

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETON YOL İNŞAATINDA KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON'UN  
KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Seda MACİT**

**EYLÜL 2009**

**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETON YOL İNŞAATINDA KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON'UN  
KULLANILMASI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

**İnş. Yük. Müh. Seda MACİT**

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

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06.08.2009  
Tezin Savunma Tarihi : 10.09.2009**

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

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2009**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışmanın her aşamasında emeği geçen, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmeme yardımcı olan yönetici çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fazıl ÇELİK'e, iş hayatına atılmamda, yüksek lisans tezimde, doktora başlamamda, tez konumun seçiminde emeği geçen hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet ÇAKIROĞLU'na, çalışmalarım sırasında desteğini gördüğüm hocalarım Sayın Prof. Dr. Aslan DİLAVER ve Yrd. Doç. Dr. Atakan AKSOY'a, benden hiçbir yardımı esirgemeyen, hocalarım Sayın Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU, Yrd. Doç. Dr. Şeref ORUÇ, Yrd. Doç. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR ve Dr. Orhan KARPUZ'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarımı destekleyen ve katkı sağlayan Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğine de teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarımda bana destek verip, yardımcı olan Malzeme Laboratuvarında çalışmama olanak sağlayan hocalarım Sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM ve Yrd. Doç. Dr. Selim PUL'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Geoteknik ve Ulaştırma Laboratuvarı Teknisyenleri Fikret BÜLBÜL ve Uzm. Ali SEMERCİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca, laboratuvarlarında çalışma imkanını bana sunan Öztaş Hazır Beton Santraline ve yardımlarından dolayı Santral Şefi Sayın Serdal ALTINTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, bana güven veren ve desteklerini her zaman hissettiren, benim bugünlere gelmemi sağlayan başta merhum babam Necati MACİT olmak üzere, annem Rabia MACİT'e ve bütün aileme minnettar olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Seda MACİT  
Trabzon 2009

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa No

ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Amaç .....	2
1.3. Literatür .....	3
1.4. Yol Üstyapısı Tipleri .....	8
1.4.1. Esnek Üstyapı .....	8
1.4.2. Rijit Üstyapı.....	9
1.4.2.1. Taban Zeminleri.....	10
1.4.2.2. Kaplama Altı Tabakası .....	10
1.4.2.3. Beton Plaklar .....	11
1.5. Yol Üstyapısı Seçiminde Etkili Faktörler.....	12
1.5.1. Trafik .....	12
1.5.2. İklim.....	13
1.5.3. Maliyet.....	14
1.5.3.1. İlk İnşaat Maliyeti.....	14
1.5.3.2. Bakım Maliyeti .....	14
1.5.3.3. Yolu Kullananların Harcamaları.....	15
1.5.3.4. Finansman Kaynakları ve İskonto Oranı .....	15
1.5.4. Güvenlik ve Konfor .....	16
1.6. Beton Yollar.....	17
1.6.1. Beton Yolların Tarihçesi.....	17
1.6.2. Beton Yolların Tercih Sebepleri .....	18

1.6.2.1.	Daha Yüksek Mukavemet ve Daha Uzun Ömür .....	18
1.6.2.2.	Daha Kısa Duruş Mesafesi .....	19
1.6.2.3.	Tekerlek İzi Oluşumuna Karşı Direnç .....	19
1.6.2.4.	Ağır Taşıtlarda Enerji Tasarrufu .....	20
1.6.2.5.	Daha İyi Gece Görüşü .....	20
1.6.2.6.	Taşıma Gücü Yüksek .....	21
1.6.2.7.	Her Mevsim Her Koşulda Yapılabilir .....	22
1.6.2.8.	Doğal ve Kentsel Çevreye Zarar Vermez .....	22
1.6.3.	Yol Betonunda Üretim ve Uygulama .....	22
1.6.3.1.	Üretim .....	23
1.6.3.2.	Uygulama .....	23
1.6.4.	Yol Yapımında Kullanılan Beton Tür ve Teknikleri .....	23
1.6.4.1.	Akıcı Beton .....	23
1.6.4.2.	Kuru Yoğun Beton .....	24
1.6.4.3.	Lifli Beton .....	24
1.6.4.4.	Öngermeli Beton .....	24
1.6.4.5.	Sürekli Betonarme .....	24
1.6.4.6.	Geçirimli Beton .....	25
1.6.5.	Beton Yolların Performansı .....	25
1.6.5.1.	Beton Yolların Yapımı ve Performansını Etkileyen Unsurlar .....	25
1.6.5.2.	Uzun Süreli Performans İçin Alınacak Önlemler .....	26
1.6.6.	Beton Yolda Oluşabilecek Bozulma .....	27
1.6.6.1.	Projelendirme Hataları .....	27
1.6.6.1.1.	Plak Kalınlığının Yetersizliği .....	27
1.6.6.1.2.	Uygun Olmayan Derz Aralıkları .....	27
1.6.6.1.3.	İklim Etkisinin İhmali .....	28
1.6.6.1.4.	Ağır Yükleme .....	28
1.6.6.1.5.	Beton Bileşim Hesaplarındaki Hatalar .....	28
1.6.6.2.	İnşaat Hataları .....	28
1.6.6.2.1.	Erken veya Geç Perdah .....	28
1.6.6.2.2.	Derz Yapımındaki İmalat Hataları .....	29
1.6.6.2.3.	Alt yapının Sağlam Olmaması .....	29
1.6.6.2.4.	Homojen Olmayan Beton .....	30

1.6.6.2.5.	Sıkıştırma Hataları veya Yokluğu .....	30
1.6.6.2.6.	Malzeme Kalitesindeki Yetersizlik.....	30
1.6.6.2.7.	Dökülen Betonun Korumadaki İhmal ve Yetersizlik .....	30
1.7.	Beton Karışımında Kullanılacak Malzemeler ve Özellikleri.....	31
1.7.1.	Çimento.....	31
1.7.2.	Agrega.....	32
1.7.2.1.	Agregalar Üzerinde Yapılacak Deneyler .....	35
1.7.2.1.1.	Elek Analizi .....	36
1.7.2.1.2.	Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri (TS EN 1097-6).....	36
1.7.2.1.2.1.	İnce Agreganın Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranının Tayini.....	37
1.7.2.1.2.2.	İri Agreganın Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranının Tayini .....	38
1.7.3.	Beton Karma Suyu.....	39
1.7.4	Katkı Malzemesi .....	40
1.8.	Beton Yolların Mekanik Özellikleri .....	41
1.8.1.	Basınç Dayanımı.....	41
1.8.2.	Eğilmede Çekme Dayanımı .....	42
1.8.3.	Aşınma Direnci .....	42
1.8.3.1.	Aşınma Direnci Ölçüm Yöntemleri .....	44
1.8.4.	Durabilite Özellikleri .....	45
1.8.4.1.	Donma Çözülme Direnci .....	46
1.8.4.2.	Kimyasal Maddelere Karşı Direnç .....	47
1.9.	Yüksek Dayanımlı Betonlar .....	48
1.9.1.	Betonun Yorulma Dayanımı.....	50
1.10.	Kendiliğinden Yerleşen Beton.....	51
1.10.1.	Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tarihçesi.....	52
1.10.2.	Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları ve Dezavantajları.....	52
1.10.2.1.	Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları.....	53
1.10.2.2	Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları .....	53
1.10.3.	Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları.....	54
1.10.4.	Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneyleri .....	55
1.10.4.1.	Çökme Yayılma Deneyi.....	58
1.10.4.2.	V Funnel Akış Deneyi .....	59
1.10.4.3.	U Box Deneyi .....	60

1.10.4.4.	Fill-Box Metodu .....	61
1.11.	Beton Yolların Yüzey Yapısı.....	61
1.11.1.	Geometrik Düzgünlük .....	62
1.11.2.	Pürüzlülük.....	63
1.11.2.1.	Mikro Pürüzlülük.....	63
1.11.2.2.	Makro Pürüzlülük .....	64
1.11.2.3.	Mega Pürüzlülük.....	64
1.11.2.4.	Pürüzlülük-Lastik Aşınması İlişkisi .....	64
1.11.3.	Sürtünme Katsayısı.....	65
1.11.3.1.	Tekerlek-Yol Etkileşim Mekanizması .....	66
1.11.3.2.	Yanal Sürtünme Kuvveti .....	70
1.11.3.3.	Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri.....	70
1.11.3.4.	Sürtünme Katsayısı- Pürüzlülük İlişkisi .....	72
1.11.3.5.	Sürtünme Katsayısının Trafik Kazalarına Etkisi .....	73
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	76
2.1.	Amaç .....	76
2.2	Kapsam .....	76
2.3.	Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	78
2.3.1.	Çimento.....	78
2.3.2.	Agrega.....	79
2.3.2.1.	Elek Analizi .....	79
2.3.2.2.	Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri.....	82
2.3.3.	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı.....	83
2.3.4.	Uçucu Kül .....	85
2.4.	KYB Bileşimi Tasarımı .....	86
2.4.1.	KYB Üzerinde Yapılan Deneyler .....	92
2.4.1.1.	Çökme Yayılma Deneyi.....	92
2.4.1.2.	V Funnel Akış Deneyi .....	93
2.5.	Sertleşmiş Beton ile İlgili Bilgiler .....	94
2.5.1.	Beton Dayanımı .....	96
2.5.1.1.	Beton Basınç Dayanımı .....	96
2.5.1.1.1.	Beton Basınç Dayanımının Standart Deney Yöntemi ile Elde Edilmesi.....	97
2.5.1.2.	Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımı .....	99

