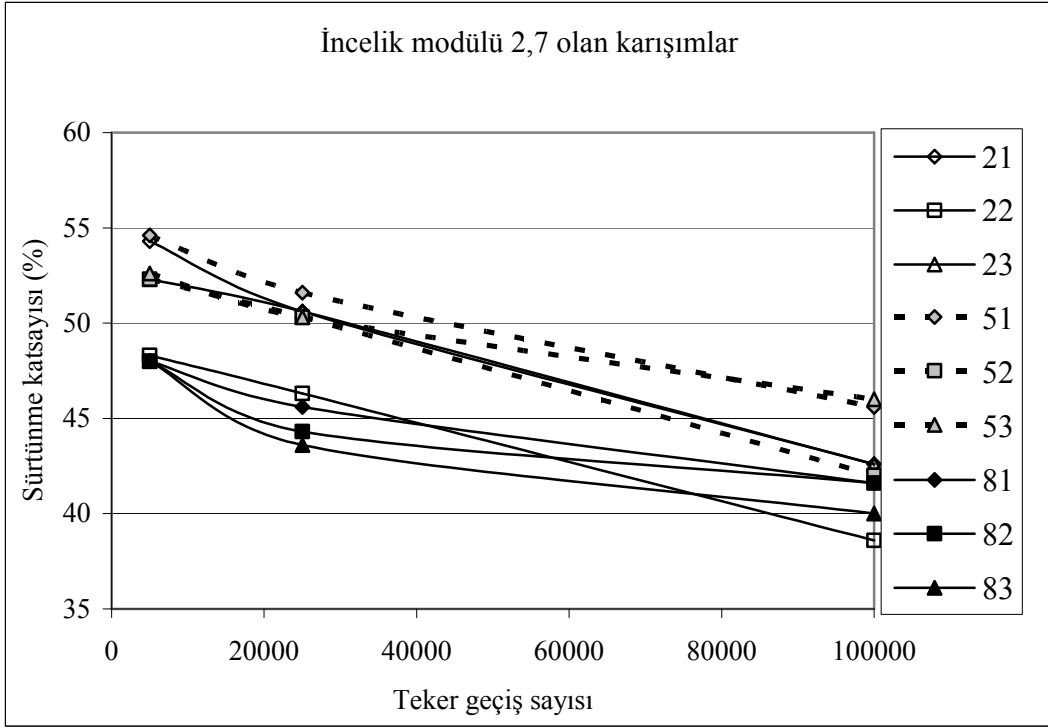
Şekil 3.2. Kalker+bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



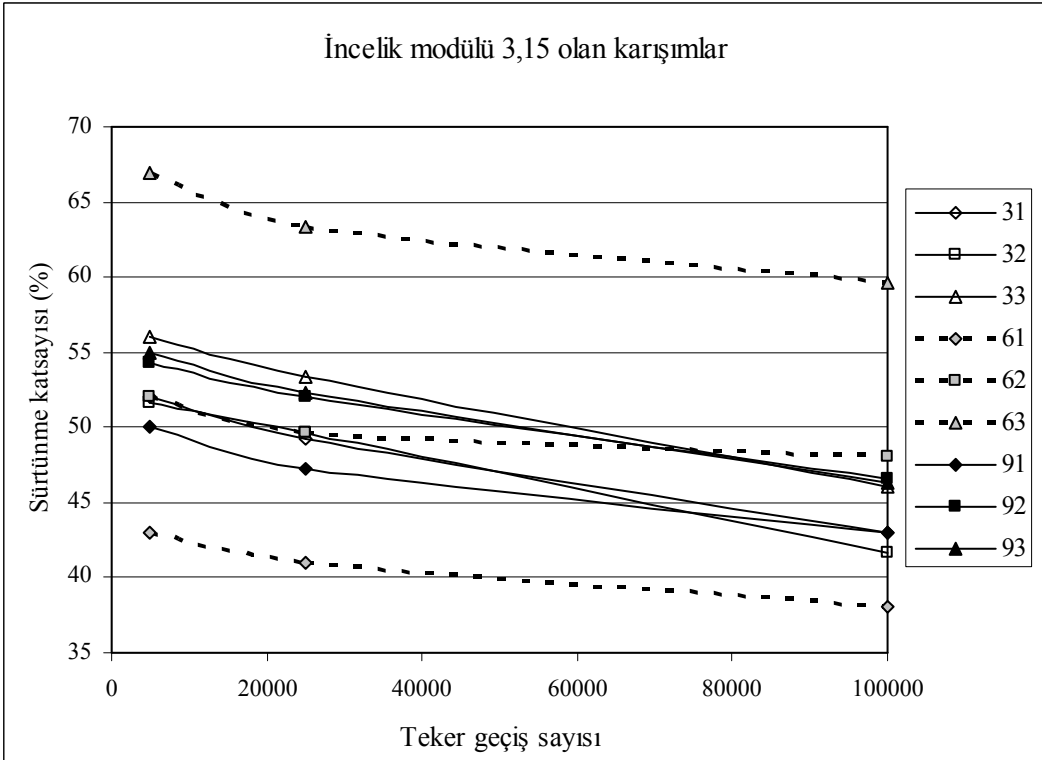
Şekil 3.3. Bazalt ince agregalı karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



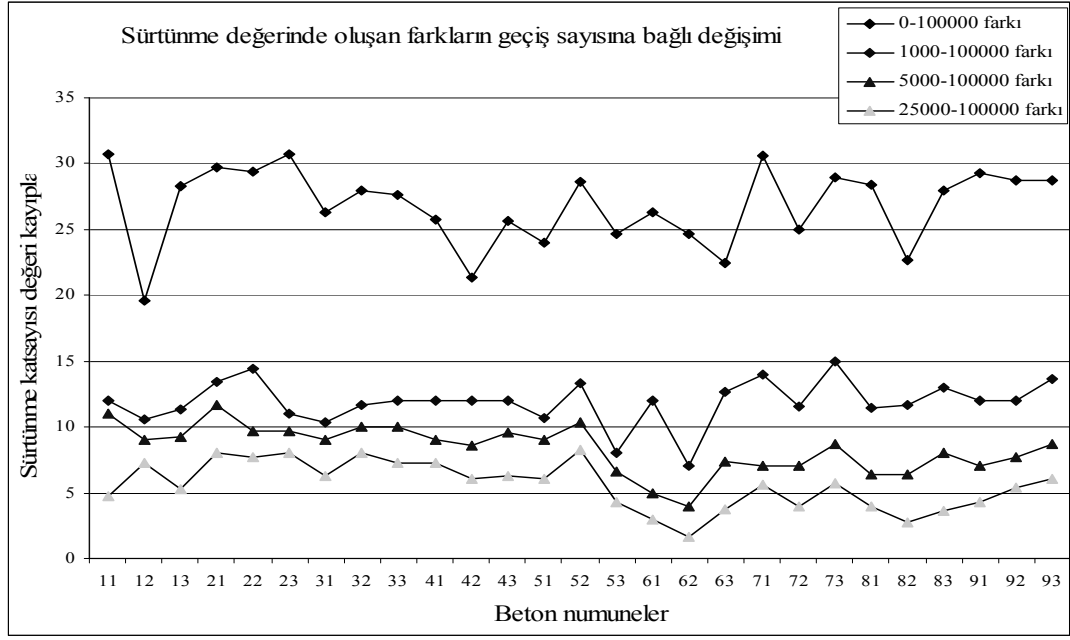
Şekil 3.4. İncelik modülü 2,2 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 3.5. İncelik modülü 2,7 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 3.6. İncelik modülü 3,15 olan karışımlarda sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 3.7. Sürtünme katsayısı kayıp oranlarının numunelere göre durumu

3.3. Yüzey Profil Değerleri Bulguları

Lazer profilometre test düzeneği ile ölçülen yüzey profil değerleri Tablo 3.6, 3.7 ve 3.8 de verilmektedir. Tablolarda sıfır tekerlek geçiş sayısına karşılık gelen (deneyin başlangıcında ölçülen) max. ve min. okuma değerlerine göre testlerde kullanılan numuneler makro pürüzlülük özellik göstermektedir. Max ve min. okuma değerleri arasındaki farklar yani profil derinliği, 1 mm ile 2 mm arasında değişmektedir. Makro dokulu yüzeylerin düşeyde 0,5 mm ile 20 mm çıkıntıları mikro dokulu (mikro texture) yüzeylerin düşeyde 0,001 mm ile 0,5 mm'yi kapsadığı daha önceden belirtilmişti.