2.5.1.2.1.	Doğrudan Çekme Dayanımı .....	100
2.5.1.2.2.	Yarmada Çekme Dayanımı (Dolaylı Çekme Dayanımı).....	101
2.5.1.2.3.	Eğilme Dayanımı (Eğilmede Çekme Dayanımı).....	102
2.5.2.	Yüzey Aşınma Direncinin Belirlenmesi .....	105
2.5.3.	Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi .....	107
3.	BULGULAR VE İRDELEME .....	112
3.1.	KYB Deneylerinin Sonuçlarının İrdelenmesi.....	112
3.2.	Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuçlarının İrdelenmesi .....	112
3.2.1.	Beton Basınç Dayanımı .....	112
3.2.2.	Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı .....	113
3.3.	Yüzey Aşınma Direncinin ve Sürtünme Katsayısının İrdelenmesi .....	114
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
5.	KAYNAKLAR .....	118
ÖZGEÇMİŞ		



## ÖZET

Bir ülkenin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve standartta olması o ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesidir. Gelişmiş ülkelere göre ülkemizdeki yol ağı yetersiz kalmakta, buna karşın yollarımızdaki özellikle ağır taşıt trafiği artmaktadır. Bu durum üstyapıda önemli problemlerin çıkmasına neden olmakta, mali kaynakların da sınırlı olması konunun önemini daha da arttırmaktadır. Bu nedenle bir karayolu yatırımının proje ve inşaat safhalarında optimum çözümlerinin üretilmesi gerekmektedir.

Günümüzde karayollarının büyük çoğunluğunu asfalt yollar oluşturmaktadır. Gelişmiş ülkelerin aksine ülkemizde beton yol uygulamalarına daha yeni başlanmıştır. Beton hammaddelerinin yerel kaynaklardan temin edilebilme imkânı beton yolları cazip hale getiren başlıca etmendir.

Kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) yol betonu olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmanın birinci bölümünde, günümüzde beton yolların önemi, üstünlükleri ve sakıncaları, projelendirme ve malzeme seçiminde dikkate alınacak esaslar, KYB'ye genel bir bakış ve beton yolların yüzey yapısıyla ilgili genel bilgiler anlatılmıştır. İkinci bölümde ise, bazalt ve kireçtaşı olmak üzere iki farklı tip agrega ile KYB tasarımları oluşturulmuş, bazalt agregalı karışıma çimento miktarını azaltarak uçucu kül ilavesiyle başka bir tasarım daha hazırlanmıştır. Elde edilen KYB'nin özelliklerini karşılaştırmak amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı katılmadan Kontrol Karışımı adı verilen geleneksel beton hazırlanmıştır. Elde edilen bu beton karışımların basınç, eğilmede çekme dayanımları tekerlek yükü altında aşınmaları ve sürtünme katsayıları araştırılmıştır, veriler tablo ve grafikler halinde gösterilmiştir. Üçüncü bölümde ise, deneylerden elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Dördüncü bölümde varılan sonuçlar açıklanmış, bu çalışmadaki noksanlıkların giderilmesi ve geliştirilmesi için devamında yapılacak çalışmalara dikkat çekilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinden Yerleşen Beton, Beton Yollar, Basınç Dayanımı, Eğilmede Çekme Dayanımı, Sürtünme Katsayısı

## SUMMARY

### **An Investigation On The Use Of Self Compacting Concrete In Concrete Road Construction**

Adequacy and standards of transportation network of a country is an indicator of its development level. Road network in Turkey is insufficient as compared to developed countries; on the other hand, traffic, especially heavy vehicle traffic, in our roads is continuously increasing. This leads to serious problems to occur in road superstructure; limited financial resources make the subject more important. For this reason, optimum solutions should be generated in design and construction phases of a highway investment.

Today, asphalt roads constitute a big portion of highways. In contrast to developed countries, concrete road applications have begun recently in Turkey. The leading factor that makes concrete roads attractive is opportunity of supplying its raw materials from local sources.

In this study, use of self compacting concrete (SCC) as road concrete was investigated. In first part, importance, advantages and disadvantages of concrete roads, principles in design and material selection, a general look to SCC and general knowledge about surface structure of concrete roads were given. In second part, SCC mix designs were prepared by using two different types of aggregates, namely basalt and limestone. Also, another mix was prepared by lowering cement amount of basalt aggregated design and adding fly ash into it. A Control Mix, which does not include super plasticizer, was prepared for comparison of properties of SCC. Compressive strengths, flexural strengths, wearing amounts under wheel loads, and friction coefficients of these mixes were investigated and results were presented in tables and graphs. In third part, results were examined. In fourth part, results were explained and recommendations for future studies were given.

**Key Words:** Self Compacting Concrete, Concrete Roads, Compressive Strength, Flexural Strength, Coefficient of Friction

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Tipik bir esnek üstyapı en kesiti.....	9
Şekil 2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları .....	10
Şekil 3. Yol yüzeyine tekerlekten gelen kuvvetler .....	12
Şekil 4. Asfalt ve beton yolda çeşitli hızlarda sıcaklığa bağlı olarak yakıt tüketimi değişimi (THBB, 2002). .....	20
Şekil 5. Beton kaplama yol ve asfalt kaplama yolun gece görünüşü (THBB, 2002). .....	21
Şekil 6. TS 706 EN 12620 beton agregası referans eğrileri .....	35
Şekil 7. Böhme aşınma test aleti.....	44
Şekil 8. Los Angeles aşınma test aleti .....	45
Şekil 9. Yayılma tablası ve hunisi boyutları.....	59
Şekil 10. V funnel aleti ve ebatları .....	59
Şekil 11. U box aleti .....	60
Şekil 12. U box deneyinin uygulama şekli .....	60
Şekil 13. Fill box aleti.....	61
Şekil 14. Yol yüzey özelliklerindeki farklı durumların basit gösterimi (Piarç, 1987). .....	62
Şekil 15. Yol yüzey özelliklerinin araçlara etkisi (Piarç, 1987). .....	64
Şekil 16. Tekerlek ile yol temas noktalarındaki sürtünme kuvvetleri(Henry, 2000).....	67
Şekil 17. Sürtünme katsayısı değerinin frenleme derecesiyle değişimi (Henry, 2000).....	68
Şekil 18. Sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi (Henry, 2000).....	68
Şekil 19. İngiliz sürtünme pandülü ve Japon dinamik sürtünme ölçer.....	71
Şekil 20. Dinamik sürtünme ölçüm araçları .....	72
Şekil 21. Hız ve pürüzlülük durumuna göre sürtünme katsayısının değişimi (Henry, 2000). .....	73
Şekil 22. Tip1 ve Tip 2 karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri .....	80
Şekil 23. Tip 3-1 ve kontrol karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri .....	81
Şekil 24. Tip 3-2 karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri .....	82
Şekil 25. ViscoCrete 5W katkı ile oluşturulan numuneler .....	84
Şekil 26. Tip 2 karışımların hazırlanması.....	87
Şekil 27. Tip 3-1 karışımların hazırlanması .....	89
Şekil 28. Tip 3-2 karışımların hazırlanması .....	90

Şekil 29. Çökme yayılma deneyi .....	93
Şekil 30. V-Funnel deneyi .....	94
Şekil 31. Betonun kalıplara yerleştirilmesi .....	95
Şekil 32. Hazırlanan küp ve silindir numuneler .....	95
Şekil 33. Basınç dayanımı deneyi.....	98
Şekil 34. Basınç dayanımı grafiği.....	99
Şekil 35. Yarma deneyi uygulama düzeni .....	101
Şekil 36. Kirişin orta noktasından yüklenmesi durumunda eğilme deneyi yöntemi .....	102
Şekil 37. Eğilmede çekme dayanımı deneyi.....	104
Şekil 38. Eğilmede çekme dayanımı grafiği.....	105
Şekil 39. Tekerlek dönüşü ile betonda oluşacak aşınmanın ölçülme düzeneği .....	107
Şekil 40. Sürtünme katsayısı ölçümünde düzeneğin durumu .....	108
Şekil 41. Numunelerden sürtünme katsayısı ölçümü alınması .....	109
Şekil 42. Her üç tür karışım için sürtünme katsayısı değişimi .....	111

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Agrega granülometrisi referans eğrileri.....	34
Tablo 2. İnce agreganın birim hacim ağırlığının tespiti için numune miktarı .....	37
Tablo 3. İri agreganın birim hacim ağırlığının tespiti için numune miktarı .....	38
Tablo 4. Trafik yoğunluğuna göre olması gereken dayanım değerleri (Ağar ve Taşdemir, 2007).....	42
Tablo 5: KYB'nin tasarım yöntemine göre tavsiye edilen malzeme miktarları .....	56
Tablo 6. KYB test metodları ve kabul edilebilir limit değerleri (EFNARC, 2002). .....	58
Tablo 7. Bazı durumlardaki statik ve kinetik sürtünme katsayısı değerleri (Karpuz, 2008).....	66
Tablo 8. Yol yüzeyi durumuna göre kızaklamada sürtünme katsayısı kaybı değerleri (Kuennen, 2003). .....	69
Tablo 9. Yol kesimine ve kamyon trafiği yoğunluğuna göre olması gereken agrega cilalanma değeri ve sürtünme katsayısı değerleri (Karpuz, 2008). .....	75
Tablo 10. Çimento özellikleri .....	78
Tablo 11. Agrega granülometrisi .....	80
Tablo 12. Tip 3 karışım granülometrisi .....	81
Tablo 13. Agregalar üzerinde yapılan deney sonuçları .....	83
Tablo 14. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları.....	85
Tablo 15. 1 m <sup>3</sup> karışım için malzeme miktarları .....	92
Tablo 16. KYB de kabul edilebilir limit değerleri ve deney sonuçları .....	94
Tablo 17. Numunelerin basınç dayanımları.....	98
Tablo 18. Numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	104
Tablo 19. Tip 2, Tip 3-1 ve Tip 3-2 karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları .....	110

## SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Numunenin kesit alanı
$A_{ince}$	: İnce agrega ağırlığı
$A_{iri}$	: İri agrega ağırlığı
b	: Kiriş kesitinin eni
c	: Tarafsız eksen ile kiriş yüksekliğinin en uç noktası arasındaki uzaklık, yani $d/2$
C	: Çimento miktarı
CBR	: Taban zemini taşıma gücü
d	: Kiriş kesitinin yüksekliği
D1, D2	: Yayılma tablasında farklı iki noktadan yayılma çapları
DKY	: Doymun kuru yüzey
F <sub>k</sub>	: Kinetik sürtünme kuvveti
F <sub>s</sub>	: Statik sürtünme kuvveti
I	: Atalet moment (dikdörtgen kesitler için $I = bd^3/12$ ; kare kesitler için $I = D^4/12$ )
KYB	: Kendiliğinden yerleşen beton
L	: Beton kirişte mesnetler arası mesafe
M	: Maksimum moment
M1	: Malzemenin etüv kurusu ağırlığı
M2	: Malzemenin DKY ağırlığı
M3	: Ölçü kabı + su + Numune ağırlığı
M4	: 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı
mi	: İnce agreganın su emme oranı
N	: Normal kuvvetin büyüklüğü
P	: Numunenin kırılmasına yol açan maksimum yük miktarı
PÇ	: Portland çimentosu
PKÇ	: Portland kompoze çimento
RPC	: Reaktif pudra betonları
t50	: Yayılma tablasında 50 cm çapa ulaşmcaaya kadar geçen süre
TÇ	: Traslı çimento
$V_{Ag}$	: Agrega hacmi
W	: Su miktarı

W/C	: Su imento oranı
%P	: Her bir elek için geçen yüzde
$\rho_K$	: İnce agreganın kuru birim hacim ağırlığı
$\rho_D$	: İnce agreganın DKY birim hacim ağırlığı
$\rho_G$	: İnce agreganın görünen birim hacim ağırlığı
$\lambda$	: Yol yüzeyinde sapmaların dalga boyu
$\mu_s$	: Statik sürtünme katsayısı
$\mu_k$	: Kinetik sürtünme katsayısı
$\gamma_c$	: Çimentonun zgl ağırlığı
$\gamma_{iri}$	: İri agreganın özgül ağırlığı
$A_{iri}$	: Nem düzeltmesi yapılmış iri agreganın ağırlığı
$\gamma_{ince}$	: İnce agreganın özgül ağırlığı
$A_{ince}$	: Nem düzeltmesi yapılmış ince agreganın ağırlığı
$\sigma$	: Basınç dayanımı (maksimum basınç gerilmesi),
$\sigma_{}$	: Betonun ekme dayanımı
$\sigma_e$	: Eğilme dayanımı,
$\gamma_c$	: Betonun zgl ağırlığı

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Gerek yeni karayolu yapımında, gerekse üstyapı yenileme çalışmalarında yol üstyapı tipinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Seçim yapılırken; üstyapı tipleri teknik ve ekonomik yönden, bölgesel özellikler ve ülke koşulları da dikkate alınarak karşılaştırılmalı ve bunların sonucunda bir karara varılmalıdır.

Yol üstyapısını esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Esnek üstyapılarda, temel ve alttemel üzerine bitümlü kaplama inşa edilir. Temel ve alttemel genellikle granüler malzeme ile yapılmaktadır.

Rijit üstyapılarda ise; kaplama tabakası, kum, iri agrega, portlant çimentosu ve su karışımından oluşan tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipi olup gerektiğinde granüler bir kaplama altı tabakası da kullanılabilir. Rijit üstyapıda yük, büyük oranda elastik temel üzerine oturan plak tarafından karşılanmaktadır.

Rijit kaplama olarak bilinen beton yol; gerek malzeme performansı, gerekse yapım yönteminin güvenilirliği açısından orta ve yüksek trafik hacmi taşıyan, özellikle hız yapılmasına uygun ortam sağlanmış karayollarında en verimli mühendislik hizmeti verecek standartlarda bir üstyapı türüdür.

Beton yolların diğer yapı elemanlarına kıyasla dikkat edilmesi gereken en belirgin özelliği yüzey yapısıdır. Yollar şiddetli çevresel etkilere maruzdur, bu bakımdan diğer bütün yapılarda olduğu gibi beton yollarda da dayanıklılık (durabilite) önemlidir. Beton yolların tasarımı, dayanımdan çok durabiliteye göre yapılmalıdır.

Yol kaplaması olarak betonun görevi, trafikten gelen şiddetli tekil yükleri tabana iletmek ve bu sırada tabanın deforme olmamasını sağlamaktır. Bu durum, betonun rijitliğinden yararlanmak sonucunu doğurur. Bir beton kaplamanın davranışı, dökülen beton tabakalarının özelliklerinin yanı sıra, kaplama altına serilen alt temel ve temel tabakaları ile mevcut taban zemininin özelliklerine bağlı olarak da değişir. Bu nedenle projelendirme sırasında, beton kaplamanın davranışını etkileyen, taban toprağı, temel malzemesi, betonu oluşturan kum, çakıl, çimento ve betonarme demiri gibi malzemelerin fiziksel özelliklerinin çok iyi incelenmesi gerekmektedir (Ağar vd., 1998).



Betonun bileşenleri çimento, mineral agrega, su, işlenebilirliği arttırıcı veya prizi geciktirici kimyasal katkılardır. Bu etkenlere, betonun kürü için gereken malzemeler ve derz dolgu malzemeleri de eklenebilir. Belirtilen bileşenlerin her birinin amaçlanan özelliklerin elde edilmesindeki katkısı oldukça önemlidir. Bu nedenle her bir bileşenin karışımdaki görevinin gözden geçirilmesi, ilgili kural ve sınırların tayini, kullanım sırasındaki özel koşulların belirtilmesi gerekli olmaktadır.