Tekerleğin aşındırma etkisinde beton numune yüzeylerindeki profil derinliği değerlerinin tekerrür sayısı arttıkça azalması bekleniyordu. Karışımdaki kum özelliklerine göre varsa farklılıkların nasıl değiştiğinin incelenmesi amaçlanmıştı. Ancak sonuçlarda belirli bir düzenin olmadığı, 0–100.000 farkının pozitif çıkması gerekirken çoğunlukla negatif çıktığı, yani sanki profil derinliği artmış gibi olduğu görüldü. Beton numune yüzeylerinin kalıp içinde şekillendirilmesinden dolayı, aşındırma sırasında, yüzeydeki çıkıntılardan aşınıp çıkan kısımların normal yollardaki duruma göre çok az oluşu; ayrıca, temas noktalarındaki aşınma miktarlarına kıyasla, belirlenen tekerrür sayılarında profil ölçümleri alınırken, lazerin okumaya başladığı noktadaki yanal sapma miktarlarının daha

fazla olması nedeniyle profil düzlemlerinin ihmal edilemeyecek derecede değiştiği; bunun sonucunda da bir tutarlılık yakalanamadığı kanaatine varılmıştır.

Tablo 3.6. Kalker ince agregalı karışımlarda yüzey profili değerleri

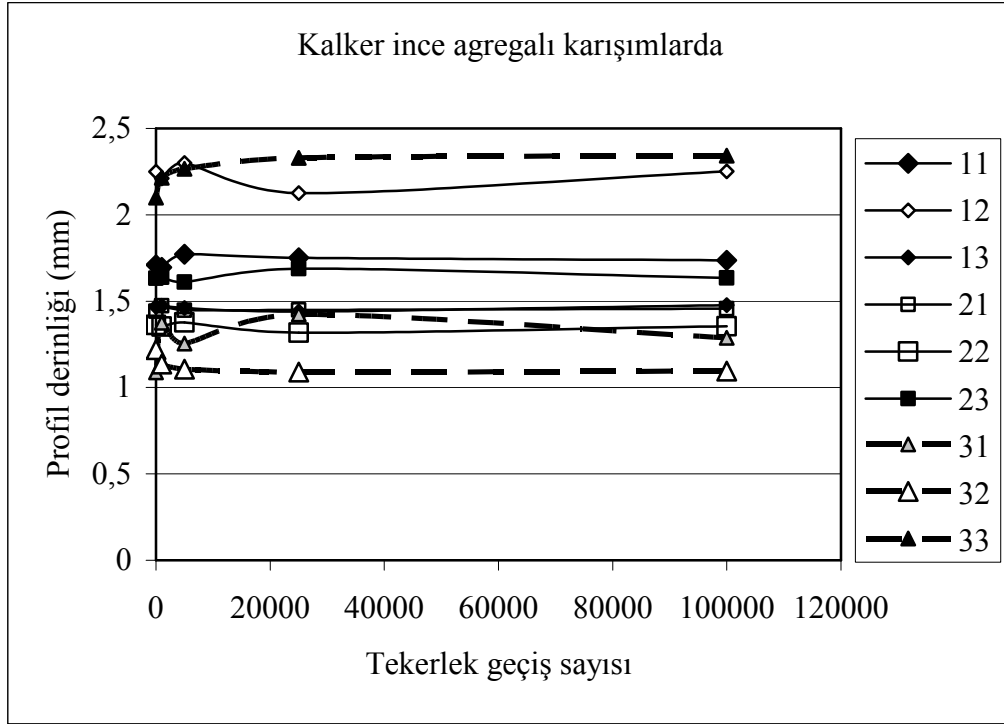
		PROFİL DEĞERLERİ DEĞİŞİMLERİ (mm)					FARK	
		TEKERLEĞİN	GEÇİŞ (TEKERRÜR)			SAYILARI		
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	
K1	11	Max.	7,34376	7,39032	7,43352	7,43568	7,39056	-0,02496
		Min.	5,6328	5,69424	5,66136	5,68488	5,65464	
		Ort.	6,611985	6,686737	6,62583	6,692197	6,627772	
		Max.-Min.	1,71096	1,69608	1,77216	1,7508	1,73592	
	12	Max.	8,46744	8,54904	8,5428	8,48784	8,50848	-0,00288
		Min.	6,21792	6,33816	6,2436	6,36288	6,25608	
		Ort.	7,051692	7,230442	7,157516	7,235873	7,157092	
		Max.-Min.	2,24952	2,21088	2,2992	2,12496	2,2524	
	13	Max.	7,89936	8,00064	7,92816	7,97232	7,93752	-0,00864
		Min.	6,43128	6,5268	6,46872	6,53304	6,4608	
		Ort.	7,029999	7,129595	7,056983	7,143671	7,05365	
		Max.-Min.	1,46808	1,47384	1,45944	1,43928	1,47672	
K2	21	Max.	7,74648	7,88232	7,79064	7,90488	7,79088	-0,01536
		Min.	6,30528	6,40968	6,34416	6,45552	6,33432	
		Ort.	6,936653	7,03487	6,971395	7,047501	6,959066	
		Max.-Min.	1,4412	1,47264	1,44648	1,44936	1,45656	
	22	Max.	7,56648	7,67232	7,62168	7,65936	7,59672	0,00672
		Min.	6,20424	6,31896	6,24456	6,34176	6,2412	
		Ort.	6,933822	7,021771	6,976589	7,025235	6,94252	
		Max.-Min.	1,36224	1,35336	1,37712	1,3176	1,35552	
	23	Max.	7,85016	7,98888	7,88976	8,01816	7,88952	-0,00192
		Min.	6,21744	6,35088	6,27936	6,33024	6,25488	
		Ort.	7,046328	7,128557	7,085289	7,142943	7,055854	
		Max.-Min.	1,63272	1,638	1,6104	1,68792	1,63464	
K3	31	Max.	7,78152	8,23248	8,04936	8,2776	8,06976	-0,20064
		Min.	6,69408	6,85656	6,79488	6,85512	6,78168	
		Ort.	7,192409	7,52174	7,468498	7,516178	7,444189	
		Max.-Min.	1,08744	1,37592	1,25448	1,42248	1,28808	
	32	Max.	7,78872	7,82952	7,7508	7,82448	7,72944	0,1248
		Min.	6,56904	6,69408	6,64416	6,7344	6,63456	
		Ort.	7,114069	7,177856	7,151252	7,212664	7,119629	
		Max.-Min.	1,21968	1,13544	1,10664	1,09008	1,09488	
	33	Max.	8,22744	8,43216	8,41272	8,53152	8,4504	-0,2436
		Min.	6,12768	6,2172	6,14688	6,2028	6,10704	
		Ort.	7,157713	7,255644	7,211664	7,279177	7,116507	
		Max.-Min.	2,09976	2,21496	2,26584	2,32872	2,34336	

Tablo 3.7. Kalker-bazalt karışık ince agregalı karışımlarda yüzey profili değerleri