## 1.2. Amaç

Bu çalışmanın temel amacı; KYB'yi aynı granülometriye sahip geleneksel beton ile mukayeseli olarak inceleyerek, KYB'nin yol inşaatlarında kullanılabilirliğini araştırmaktır. KYB, kolay yerleşmesi, sıkıştırma aracı (vibratör) gerektirmemesi, ayrışma direncinin yüksek oluşu, yüksek durabilite özelliği gibi nedenlerle yüksek başarılı (performanslı) beton üretimine olanak vermektedir. KYB'nin bileşimi, etkin süperakışkanlaştırıcı yanında toplam ince malzeme miktarı, viskozite artırıcı katkı kullanımı, su/bağlayıcı oranı, maksimum agrega boyutu, kum/toplam agrega oranı ve toplam iri agrega miktarı gibi parametreler açısından geleneksel betondan farklılık gösterir. Betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktör beton döküm işçiliğidir. Kendiliğinden yerleşme özelliği sayesinde, adından da anlaşılacağı gibi, şantiyede betonun yerleştirilmesi sırasında meydana gelebilecek işçilik hataları riskini ortadan kaldırır. Durabiliteyi etkileyen diğer nedenler ise çevre koşullarıdır. Beton çevre koşullarına geçirimsizlik özelliği sayesinde karşı koyar. Geleneksel betonlara göre daha kompakt ve geçirimsiz bir yapıya sahip olan bu beton türü, bu özelliği sayesinde de durabilite açısından yapıların çok daha avantajlı bir konuma gelmesini sağlamaktadır.

KYB herhangi bir vibrasyon gerektirmeksizin, kendi ağırlığı altında hareket ederek döküldüğü kalıbı boşluk bırakmadan doldurabilir. Ayrıca, bu doldurma işlemi sonunda herhangi bir segregasyona da uğramaz (Okamura, 1997). KYB işçiliği azaltırken yapım hızını da arttırmaktadır. KYB'ler düşük su/bağlayıcı oranına sahip olmaları nedeni ile hem yüksek dayanıma hem de üstün durabilite özelliğine sahip olmakta ve bu nedenle yüksek başarılı (performanslı) betonlar sınıfına sokulabilmektedir. Ayrıca KYB'lerin ayrışma direnci de oldukça yüksek olduğu belirtilmektedir (Özkul, 2002). Bu özelliği sayesinde trafiğin aşındırıcı etkilerine karşı mukavemet sağlayabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde beton performansını arttırabilecek birçok katkı malzemeleri bulunmaktadır. Bunlar doğal olarak beton maliyetinin artışına neden olmaktadır. Ancak beton performansına olumlu katkı sağladığından dolayı bu artış kabul edilebilmektedir. Aynı durumun, beton yol yapımı için de geçerli olduğu düşünülmektedir..

### 1.3. Literatür

Özturan (1984), % 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 yapmıştır. 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 varmıştır.

Fwa ve Tan (1992), kayma direnci-mikro texture ilişkisini granit ve demir cürufu kullanarak incelemişlerdir. Agrega yüzeyinin farklı sertliğe sahip minerallerden oluşmasının sürtünmeyi olumlu yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Ghafoori ve Sukandar (1995), beton plak kaplamaların aşınma dirençlerini ASTM C779 Procedure C Ball Bearing aşınma deneyini kullanılarak incelemişlerdir. Beton karışımındaki agrega ve çimento harcı fazlarının hacim oranlarının önemli olduğu, aşınma direncinin diğer dayanımlardan daha fazla bu orandan etkilendiği sonucuna varmışlardır.

Ramadhan ve Abdulwahhab (1997), sıcaklığın gerek rijit gerekse esnek kaplama performansını etkileyen en önemli etkenlerden biri olduğunu vurgulayarak, tasarım ve analiz için işlemlerin geliştirilmesinde özel bir dikkat ve ilgi gerektirdiğini belirtmişlerdir. Her iki kaplama türü için yapılan arazi deneyleri sonucunda sıcaklık farklarının oluşturduğu değişimleri modellemişler ve bu modellerin kaplama tasarım ve analizi için gerekli olduğu sonucuna varmışlardır.

Ghafoori ve Diawara (1999), silis dumanının betonun aşınma dayanımına etkisini ASTM C779 Procedure C Ball Bearings aşınma deney yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Değişik su/çimento oranları ve çimento miktarlarında yapılan deneylerden %10 a kadar silikanın fillerle yer değiştirmesinin ve W/C oranının düşmesinin aşınma dayanımını artırdığı, aşınma derinliği ile basınç dayanımı arasında direkt bağlantı olduğu sonucuna varmışlardır.

Momber (2000), iri kum danelerini sert beton yüzeylere çok hızlı çarptırıldığında oluşan aşınmayı ağırlık kaybı, yüzey topoğrafyası ve optik inceleme bakımından değerlendirmiştir.

Karadelis (2000), rijit kaplama sistemlerinin performansını ve davranışını belirlemek ve denetlemek için yıkıcı olmayan deney tekniğinde düşen ağırlık deflektometresini kullanmışlardır. Çok tabakalı kaplama sistemlerini çözümlmek için malzeme ve geometrik özellikleri içeren bir sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve ölçülen yüzey defleksiyonları ile hesaplanan değerler arasında ilişki kurulmuştur.

Hadi ve Arfiadi (2001), optimum rijit yol kaplaması tasarımı problemi için kaplama malzemelerinin toplam maliyeti ve tasarımını etkileyebilecek kısıtlamalar gibi amaçlanan fonksiyonların tanımlanmasıyla bir formülasyon sunmuşlardır. Optimum tasarımını bulmak için genetik algoritmayı kullanmışlar ve sonuçları Newton-Raphson optimizasyon çözümüne dayanarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Persson (2001), kendiliğinden sıkışan betonun (SCC) dayanım, elastiklik modülü, sünme ve büzülme gibi mekanik özellikleri üzerine deneysel ve sayısal olarak bir çalışma yapmış ve benzer özelliklerdeki normal sıkışan betonla karşılaştırmışlardır. SCC'in elastiklik modülü, sünme ve büzülme değerlerinin benzer normal betondan önemli farklılıklar gösterdiğini belirtmişlerdir.

Sonebi ve Khayat (2001), yüksek basınç dayanımlı (120 MPa ) betonların aşınma dirençlerini ASTM C779 Procedure C, testereyle kesme ve ASTM C1t 38 deney yöntemlerine göre incelemişlerdir.

Su vd. (2001), kendiliğinden yerleşen beton için yeni bir karışım tasarım yöntemi oluşturmuşlardır. Japon Hazır Beton Birliğinin (Japanese Ready-Mixed Concrete Association) hazırladığı yöntemle karşılaştırıldığında; bu yeni yöntemin daha basit, uygulaması daha kolay, daha az zaman ve daha az miktarda binder gerektiren ve maliyeti düşüren bir yöntem olduğu vurgulamışlardır. Yapılan deneyler sonucunda bu yöntemle üretilen betonun daha başarılı ve yüksek kalitede olduğunu da belirtmişlerdir.

Grünwald ve Walraven (2001), kendiliğinden yerleşen betonun çeşitli ekonomik ve teknik faydalar sunduğunu, bu imkânların çelik donatı kullanılmasıyla daha da arttırılacağını belirtmişlerdir. Çelik donatıların betonun yayılmasını yavaşlatırken birçok özelliğinin gelişmesini sağladığını, bunun üzerine sade KYB ve çelik liflerle güçlendirilmiş KYB'nin özelliklerini karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. KYB'nin

çalışabilirliğini; çelik donatı içeriği ve tipi, kaba agrega miktarının etkisi ve uygulanan deney yöntemlerinin uygunluğunun nasıl etkilediği tartışmışlardır.

Akter vd. (2002), USA Kansas'da 1992 den sonra yapılmış 21 beton yol kaplamasının yüzeylerini incelemiştir. Betonun kopma modülünün, temel malzemesinin, kaplama yüzeyi ıslak gün sayısının ve başlangıç sürtünme katsayısının sonraki sürtünme katsayısını etkilediği; aşınmanın çoğunun 3–5 yıl içinde olduğu; eğilme dayanımının aşınma dayanımını etkilediği sonuçlarına varmışlardır.

Atiş (2002), 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 varmıştır.

Donza vd. (2002), kaba agrega, çimento tozu, su/çimento oranı ve slump miktarını sabit tutup granit, kalker ve dolomit kaynaklı kırma ince agrega ile doğal dere kumuyla hazırladıkları farklı kür sürelerine sahip yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı ve elastisite modülü değerlerini karşılaştırmışlardır. Köşeli kum kullanımının basınç dayanımını artırdığı ancak elastisitenin aynı olduğu, kür şartlarının bu sonucu değiştirmediği, granit kökenli ince agregayla hazırlanan betonun daha büyük basınç dayanımı verdiği sonucuna varmışlardır.

Xie vd. (2002), (ultrapulverized) uçucu kül ve süperplastikleştirici içeren yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen beton teknolojisinin hazırlanmasını incelemiştir. Parametrelerin uygun karışım oranlarının seçimiyle, uygulanabilir, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek durabilitesi olan kendiliğinden yerleşen beton geliştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları taze karışımın düşük çökme kaybına sahip olduğunu göstermiş, betonun basınç dayanımının 80 MPa çıktığını, düşük permabilite, iyi donma-çözülme direnci ve düşük kuruma rötresi olduğunu belirtmişlerdir.

Bui vd. (2002), kendiliğinden yerleşen betonun ayrışma direncini test etmek için basit bir alet ve hızlı bir yöntem geliştirmişlerdir. KYB'nin bu kapsamlı deney programına su-bağlayıcı oranı, kaba ve ince agrega arasındaki bileşim ve çimento ve mineral bileşenlerin tip ve oranlarındaki değişimleri uygulanabilmektedir.

Geiker vd. (2002), taze betonun reolojik (yük, şekil değiştirme, zaman faktörleri altında cisimlerin davranışlarının incelemesi) özelliklerinin incelendiği deney süresince bükülme momentini incelemiştir.

Ho vd. (2002), KYB uygulamasında taş ocağı tozu gibi alternatif malzemelerin değerlendirilmesini incelemişlerdir. Geleneksel kireçtaşı kullanımı ile yapılan beton karışımlarla ocak tozu ile yapılan karışımları karşılaştırmış, ocak tozunun KYB üretiminde başarılı olduğu ancak şekline ve parçacık boyutu dağılımına göre ocak tozu ile yapılan karışımların benzer akışkanlık özelliklerine ulaşması için daha yüksek dozajda süperakışkanlaştırıcı gerektirdiği sonucuna varmışlardır.

Yang ve Jiang (2003), geçirgen beton kaplamayı yol kaplaması olarak kullanmışlardır. Geçirgen beton kaplamanın dayanımının yaygın malzeme ve yöntemlerin kullanılmasıyla yapılandan daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Geçirgen betonda, küçük boyutlu agrega olarak silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı kullanılması ile geçirgen betonun dayanımını oldukça arttırabilmişlerdir. Bu malzemenin su nüfuzuna karşı, absorpsiyon direnci, donma ve çözülmeye karşı durabilitesinin de çok iyi olduğunu belirtilmiştir. Yaya kaldırımı ve araç yolu için uygulanabileceği ve bu malzemenin çevreye dost bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

Eren ve Yılmaz (2003), yüksek dayanımlı lif donatılı beton (YDLDB)'un darbe direncini ölçmek için geliştirilen yöntem kullanılarak eğilmede çekme tokluk (EFT) ile darbe enerjisi (EI) arasında logaritmik bir ilişki olduğu göstermişlerdir. Sonuçlar irdelendiğinde, liflerin yüksek mukavemetli betonda darbe direncini ve eğilmede çekme tokluğunu iyileştirdiği ifade etmişler ve eğilmede çekme tokluğu ile darbe enerjisi arasında bir ilişki kurmuşlardır.

Persson (2003), filler oranı yükseltilmiş, farklı oranda hava içiren kendiliğinden yerleşen betonun tuz donma derecesi (salt frost scaling) ve içsel donma dayanımını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Sonuçları aynı oranlarda su ve hava içeren normal betonla karşılaştırmış, kendiliğinden yerleşen betonun normal betonla kıyaslandığında içsel donma direncinde önemli bir gelişme gösterdiği, tuz donma derecesi çok veya az performans gösterdiğini ama donma direnciyle betonun hava boşluklu yapısı arasında hiçbir ilişki bulunamadığı kanaatine varmıştır.

Siddique (2003) bir yıllık kürlü beton numuneler üzerinde yaptığı bir çalışmada ince agreganın %40'ının yerine uçucu kül kullanmanın aşınma dayanımını %40 artırdığı sonucuna varmıştır.

Zhu ve Bartos (2003), aynı dayanımda seçilmiş geleneksel vibrasyonlu referans betonlarla kendiliğinden yerleşen betonların geçirgenliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuçların KYB karışımların aynı dayanım derecesindeki geleneksel

betonlara oranla daha düşük oksijen geçirgenliğine sahip olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir.

Atiş vd. (2004), çeşitli oranlarda uçucu kül ve portland çimentosu içeren silindirle sıkıştırılabilen beton üretmişler ve bunların üzerinde çeşitli deneyler uygulamışlardır. Uçucu kül kullanımının standart olmamasına rağmen çimentonun ağırlıkça %15 ila %30 oranında kullanıldığında, portland çimentolu betonla kıyaslanabilecek hatta daha yüksek dayanıma ulaşabilen beton elde edilebilmektedir. Bulunan dayanım özelliklerinden söz konusu silindirle sıkıştırılabilen betonun yol kaplaması veya geniş plaklar için alternatif bir malzeme olabileceğini belirtmişlerdir.

Lee vd. (2004), ince kanal (tinning) ile pürüzlendirilmiş beton yollarda sürtünme katsayısı kaybı isimli çalışmalarında, enine ve boyuna doğrultularda 25mm arayla 3mm ince kanal (tining) yapmıştır. 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 incelemiştir. 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 pandulum friction tester ıslak sürtünme katsayısı ölçümlerinden elde edilen verilerden hareketle varmışlardır.

Poon ve Ho (2004), kendiliğinden yerleşen betonun segregasyona uğramaması için yüksek miktarda ince malzeme gerektirdiği üzerinde durarak, atık malzeme olan uçucu külün ince malzeme olarak kullanılabilirliğini incelemiştir.

Sonebi (2004), orta dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun malzeme maliyetinin pulvarize (toz haline getirilmiş) yakıt külü ve az miktarda süperakışkanlaştırıcı ile düşürülebileceğini belirtmiştir. Bu yönde gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda 210 kg/m<sup>3</sup>'e kadar toz haline getirilmiş yakıt külü kullanılarak oluşturulan orta dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun 28 günlük basınç dayanımının 30 ila 35 MPa'a yükseldiği sonucuna varmıştır.

Li vd. (2005), nano-TiO<sub>2</sub> ve nano-SiO<sub>2</sub> 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 kullanarak ve

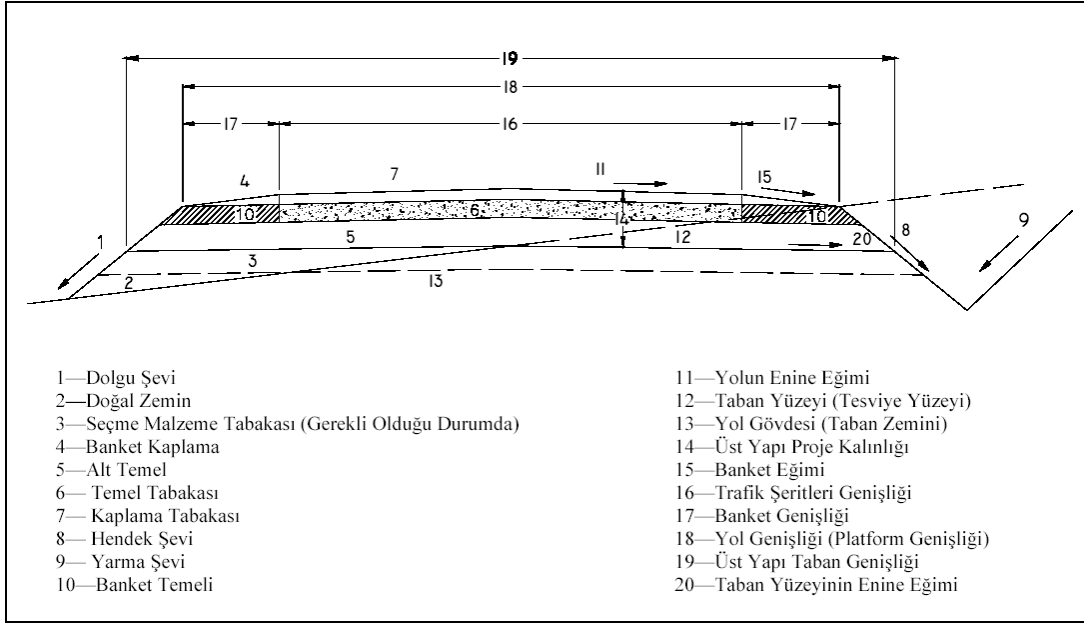
polipropilene fiber katarak incelenmiş, nano katkılı betonların aşınma dirençlerinin fiberli normal betondan daha fazla,  $TiO_2$  katkılı betonların aşınma direncinin  $SiO_2$  katkılı olanlardan daha fazla olduğu ve aşınma direnci ile beraber basınç dayanımının da arttığı, fazla nano parça kullanımının olumsuz etki yaptığı, bunun da su miktarının arttırılmamasından kaynaklandığı zira bu parçacıkların reaksiyon için suya ihtiyaç duydukları ve ayrıca fazla katıldıklarında harç içinde üniform dağılımlarının zorlaştığı, taze betonun düşük slump değerine sahip olmasının yerleşmiş betonun yüzeyinde oluşacak çimentosu yüksek tabakanın kalınlığını azalttığı ve aşınma direncini arttırdığı belirtilmiştir.