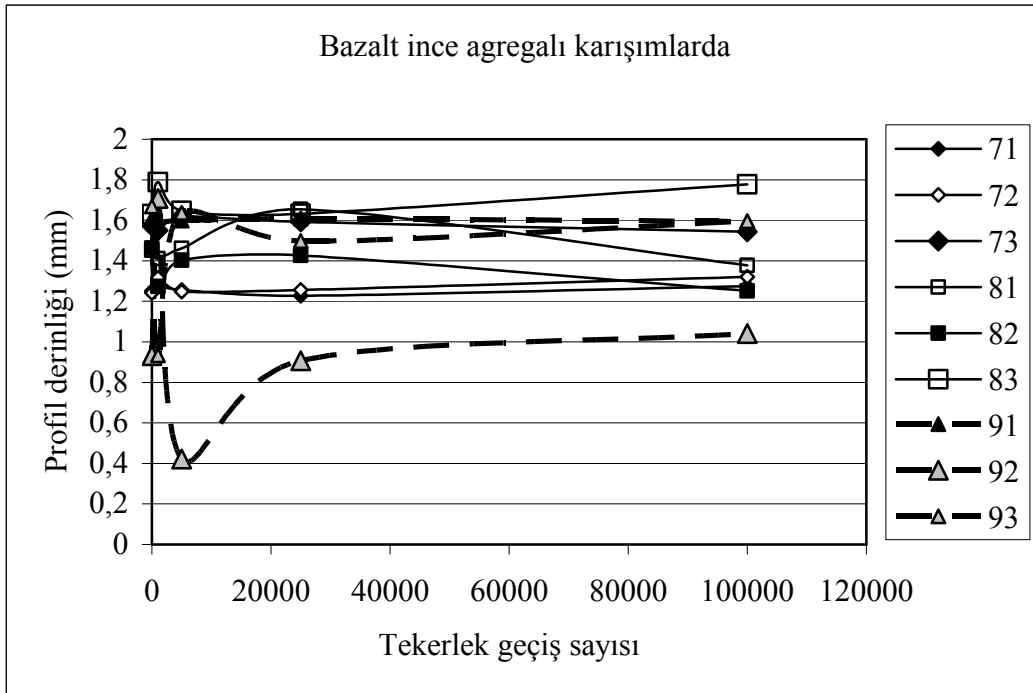
PROFİL DEĞERLERİ DEĞİŞİMLERİ (mm)							FARK	
		TEKERLEĞİN GEÇİŞ (TEKERRÜR) SAYILARI						
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	
K4	41	Max.	7,75968	8,05008	7,9764	8,03904	7,94712	-0,22608
		Min.	6,69264	6,76896	6,71256	6,76584	6,654	
		Ort.	7,198698	7,278758	7,207962	7,285321	7,201691	
		Max.-Min.	1,06704	1,28112	1,26384	1,2732	1,29312	
	42	Max.	8,94432	9,25248	9,06168	9,17592	9,12936	-0,17568
		Min.	6,93888	7,02096	6,9936	7,0392	6,94824	
		Ort.	7,782287	7,886184	7,860418	7,896531	7,813411	
		Max.-Min.	2,00544	2,23152	2,06808	2,13672	2,18112	
	43	Max.	8,39496	8,39736	8,52408	8,3868	8,31792	0,0696
		Min.	6,82008	6,87288	6,9084	6,882	6,81264	
		Ort.	7,545641	7,650993	7,602003	7,691865	7,588659	
		Max.-Min.	1,57488	1,52448	1,61568	1,5048	1,50528	
K5	51	Max.	8,76432	8,3688	8,36616	8,41608	8,33016	0,72792
		Min.	6,46368	6,8244	6,79464	6,8352	6,75744	
		Ort.	7,533256	7,704519	7,67705	7,734081	7,640117	
		Max.-Min.	2,30064	1,5444	1,57152	1,58088	1,57272	
	52	Max.	7,8468	7,81896	7,70448	7,73304	7,63536	0,19752
		Min.	6,47472	6,55416	6,50496	6,54264	6,4608	
		Ort.	7,050914	7,149996	7,129993	7,156613	7,079398	
		Max.-Min.	1,37208	1,2648	1,19952	1,1904	1,17456	
	53	Max.	7,81608	7,9128	7,85736	7,87368	7,81152	0,0864
		Min.	6,45864	6,55872	6,56088	6,59712	6,54048	
		Ort.	7,071176	7,168594	7,130684	7,161108	7,087462	
		Max.-Min.	1,35744	1,35408	1,29648	1,27656	1,27104	
K6	61	Max.	6,98952	6,8832	7,00776	6,90432	7,1772	-0,07848
		Min.	5,6076	5,64	5,59392	5,64336	5,7168	
		Ort.	6,127044	6,1671	6,123264	6,171021	6,253609	
		Max.-Min.	1,38192	1,2432	1,41384	1,26096	1,4604	
	62	Max.	7,15896	7,1472	7,08624	7,27848	7,20624	0,05592
		Min.	5,65848	5,69472	5,64936	5,7096	5,76168	
		Ort.	6,30751	6,349872	6,302425	6,350683	6,429215	
		Max.-Min.	1,50048	1,45248	1,43688	1,56888	1,44456	
	63	Max.	7,66152	7,67928	7,63752	7,71072	7,746	0,03576
		Min.	5,90904	5,94888	5,90376	5,95392	6,02928	
		Ort.	6,899181	6,990958	6,940224	6,986401	7,064211	
		Max.-Min.	1,75248	1,7304	1,73376	1,7568	1,71672	

Tablo 3.8. Bazalt ince agregalı karışımların yüzey profili değerleri

PROFİL DEĞERLERİ DEĞİŞİMLERİ (mm)							FARK	
		TEKERLEĞİN GEÇİŞ (TEKERRÜR) SAYILARI						
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	
K7	71	Max.	7,26144	7,31496	7,25976	7,28352	7,38792	-0,02376
		Min.	6,0108	6,03984	6,0036	6,0564	6,11352	
		Ort.	6,665336	6,708502	6,664419	6,711312	6,801265	
		Max.-Min.	1,25064	1,27512	1,25616	1,22712	1,2744	
	72	Max.	7,2072	7,29504	7,20504	7,2624	7,38624	-0,07848
		Min.	5,96544	5,97912	5,9568	6,00576	6,066	
		Ort.	6,575214	6,606759	6,560359	6,621419	6,692867	
		Max.-Min.	1,24176	1,31592	1,24824	1,25664	1,32024	
	73	Max.	7,44456	7,46448	7,49232	7,5072	7,54632	0,02832
		Min.	5,8728	5,91504	5,8728	5,91408	6,00288	
		Ort.	6,670535	6,73283	6,669696	6,709238	6,818671	
		Max.-Min.	1,57176	1,54944	1,61952	1,59312	1,54344	
K8	81	Max.	7,28256	7,2648	7,28928	7,32144	7,31856	0,0732
		Min.	5,83128	5,85384	5,82744	5,66784	5,94048	
		Ort.	6,530557	6,564296	6,532662	6,577252	6,643614	
		Max.-Min.	1,45128	1,41096	1,46184	1,6536	1,37808	
	82	Max.	7,65264	7,50768	7,60272	7,66632	7,57176	0,21192
		Min.	6,18936	6,23376	6,20064	6,23976	6,3204	
		Ort.	6,759775	6,766898	6,774996	6,811465	6,847447	
		Max.-Min.	1,46328	1,27392	1,40208	1,42656	1,25136	
	83	Max.	7,44072	7,64712	7,4484	7,47336	7,71816	-0,14736
		Min.	5,81112	5,8596	5,80224	5,84184	5,9412	
		Ort.	6,748712	6,793796	6,737897	6,786365	6,872592	
		Max.-Min.	1,6296	1,78752	1,64616	1,63152	1,77696	
K9	91	Max.	7,464	7,53288	7,41312	7,47816	7,61736	0,01608
		Min.	5,85456	5,94264	5,81496	5,87016	6,024	
		Ort.	6,733787	6,789237	6,715961	6,76282	6,865969	
		Max.-Min.	1,60944	1,59024	1,59816	1,608	1,59336	
	92	Max.	7,56456	7,6404	7,02072	7,5552	7,84104	-0,10889
		Min.	6,631961	5,93328	6,599069	6,64827	6,799552	
		Ort.	7,182536	6,717927	6,858809	7,132245	7,635493	
		Max.-Min.	0,932599	1,70712	0,421651	0,90693	1,041488	
	93	Max.	7,79784	7,0056	7,5384	7,63704	7,84104	0,07272
		Min.	6,12984	6,07248	5,90136	6,13992	6,24576	
		Ort.	6,360264	6,449418	6,464753	6,341198	6,707153	
		Max.-Min.	1,668	0,93312	1,63704	1,49712	1,59528	



Şekil 3.8. Kalker ince agregalı karışımlarda profil derinliği değişimi



Şekil 3.9. Bazalt ince agregalı karışımlarda profil derinliği değişimi

3.4. Temas Noktaları Alanları Bulguları

Kullanılan baskı tekniğiyle elde edilen temas noktaları alanları oranları Tablo 3.9, 3.10 ve 3.11 de verilmektedir. Grafiklere bakıldığında röntgen film kullanılarak ölçüm alındığı durumdaki değerlerin (R'li), kullanılmadığı duruma göre daha kararlı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Tekerlek geçiş sayısı arttıkça temas noktaları alanı yüzdesinin de arttığı; karışımda incelik modülü 3,15 olan bazalt ince agregası kullanıldığı durumda (9. karışım), temas noktaları alanı oranındaki artış diğer deyişle aşınma eğiliminin diğerlerinden daha az olduğu görülmektedir. En fazla artış yüzdesi 1. karışımda olmasına rağmen (%37.88) genel olarak 4. ve 5. karışımlarda yani %50 bazalt + %50 kalker ince agregalı karışımlarda gözükmemektedir. 1. karışım diğer iki numunesindeki artış yüzdesi daha tutarlı (%19 ve %13) görülmüştür. Artış yüzdesinin büyük olması, numune yüzeyindeki temas noktaları ya da çukurluklarının daha çok aşınması olarak düşünülebilir.