Zelić (2005), yüksek karbonlu demir metallerin üretiminde atık olarak kalan cürufun açık havada yavaşça soğutulmasıyla bazaltın mekanik özelliklerine yakın değerler elde edildiği belirtilmiştir; bu cüruftan elde edilen yapay agregayla ve kalker agregayla üretilen 28 günlük betonların ( $W/C=0.64$ ,  $350 \text{ kg/m}^3$  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 karşılaştırmış; 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 belirtilmiştir; söz konusu cürufla yapılacak betonlar, beton yol kaplamalarında kalker agregalı betonla yapılmış kaplama tabakalarının yüzeyine aşınma tabakası olarak önermiştir.

## **1.4. Yol Üstyapısı Tipleri**

### **1.4.1. Esnek Üstyapı**

Esnek üstyapı; kaplama, temel ve alttemel tabakasından oluşan bir üstyapı tipidir. Kaplama tabakası ise aşınma ve binderden 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). 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.

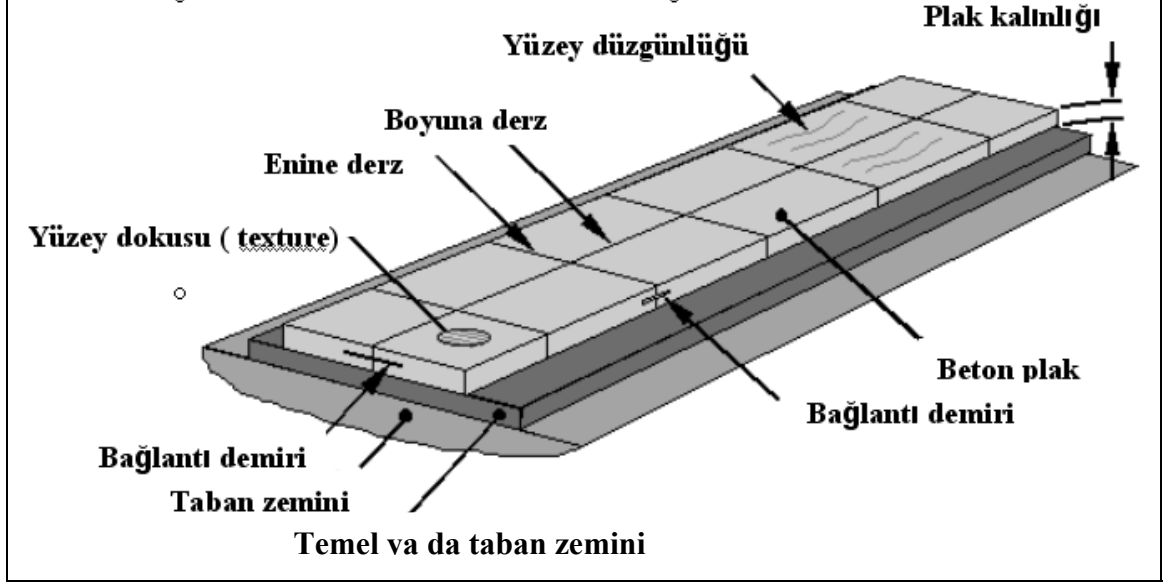


Şekil 1. Tipik bir esnek üstyapı enkesiti

#### 1.4.2. 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 zeminini üzerine yapılan beton plakalardan oluşur. Sürekli donatının kullanılmadığı beton yollarda enine ve boyuna genleşme derzleri konulur (Şekil 2). Don, pompaj, şişme-büzülme olaylarına karşı ise beton kaplama ile taban zeminini 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 zeminini ile sürekli temas halinde olduğu sürece taşıyıcı eleman vazifesi görür. Taban zeminini 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 (Ağar vd., 1998).





Şekil.2. Beton yol kesiti ve yapı elemanları

#### 1.4.2.1. 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 yöntemiyle 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.

#### 1.4.2.2. Kaplama Altı Tabakası

Beton kaplamaya zarar verecek aşağıdaki hallerden biri veya birkaçının mevcut bulunduğu hallerde, beton plak ile taban zemini arasına daneli malzemeden oluşmuş bir tabaka serilir. Bu tabakaya Alttemel 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" etkisidir.

Donma etkisi yer yer şiddetli dalgalanma hareketlerine sebep olur ki bu dalgalanma kaplama yüzeyinin düzgünlüğünü yok eder veya tabanda genleşmeye ve yumuşamaya 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 etkilenen zeminlerdendir. Yüksek hacim değişimi gösteren topraklara şişme ve büzülmeyi önlemek için şişme yapmayan granüler malzemenen 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 ve çakıldan oluşmuş granüler malzeme kullanılır. Kaplama altı tabakası en çok 15 cm' lik tabakalar halinde serilir.

#### **1.4.2.3. Beton Plaklar**

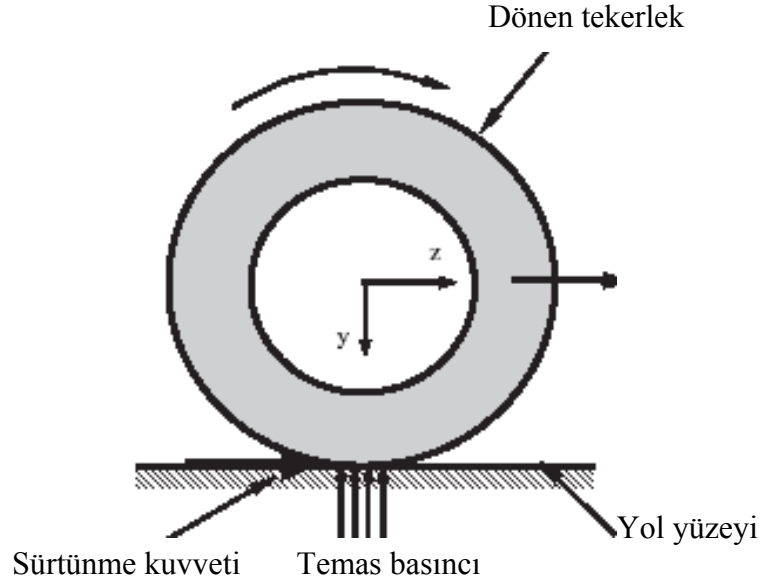
Beton yolların yüzeyleri kayma sakıncası göstermediği ve tutucu, pürüzlü olduğu için % 7'ye kadar boyuna eğim uygulanabilir. Daha fazla eğimli ya da daha pürüzlü bir beton yol isteniyorsa yüzeyin özel olarak pürüzlendirilmesi gerekir. Değişik pürüzlendirme teknikleri geliştirilmiştir. Teknik Şartnamelerde 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; 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 (Ağar vd., 1998).

## 1.5. Yol Üstyapısı Seçiminde Etkili Faktörler

### 1.5.1. 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 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 tekerrürüyle direkt ilgilidir.



Şekil 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  $T_{8.2}$  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  $T_{8.2}=0.5$  milyon ve

1 milyon, YOGATT 500 den fazla olan yollarımızı temsilen ise  $T_{8,2}=5$  milyon; 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 80km/saat' den 50km/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 (Ağar vd., 1998).

### 1.5.2. 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 başılamamıştır. 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.

### 1.5.3. 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.

#### 1.5.3.1. İlk İnşaat Maliyeti

Kaplama malzemelerin maliyeti:

Üst yapı tipleri için kullanılacak malzemelerin tasarımına 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 kullanılabilmektedir.

#### 1.5.3.2. 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.

### **1.5.3.3. 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 olmaması sebebiyle yük altında çok az deformasyon oluşacağından tekerlek yüzeyde daha kolay yuvarlanır.

### **1.5.3.4. 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 artarda 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 iskonto oranının yüksek, yol yatırım kaynağının sınırlı olması halinde esnek üstyapılar seçilir.

Özey (1992), yaptığı çalışmada şu sonuçlara ulaşmıştır:

- 1- Düşük trafik için esnek üstyapı maliyeti (TL/Km. olarak) rijit üstyapıdan yaklaşık %8 daha ucuzdur. Yüksek trafik için ise, rijit üstyapı maliyeti esnek üstyapı maliyetine(TL/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- Trafik T8.2=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 (T8.2>5milyon) ve hafif iklim koşullarında rijit üstyapı ekonomik olmakta, ağır iklim koşullarında ise durum, rijit üstyapı lehine dönmektedir.

#### **1.5.4. 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 (Karpuz, 2008).

## **1.6. Beton Yollar**

Bir ülkenin ulaşım ağının yeterli düzeyde ve standartta olması o ülkenin gelişmişliğinin bir göstergesidir. Gelişmiş ülkelere göre ülkemizdeki yol ağı yetersiz kalmakta, buna karşın yollarımızdaki özellikle ağır taşıt trafiği artmaktadır. Bu durum üstyapıda önemli problemlerin çıkmasına neden olmakta, mali kaynaklarında sınırlı olması konunun önemini daha da arttırmaktadır. Bu nedenle bir karayolu yatırımının proje ve inşaat safhalarında optimum çözümlerin üretilmesi gereklidir.

Gerek yeni karayolu yapımında, gerekse üstyapı yenileme çalışmalarında yol üstyapısı seçimi büyük önem taşımaktadır. Seçim yapılırken üstyapı tipleri teknik ve ekonomik yönden bölgesel özellikler ve ülke koşulları da dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak bir karara varılmalıdır. Yol üstyapısını, esnek ve rijit olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Esnek üstyapılarda, temel ve alttemel üzerine beton asfalt kaplama inşa edilir. Temel ve alttemel genellikle granüler malzeme ile yapılmaktadır.

Rijit üstyapılarda ise; kaplama tabakası, kum, iri agrega, portlant çimentosu ve su karışımından oluşan tek veya iki tabaka halinde dökülen bir üstyapı tipi olup gerektiğinde granüler bir kaplama altı tabakası da kullanılabilir. Rijit üstyapıda yük, büyük oranda elastik temel üzerine oturan plak tarafından karşılanmaktadır.

Beton Yolu diğer yapı elemanlarından ayıran en önemli özeliği yüzey özellikleridir. Ayrıca yollar şiddetli çevresel etkilere maruzdur. Bu bakımdan diğer bütün yapılarda olduğu gibi beton yollarda da dayanıklılık (durabilite) önemlidir. Beton yolların tasarımı, dayanımdan çok durabiliteye göre yapılmalıdır (URL-1).

### **1.6.1. Beton Yolların Tarihçesi**

Yapıda beton benzeri puzolanik bağlayıcı malzemelerin tarihteki ilk kullanımlarına, Mısır Piramitlerinde, Çin Seddinde ve Romalıların Pantheon gibi anıtsal yapılarında rastlanmakta ise de çimentonun bulunuşu ile betonarme yapıların inşası 19.Yüzyıl'da gerçekleşmiştir.



Romalıların M.Ö. I.Yüzyıl'da, puzolanik bağlayıcılarla biraraya getirilmiş taşlardan yaptıkları yollar, bugünkü beton yolların tarihteki ilk örnekleri sayılabilir. Ancak, bugünkü anlamıyla beton yollar konusundaki ilk denemeler 19.Yüzyıl'da İskoçya (1865), Avustralya (1880) ve A.B.D.' de rastlanmaktadır. 1891 yılında Ohio'da yapılan bir cadde, Amerika'daki en eski beton yoldur ve bugün de hizmet vermeye devam etmektedir.

Zaman içerisinde betonun üretim, taşıma ve yerleştirme teknolojisinin ilerlemesi (beton santralleri, transmikserler, beton pompaları, katkıları vb), deforme olmayan kalıpların bulunması gibi gelişmeler sayesinde beton uygulamalarında kalitenin yükselmesine paralel olarak beton yol yapımı da hız kazanmıştır. A.B.D.'de yalnız 1960'lar ve 1970'lerde 70.000 km'lik beton yol ağı tamamlanmıştır. A.B.D.'deki bu gelişmeleri, Almanya, Belçika ve Japonya'daki projeler izlemiştir. 1990'lı yıllardan itibaren beton teknolojisindeki ilerlemelerle beton yol yapımında yeni gelişmeler kaydedildi. Betonda lif kullanımı, öngerme teknolojisi, akıcı-kuru kıvamlı beton üretimi yaygın hale geldi (Ağar vd.,1998).

## **1.6.2. Beton Yolların Tercih Sebepleri**

### **1.6.2.1. Daha Yüksek Mukavemet ve Daha Uzun Ömür**

Beton kaplamaların bilinen en önemli üstünlüklerinden biri, yüksek mukavemet ve uzun ömre sahip olmasıdır. Bu yüksek mukavemeti ve uzun ömrü sayesinde, bakım masrafları ve bakım çalışmaları nedeniyle meydana gelebilecek gecikmeler azalmaktadır.

Yapılan bir araştırmaya göre, beton asfalt kaplamadan beklenen servis ömrünün 17 yıl, bir beton kaplamadan beklenen servis ömrünün ise 34 yıl olduğu açıklanmıştır. Bu araştırmada da, beton asfalt kaplamaların her üç yıldan beş yıla kadar bakım gerektirdiği ve başlangıçtan 17 yıl sonra sık sık büyük onarımlara ihtiyaç duyduğu, beton kaplamalarda ise servise açıldıktan 12 yıl sonra küçük bakımların gerektiği ve 18 yıl sonra da beton yüzeyinin yenilendiği belirtilmektedir. Bu yüzden, bakım ve onarım nedeniyle oluşan masraflar ve gecikmeler azalacak ekonomiye katkı sağlanacaktır (Ağar vd., 1996).

Beton kaplamalarda aşınma miktarı normal dayanımlı betonlarda (20 Mpa) kuru halde asfaltın %60'ı, ıslak halde ise %33'ü kadar olmaktadır. Beton sınıfı yükseldikçe aşınma dayanımı artmakta, yüksek dayanımlı beton kullanılması durumunda aşınma miktarı doğal granitlere eşit olmaktadır (Arıoğlu ve Köylüoğlu, 1996).

ABD'deki Washington Otoyolu üzerinde yapılan performans değerlendirmelerinde, kaplamanın ömrü süresince verdiği hizmetin kalitesi karşılaştırılarak puanlanmıştır. Buna göre, asfalt yol performansının %20'sini yaklaşık 7 yılda kaybederken, beton yolda bu süre 13 yıldır (THBB, 2002).

### **1.6.2.2. Daha Kısa Duruş Mesafesi**

Beton kaplamanın yüzey pürüzlülüğü, kullanıcılar için sürüş güvenliği göz önüne alındığında önemlidir. Tekerlek izi oluşan kaplamalarda, yağışlar sırasında tekerlek izi içinde su birikir ve taban zemine geçebilir. Ayrıca soğuk havalarda tekerlek izi içine yerleşen su donabilir ve yol güvenliğini azaltabilir.

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 asfaltta ıslak ve tekerlek izi oluşmuş durumda) gösterilmiştir. Taban zeminine su geçirme etkisi göz önüne alındığında beton asfalt yüzeyde durma mesafesi daha da azalacaktır (Ağar vd., 1996,1998).

Beton kaplamaların kayma sürtünme katsayıları yüksektir (kaymaya dirençlidir). Beton yolun boyuna sürtünme katsayısı 0.70, enine sürtünme katsayısı ise 0.65 civarındadır. Ayrıca ıslak oldukları zaman sürtünme katsayısında görülen küçülme, diğer plastik bağlayıcılarla yapılan kaplamalara göre daha düşüktür. Yol yüzeyi düzgün olduğundan yağış suları kolay akar ve yüzey çabuk kurur.

Sürücülerin güvenliği düşünülürse, beton yolun yapısı daha da önem kazanır. Asfaltta oluşan 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 (Ağar vd.,1998).