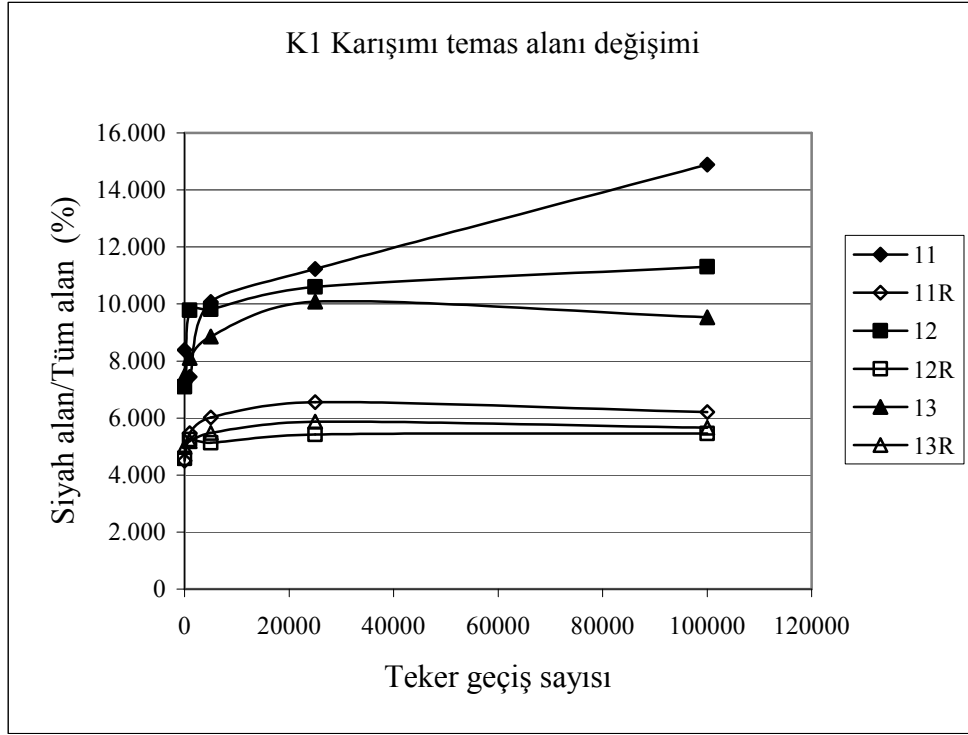
Röntgen film kullanılmadığı ölçüm alımlarında 6, 8 ve 9 nolu karışımlarda negatif kayıp oranları yani aşınmanın tersi bir durum çıkmıştır. Bunun ölçüm alma sırasındaki hatalardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekillerden de (Şekil 3.7., Şekil 3.8. ve Şekil3.9) görüleceği üzere röntgen film kullanılarak alınan ölçümler daha kararlı sonuçlar verdiği için diğer şekiller sadece bu değerler üzerinden çizilmiştir.

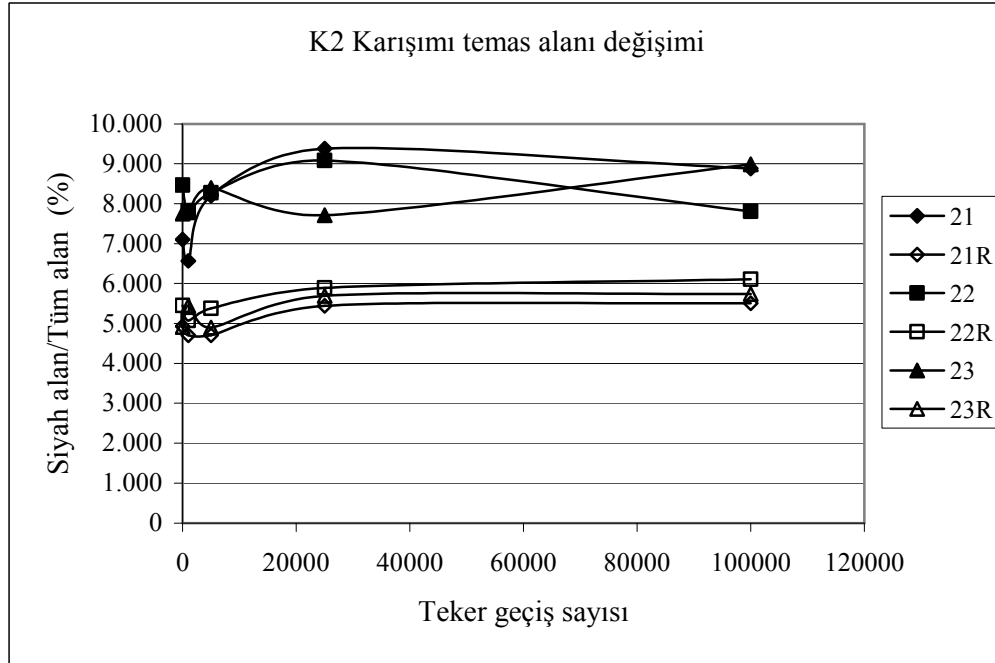
Kum incelik modülündeki farklılığın, temas noktaları alanlarının genel temas alanına oranı değerlerinin değişimi üzerinde belirgin bir etkisi gözükmemektedir.

Tablo 3.9. Temas noktaları alanı oranlarının kalker ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri

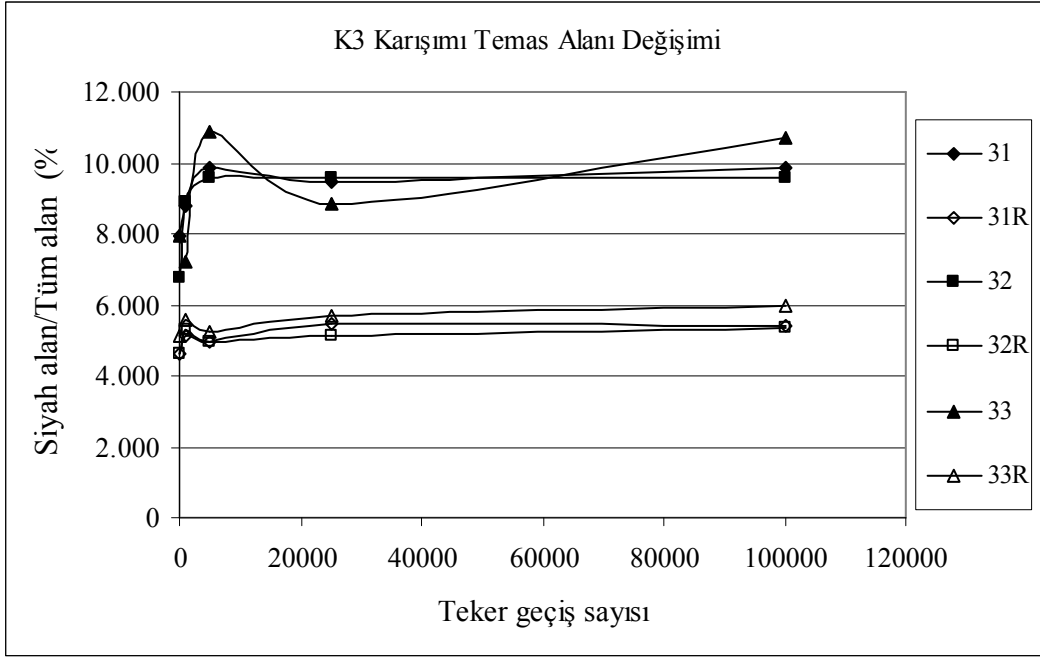
		TEMAS NOKTALARI ALANLARI ORANI (%)					KAYIP ORANLARI (%)	
		ÖLÇÜM ALINAN TEKERRÜR SAYILARI						
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	0-25000
K1	11	8,391	7,446	10,069	11,228	14,893	77,488	33,810
	11R	4,506	5,473	6,013	6,556	6,213	37,883	45,495
	12	7,098	9,784	9,811	10,601	11,305	59,270	49,352
	12R	4,578	5,238	5,127	5,427	5,455	19,157	18,545
	13	7,475	8,109	8,86	10,079	9,536	27,572	34,836
	13R	4,989	5,184	5,48	5,874	5,661	13,470	17,739
K2	21	7,105	6,566	8,199	9,375	8,879	24,968	31,949
	21R	4,927	4,706	4,708	5,439	5,504	11,711	10,392
	22	8,464	7,822	8,276	9,082	7,809	-7,739	7,302
	22R	5,451	5,07	5,38	5,892	6,102	11,943	8,090
	23	7,756	7,786	8,393	7,712	8,984	15,833	-0,567
	23R	4,909	5,443	4,896	5,689	5,733	16,785	15,889
K3	31	7,918	8,795	9,853	9,482	9,858	24,501	19,752
	31R	4,597	5,119	4,948	5,438	5,436	18,251	18,295
	32	6,753	8,883	9,588	9,596	9,572	41,744	42,100
	32R	4,639	5,3	4,964	5,13	5,331	14,917	10,584
	33	7,954	7,233	10,884	8,858	10,683	34,310	11,365
	33R	5,136	5,576	5,251	5,708	5,987	16,569	11,137



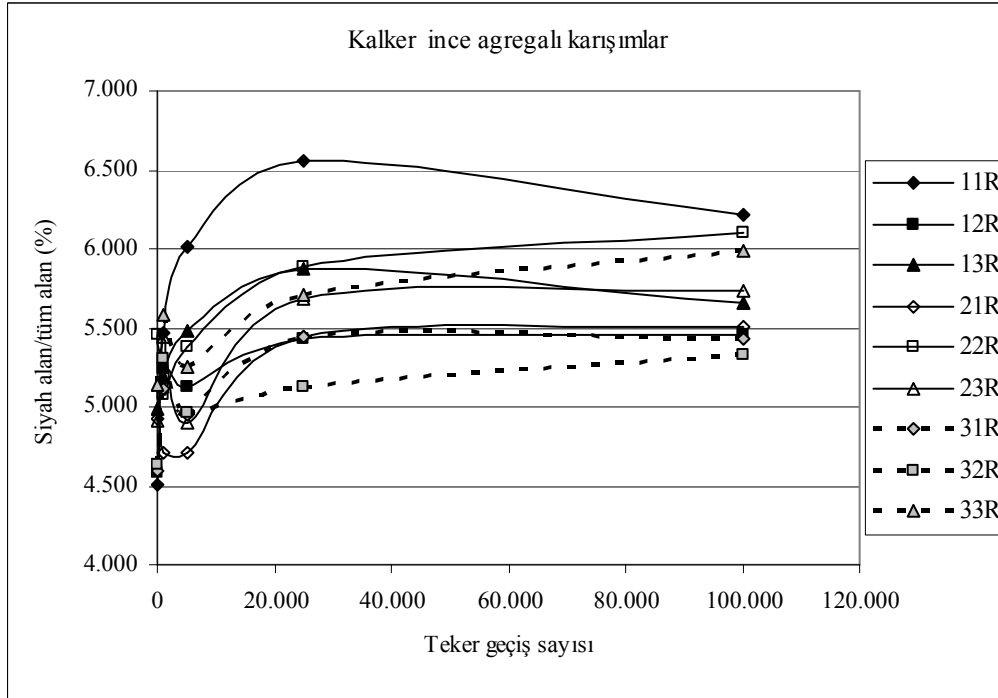
Şekil 3.10. K1 karışımı numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmli (R) değişimi



Şekil 3.11. K2 karışım numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmli (R) değişimi



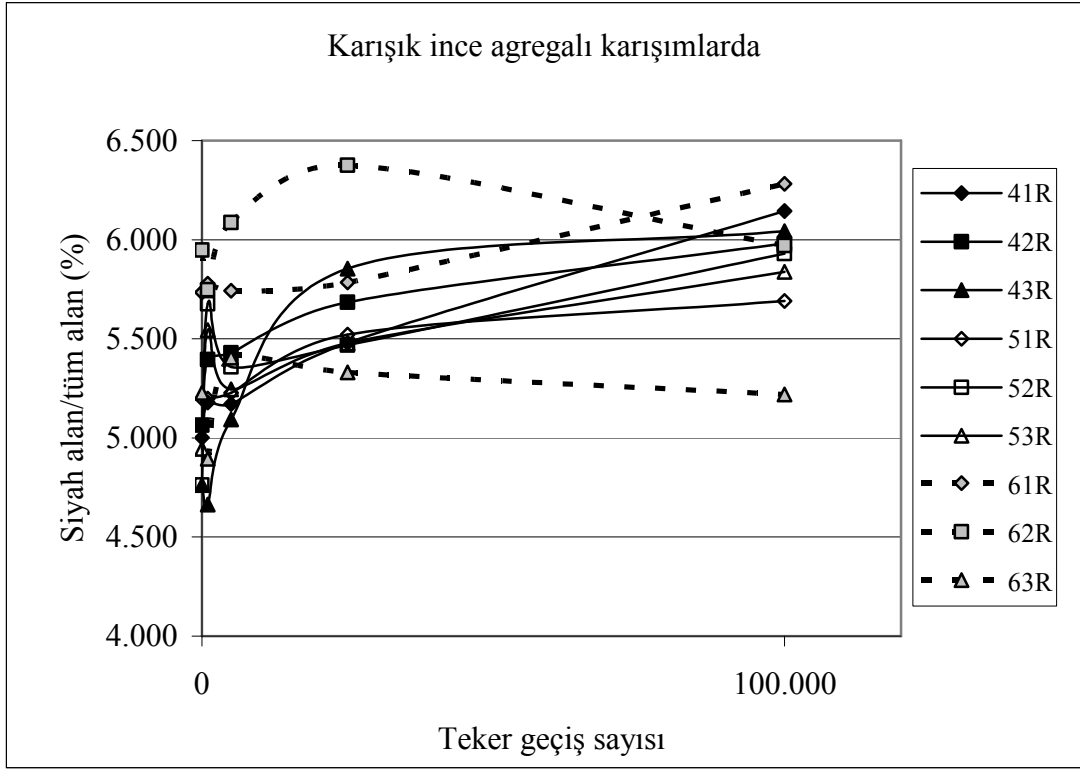
Şekil 3.12. K3 karışım numunelerinde temas noktaları alanı oranının röntgen filmsiz ve filmlü (R) değişimi



Şekil 3.13. Kalker ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi

Tablo 3.10. Temas noktaları alanı oranlarının karışık ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri

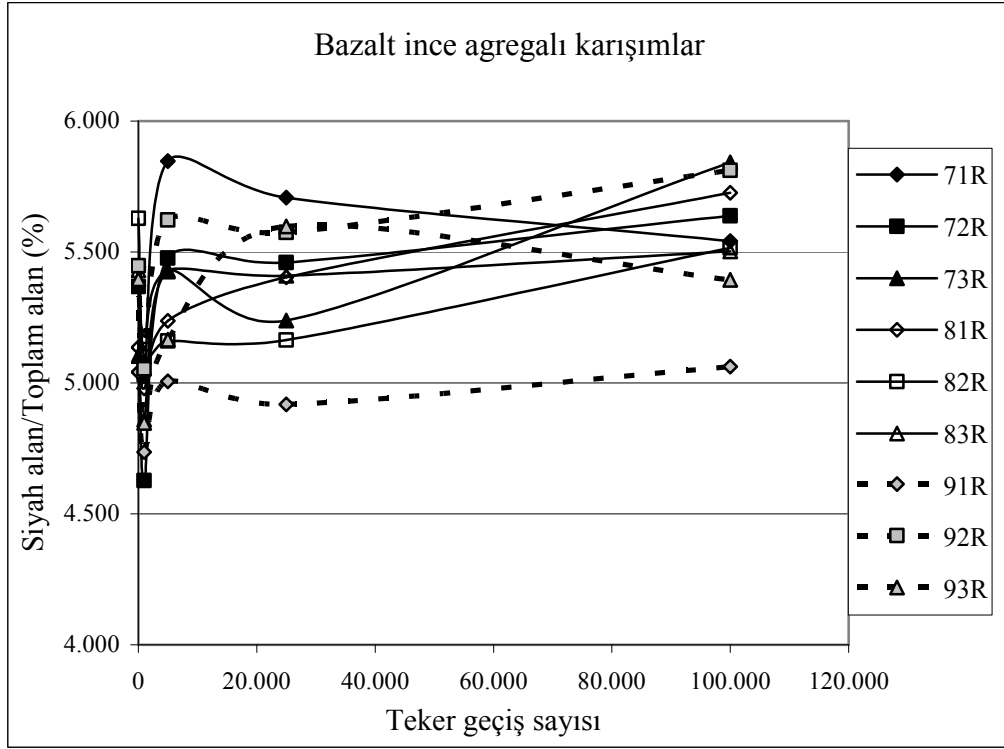
		TEMAS NOKTALARI ALANLARI ORANI (%)					KAYIP ORANLARI (%)	
		ÖLÇÜM ALINAN TEKERRÜR SAYILARI						
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	0-25000
K4	41	7,446	7,927	7,548	8,971	9,503	27,626	20,481
	41R	5,001	5,179	5,171	5,48	6,144	22,855	9,578
	42	7,565	7,147	7,628	8,28	8,762	15,823	9,451
	42R	5,065	5,395	5,429	5,685	5,982	18,105	12,241
	43	8,259	8,076	9,24	8,914	10,544	27,667	7,931
	43R	4,762	4,663	5,094	5,854	6,043	26,900	22,932
K5	51	7,611	7,336	8,887	9,474	10,466	37,511	24,478
	51R	5,198	5,198	5,228	5,522	5,691	9,484	6,233
	52	7,489	9,202	8,607	10,111	11,266	50,434	35,011
	52R	4,762	5,676	5,359	5,468	5,93	24,528	14,826
	53	7,718	8,843	8,863	9,254	9,656	25,110	19,902
	53R	4,944	5,544	5,245	5,478	5,838	18,083	10,801
K6	61	9,961	10,855	9,034	10,06	9,606	-3,564	0,994
	61R	5,734	5,778	5,742	5,785	6,282	9,557	0,889
	62	8,79	10,174	9,165	9,151	10,484	19,272	4,107
	62R	5,948	5,747	6,087	6,375	5,97	0,370	7,179
	63	7,872	8,176	7,861	7,964	8,765	11,344	1,169
	63R	5,228	4,894	5,405	5,33	5,219	-0,172	1,951



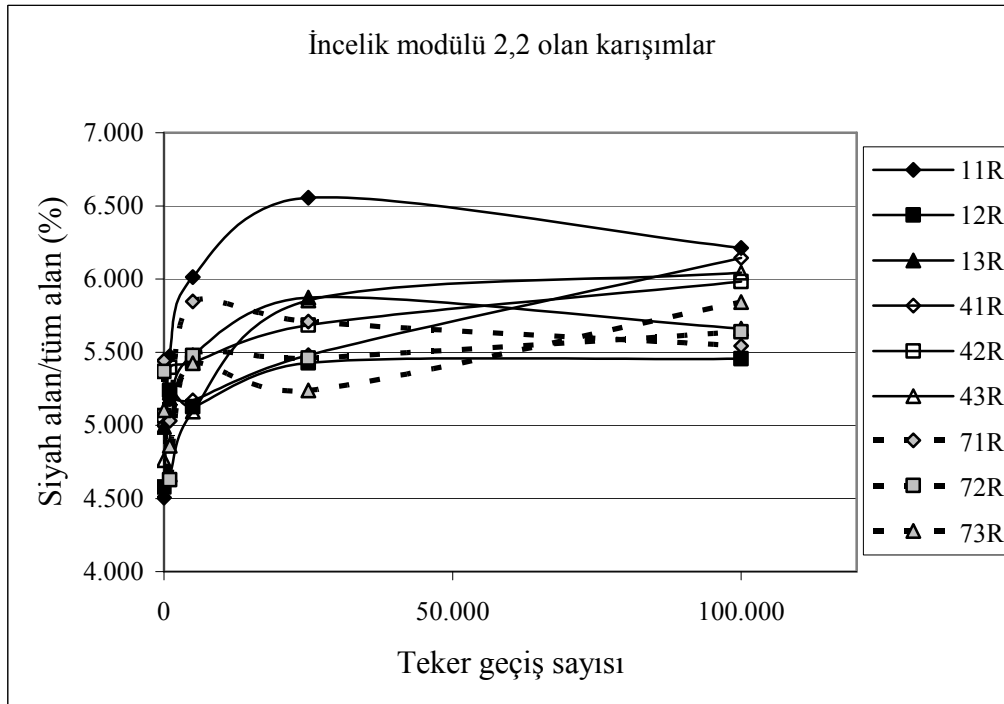
Şekil 3.14. Karışık ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi

Tablo 3.11. Temas noktaları alanı oranlarının bazalt ince agregalı karışımlardaki değişim değerleri

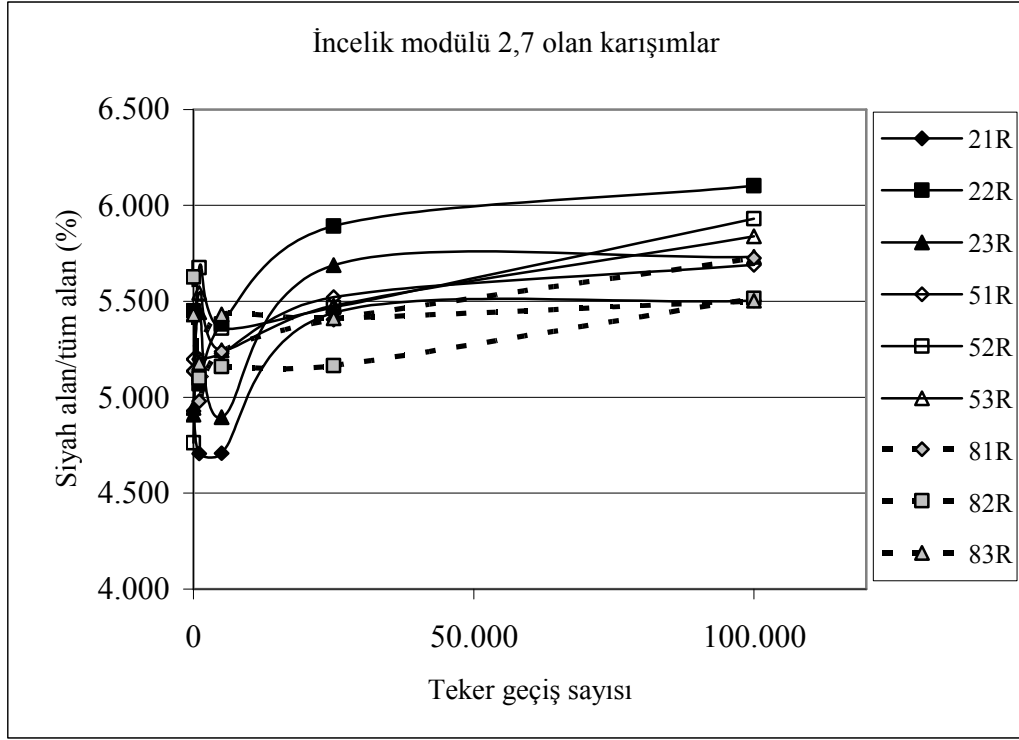
		TEMAS NOKTALARI ALANLARI ORANI (%)					KAYIP ORANLARI (%)	
		ÖLÇÜM ALINAN TEKERRÜR SAYILARI						
		0	1000	5000	25000	100000	0-100000	0-25000
K7	71	8,228	8,991	8,471	9,488	10,259	24,684	15,314
	71R	5,443	5,031	5,847	5,708	5,542	1,819	4,869
	72	8,08	9,086	9,603	10,344	9,243	14,394	28,020
	72R	5,368	4,627	5,477	5,46	5,638	5,030	1,714
	73	8,082	8,404	9,621	10,36	9,476	17,248	28,186
	73R	5,103	4,859	5,425	5,238	5,842	14,482	2,646
K8	81	8,012	8,635	8,51	8,462	9,373	16,987	5,617
	81R	5,136	4,979	5,237	5,404	5,726	11,488	5,218
	82	8,698	8,356	8,238	7,719	9,241	6,243	-11,255
	82R	5,628	5,099	5,16	5,164	5,516	-1,990	-8,244
	83	8,016	9,41	8,718	8,622	9,521	18,775	7,560
	83R	5,43	5,178	5,43	5,41	5,503	1,344	-0,368
K9	91	8,765	9,472	7,881	9,576	9,187	4,815	9,253
	91R	5,042	4,736	5,006	4,918	5,062	0,397	-2,459
	92	8,399	8,108	8,256	8,074	7,98	-4,989	-3,870
	92R	5,447	5,054	5,622	5,574	5,812	6,701	2,332
	93	8,467	7,439	8,312	8,686	10,229	20,810	2,587
	93R	5,396	4,847	5,165	5,598	5,394	-0,037	3,744



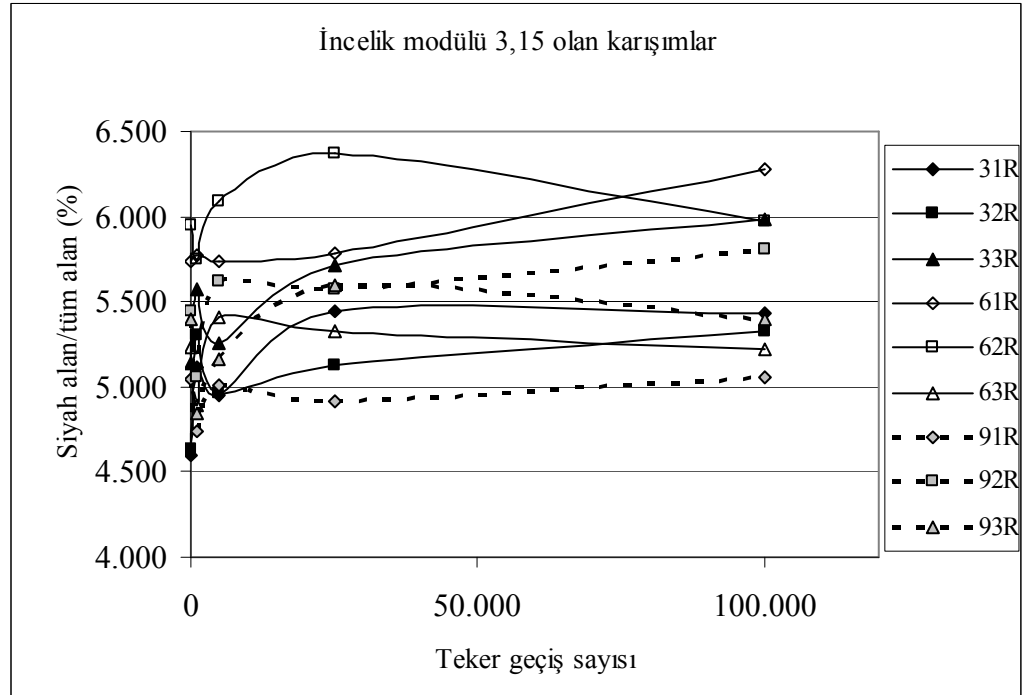
Şekil 3.15. Bazalt ince agregalı karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi



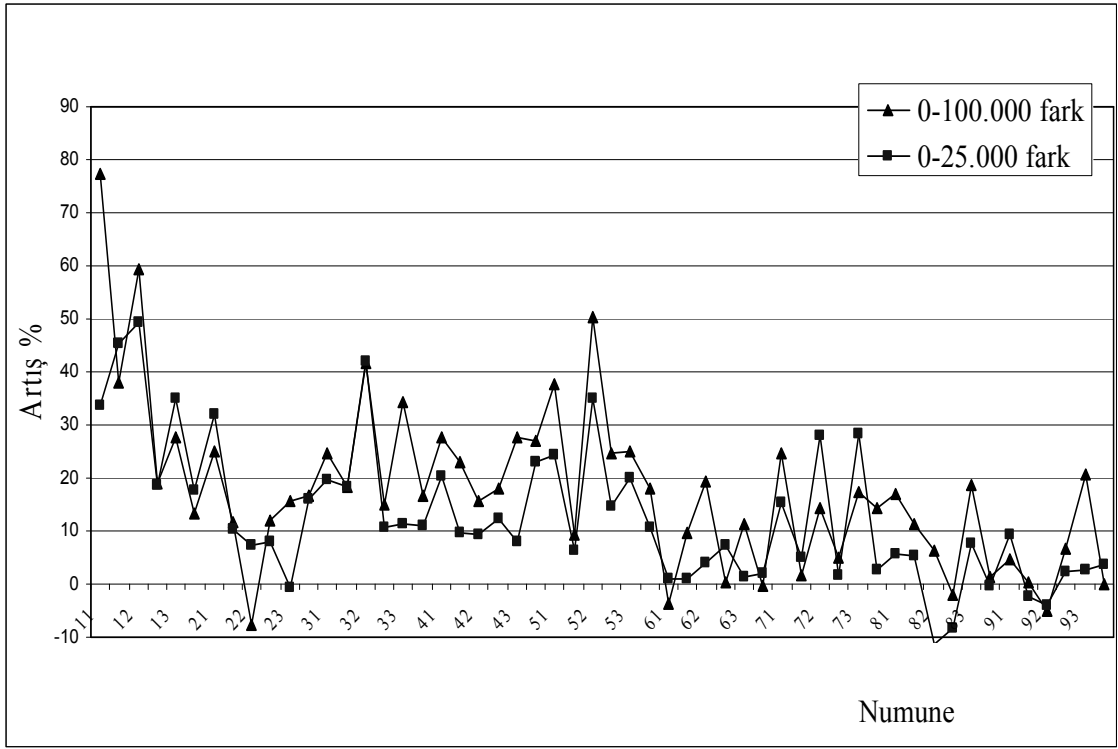
Şekil 3.16. İncelik modülü 2,2 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi



Şekil 3.17. İncelik modülü 2,7 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi



Şekil 3.18. İncelik modülü 3,15 olan karışımlarda temas noktaları alanı oranının değişimi



Şekil 3.19. Temas noktaları alanı oranlarındaki artış yüzdelерinin karışımlara göre değişimi

Şekil 3.19. daki grafikten de görüldüğü üzere sadece kalker ince agregalı numunelerden sadece bazalt ince agregalı numunelere doğru gidildikçe temas noktaları alanı oranlarındaki artış yüzdelерinde yani aşınma değerlerinde bir azalma vardır. Bu da aşınma direnci kalkerden daha iyi olan bazalt kökenli ince agrega kullanımının bir sonucu olarak düşünülebilir.

Bu çalışmada elde edilen sürtünme katsayısı ve temas noktaları alanı oranı değerlerinden hareketle çizilen grafiklere bakıldığında sonuçlar, T.F. ve Tan C.C. (1992) ile paralellik göstermektedir. Fwa T.F. ve Tan C.C. [2] yaptıkları çalışmada, agrega yüzeyinin farklı sertliğe sahip minerallerden oluşmasının sürtünmeyi olumlu yönde etkilediği sonucuna varmışlardır. Başka bir deyişle kalker gibi cilalanmaya yatkın agregalarla beraber cilalanmaya yatkınlığı az olan bazalt, granit gibi aşınma direnci yüksek agregaların karışık kullanılmasının faydalı olacağı söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada beton yollarda karışım içindeki ince agrega özelliklerine bağlı olarak yol yüzey pürüzlülüğünün, lastik tekerleğin aşındırma etkisinde değişimini farklı ölçüm teknikleriyle belirlemeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Ortalama basınç dayanım değerleri bakımından sıralama yapılacak olursa, sadece Bazalt ince agrega içeren karışımların ortalama basınç dayanım değerlerinin en yüksek, sonra karışık (% 50 bazalt + % 50 kalker) karışımların, en zayıf olarak da sadece kalker ince agregalı karışımların olduğu anlaşılmaktadır. Eğilmede çekme dayanım açısından ise yine sadece bazalt ince agrega içeren karışımların kalkerli karışımlardan daha iyi olduğu fakat karışık (%50 bazalt + %50 kalker) karışımlardan daha düşük değerlere sahip oldukları anlaşılmaktadır. Ekonomiklik açısından bazaltın kalker'den daha pahalı olduğu düşünülürse beton yollarda %50 bazalt + %50 kalker karışımının kullanılmasının daha uygun olacağı açıktır.

2. Sürtünme katsayısı kayıp yüzdeleri, 0-100.000 tekerlek geçişi için, sadece bazalt ve sadece kalker içeren beton numunelerinde birbirlerine yakındır. En fazla sürtünme katsayısı kayıp yüzdesi sadece kalker ince agrega içeren beton numunelerinde bulunmuştur. En az sürtünme kayıp yüzdesi % 50 bazalt + % 50 kalker'li karışımlarda elde edilmiştir. Bu karışım aynı zamanda eğilmede çekme dayanımı en yüksek değeri veren karışım olarak bulunmuştur. Yine, en düşük eğilmede çekme dayanımı sadece kalker karışımı numunelerde elde edilmiştir. Dikkat çekici nokta eğilmede çekme dayanımı yüksek olan karışımların sürtünme kayıp yüzdelerinin düşük bulunmasıdır.

3. Genel kanaat, % 50 bazalt + % 50 kalker karışımların beton yollarda tekerlek yükleri altında en az aşınma gösterecek karışım olarak düşünülebilir. Tek tip kayaç türünden elde edilen ince agrega kullanmak yerine farklı kökenli değişik sertlikteki ince agregalar katılarak oluşturulacak beton karışımların tekerleklerin aşındırma etkisinde zaman içindeki yüzey sürtünme kayıplarının daha az olacağı sonucuna varılabilir.

4. Görüntü tekniği ve lazer profilometre ile yapılan ölçüm tekniklerinin daha da geliştirilmesi gerekmektedir. İlk defa deneniyor ve doğal olarak ilk çalışmalarda mükemmel sonuçlar vermesi oldukça zordur.

5. ÖNERİLER

1. Her ne kadar lazer profilometre ile aynı yüzey üzerinde yapılan iki boyutlu pürüzlük ölçümleri, aşınma miktarlarını tutarlı göstermese de, bu ölçüm yöntemin daha da geliştirilmesiyle beton numunelerin aşınmalarını mikron mertebesinde ölçmesi dolayısıyla diğer tekniklere göre avantajının mevcut olduğu düşünülmektedir.

2. Temas noktaları alanının tüm temas alanına oranını belirlerken kullanılan baskı tekniğinin geliştirilmesi faydalı olacaktır. Tekerlek beton temas ara yüzüne sadece karbon kağıt konularak renklenen beton yüzeye çekilecek resimlerden hareket edilmesi durumu denenmelidir.

6. KAYNAKLAR

1. Özturan, T., Beton Aşınmasının İki Fazlı Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1984.
2. Fwa, T. F. ve Tan C.C., Laboratory Study of Microtexture-Related Skid Resistance of Concrete Pavement Materials, Journal of Testing and Evaluation, 20, 3 (1992) 207-215.
3. Zelić, J., Properties of Concrete Pavements Prepared With Ferrochromium Slag As Concrete Aggregate, Cement and Concrete Research, 35, 12 (2005) 2340-2349.
4. Ghafoori, N. ve Sukandar, B. M., Abrasion Resistance of Concrete Block Pavers, ACI Materials Journal, 92, 1 (1995).
5. Ghafoori, N. ve Diawara, H., Abrasion Resistance of Fine Aggregate-Replaced Silica Fume, Concrete Materials Journal, 96, 5 (1999).
6. Atiş, C. D., High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete, Journal of Materials In Civil Engineering, May/ June (2002) 274-277.
7. Momber, A. W., The Erosion of Cement Paste, Mortar and Concrete by Gritblasting, Wear, 246 (2000) 46–54.
8. Sonebi, M. ve Khayat, K. H., Testing Abrasion Resistance of High-Strength Concrete, Cement, Concrete & Aggregates, 23, 1 (2001).
9. Akter, M., Hossain, M., Boyer J. ve Parcels W. J., Factors Affecting Rapid Roughness Progression on Portland Cement Concrete Pavements in Kansas, TRB, 1809 (2002).
10. Donza, H., Cabrera, O.ve Irassar E. F., High-strength Concrete With Different Fine Aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 11 (2002) 1755–1761.
11. Hui, Li, Mao-hua Zhang ve Jin-ping Ou, Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement, Wear, 2005.
12. Siddique, R., Effect of Fine Aggregate Replacement With Class F Fly Ash on The Abrasion Resistance of Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 11 (November 2003) 1877-1881.
13. Lee, S. W., Cho, Y. H., Lee, H. J., Kim, N. C. ve Chun, S. J., Rate of Skid Resistance Loss for Tinned Concrete Pavements, TRB, 2005.
14. Açar, E., Sütaş, İ. ve Öztaş, G., Beton Yollar, İTÜ, İstanbul, 1998.
15. Özey, İ., Rijit Üstyapı ile Esnek Üstyapının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, 1992.

16. Cebon, D., Vehicle - Generated Road Damage: A Review, Vehicle System Dynamics, 18 (1989) 107- 150.
17. Gökten, A. G. ve Mitschke, M., Road Damage Caused By Heavy Duty Vehicles, International Journal of Vehicle Design, 16, 1 (January 1995).
18. Park, D. W., Fernando, E. ve Leidy, J., Evaluation of Predicted Pavement Response Using Measured Tire Contact Stresses, TRB, 1919 (2005).
19. Moore, D. F., The Friction of Pneumatic Tyres, Elsevier Ed, 1975.
20. Kuennen, T., Creating Friction Where Rubber Meets the Roads, Better Roads Magazine, October 2003.
21. Henry, J. J., Evaluation of Pavement Friction Characteristics. NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, Washington DC, 2000.
22. Bond E. A., Tyre/Road Surface Interaction, Journal of the Institution of Highway Engineers, November 1976.
23. Wambold, J. C., Friction Fundamentals Concepts and Methodology, Transport Canada, October 1999.
24. David, A. K., Ronald, C. S., James C. ve Yosef B., Noise and Texture on PCC Pavements, Report Number WS/SPR-08-99, Wisconsin University, 2000.
25. Noyce, D., Bahia, H., Yambó, J ve Kim, G Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements, Midwest Regional University Transportation Center, 2005
26. Roads Accident and Wet Surface Accident Profile Sheet Accident Information, State System (MD,US,IS), Maryland State Highway Administration, Office of Traffic and Safety, Traffic Safety Analysis Division, 2002
27. Açar, E. ve Taşdemir, Y., Silindir İle Sıkıştırılabilen Beton Yollar, THBB, 2007
28. Atış, C. D., Abrasion-Porosity-Strength Model For Fly Ash Concrete, Journal of Materials In Civil Engineering, July-August 2003.
29. Akkaya, Y. ve Taşdemir M. A., Beton Yollarda Kullanılan Malzemelerle İlgili Genel Bir Değerlendirme, THBB, 2007.
30. Sadegzadeh, M., Page, C.L. ve Kettle, R.J., Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete, Cement Concrete Research, 17, 4 (1987) 581–590.
31. OECD, Winter Damage To Road Pavements, Road Research Group, Paris, May 1972.

32. Felekoğlu, B., Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
33. Akakın, T., Almanya'daki Beton Otoyolların Yapım ve Tasarımında Son Gelişmeler, THBB, 2007.
34. Hall, J. W., Guide For Pavement Friction, NCHRP Project 1-43, Transportation Sector of Applied Research Associates (ARA).
35. Şimşek, O., Beton Bileşenleri ve Beton Deneyleri, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2004
36. TS EN 1097-8, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler –Bölüm 8: Taş Parlatma Değerinin Tayini, TSE, Ankara, 2004.
37. TS EN 1341, Cilalanmamış Kaymaya/Kızaklamaya Karşı Direnç Değerinin Ölçülmesi, TSE, Ankara, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

1973 de Trabzon'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Trabzon'da tamamladı. 1990 yılında K.T.Ü. Müh.-Mim. Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 1996 yılında Niğde Üniversitesi Aksaray Müh. Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Yüksek lisansını K.T.Ü. Fen Bil. Enstitüsünde "Asfalt Emülsiyonlu Soğuk Karışımlar" konusunda yaptı. Askerliğini bitirdikten sonra, geçici görevlendirme (35. madde) çerçevesinde aynı enstitüde doktora çalışması yapmak üzere görevine devam etti. Evlidir. İngilizce bilmektedir.