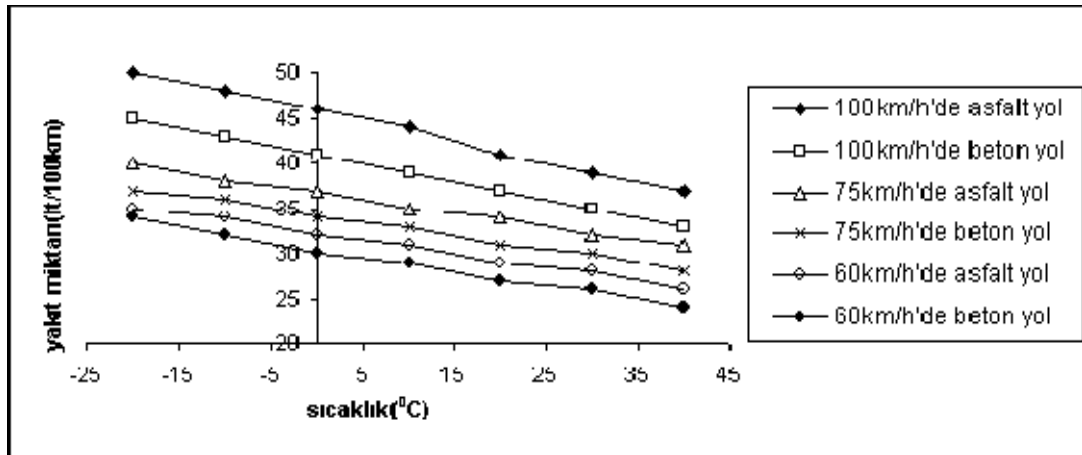
### **1.6.2.3. Tekerlek İzi Oluşumuna Karşı Direnç**

Ağır yükler nedeniyle, beton asfalt yollarda tekerlek izi oluşabilmektedir. Ağır taşıtlar, harekete başlarken veya frenlerken beton asfalt yüzeyinde oyulmalar oluşur.

Özellikle kavşak ve otobüs duraklarında beton asfalt kaplamalarda tekerlek izi oluşumu artmaktadır. Beton kaplamalar, bu tip bozulmanın oluşmasını önlemektedir.

#### 1.6.2.4. Ağır Taşıtlarda Enerji Tasarrufu

Ağır taşıtlar, beton asfalt kaplamalarda beton kaplamalara göre daha fazla deformasyona sebep olurlar. Kaplamada oluşan deformasyon nedeniyle taşıt hareket ederken enerjisinin bir kısmını kaybeder. Bu yüzden, beton asfalt kaplamalarda taşıtın hareketinin sağlanması için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Beton kaplamalarda, yolda deformasyon oluşmadığı için enerji kullanımı azalmaktadır. Şekil 4.'de asfalt kaplama ile beton kaplama yolda çeşitli hızlardaki yakıt tüketimi gösterilmektedir.



Şekil 4. Asfalt ve beton yolda çeşitli hızlarda sıcaklığa bağlı olarak yakıt tüketimi değişimi (THBB; 2002).

Beton kaplamaların “Yuvarlanma Sürtünme Katsayısı”, dolayısıyla tekerleğin dönme hareketine karşı dirençleri düşüktür. Motordan tekerleklere aktarılan kuvvet düzenli ve az olacağından yağ ve yakıt masrafı azalır. Bandaj ve lastik aşınması da az olur

#### 1.6.2.5 Daha İyi Gece Görüşü

Beton kaplamalar, sürücülerin gece görüşünü artırmaktadır. Beton kaplama daha açık renklidir ve daha koyu olan beton asfalt kaplamaya göre aracın ışığını daha fazla

yansıtacaktır. Böylece gece görüşü artacak ve ıslak olduğu zaman bile tehlikeli far ışığı yansımalarına sebep olamayacaktır. Bu konu trafik güvenliği açısından çok önemlidir. Şekil 5. de Beton kaplama ile asfalt kaplamanın gece görünüşü bulunmaktadır.



Şekil 5. Beton kaplama yol ve asfalt kaplama yolun gece görünüşü (THBB; 2002).

#### 1.6.2.6. Taşıma Gücü Yüksek

Beton yol üzerine gelen yükleri asfalta göre daha geniş bir alana yayarak, taban zeminine 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. Asfalt kaplalar ise, üzerlerine gelen yükleri bir alt tabakaya yayarak iletir. Kaplamadan temele, temelden alttemele ve nihayet alttemelden taban zeminine iletilen yükler, her bir tabaka geçişinde gittikçe yayılmakta ve daha geniş bir alana dağılmaktadır. Dolayısıyla taban zemini zayıfsa ve çeşitli gerilmeler altında deforme oluyorsa, asfalt kaplama da deforme olan bu profili izlemekte ve yolun üstünde şekil değişiklikleri, ondülasyonlar görülmektedir. Bu yüzden, ağır trafik altındaki yollarda, beton yol uygulaması, dayanıklılığı sebebiyle çok daha uygun olmaktadır (Ağar vd., 1996).

#### 1.6.2.7. Her Mevsim 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 dahil olmak üzere, hemen her iklim koşulunda yapılır.

Asfalt kaplamaların belli sıcaklıkta dökülmesi ve silindirle sıkıştırılması gerekmektedir. Bu sıcaklık değerindeki düşmelerde, sıkıştırma iyi bir şekilde gerçekleşmemekte ve belirli bir sıcaklığın altında asfalt, işlenebilirliğini kaybetmekte, kaplamada da boşluk yüzdesi artmaktadır. Bu da sonuç olarak, nitelik yönünden istenilen düzeyin altında bir kaplama oluşmasına yol açmaktadır. Beton kaplamalar ise vibratörle sıkıştırılmakta olup, ısı kaybı gibi bir sorun söz konusu değildir (Ağar vd., 1996).

#### **1.6.2.8. Doğal ve Kentsel Çevreye Zarar Vermez**

Asfalt kaplamaların yapım ve uygulama aşamalarında, petrol türevi bir malzeme olan bitümün ısıtma ve agreganın kurutma işlemlerinin bulunması nedeniyle bir ölçüde çevre kirliliğine yol açmaktadır.

Asfalt yollarda bağlayıcı olarak kullanılan bitüm, bünyesinde çeşitli uçucu maddeler içermekte 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 yüzeyine dökülmesi ile de kimyasal yapılarında değişimler gösterir.

Beton yolların bağlayıcı maddesi çimento ise herhangi bir uçucu madde içermemektedir. Bu nedenle beton yol için yaşlanma, gevrekleşme söz konusu değildir. Ayrıca, geçirimsiz olarak üretilen bir beton yolda yukarıda söz edilen eritici özelliği bulunan kimyasal maddelerin dökülmesi sonucunda herhangi bir değişim gözlenmemektedir (Ağar vd., 1996).

#### **1.6.3. Yol Betonunda Üretim ve Uygulama**

Yol betonu, yapılarda kullanılan betona göre üretim ve uygulama açısından önemli farklılıklar gösterir. Beton yol yapımında kullanılacak betonun tasarımı, ilgili standart dikkate alınmakla birlikte, çevre koşullarına ve uygulamaya göre değişebilmektedir. Beton yolların tasarımında beton kalitesi basınç dayanımından çok dayanıklılığa (durabiliteye) ve eğilmede çekme direncine göre belirlenir.

### **1.6.3.1. Üretim**

Beton yol yapım şantiyelerinde genellikle kısa zamanda büyük miktarda ve aynı standarda uygun kalitede betonun kullanılması gerekmektedir; bu nedenle beton yol yapımında hazır beton kullanımı zorunludur. Aynı zamanda şantiyenin büyüklüğü, gereksinimlerin yaygınlığı, üretim temposu değişiklikleri nedeniyle de hazır beton kullanımı önemlidir. Hazır beton kullanımıyla, betonun teknik özellikleri ve kalitesinin sürekliliği izlenebilir olmaktadır (THBB, 2002).

### **1.6.3.2. Uygulama**

Beton yol yapımında genel olarak iki tür uygulama yöntemi kullanılır. Bunlar:

**Sabit Kalıp Kullanımı:** Sabit kalıpla beton yol yapımında, yol boyunca ahşap veya çelik kalıplar kurulur. Makineler bu kalıplar arasında döküm yapar. Bazı makineler kalıplar üzerinde ileri geri giderek çalışır. Masterlama işi genellikle el aletleri ile yapılır. Bu yöntem, diğer yöntemlere göre daha fazla işçilik gerektirdiğinden, eni fazla olan yol yapımında pek tercih edilmez.

**Kayar Kalıp Kullanımı:** Kayar kalıp kullanımında, makinede bulunan vibratörlerle istenilen boyutlarda ve yüksek kalitede beton yerleştirilmesi sağlanır. Betonlama alanı ip veya lazer ışını kılavuzuyla, hassas olarak kılavuzlanarak, sürekli derzsiz ve aynı nitelikte betonlama yapılabilir. Kıvam olarak çökme değeri düşük olan betonlar kullanılır (THBB, 2002).

## **1.6.4. Yol Yapımında Kullanılan Beton Tür ve Teknikleri**

### **1.6.4.1. Akıcı Beton**

Kayar kalıp veya herhangi bir sıkıştırma ekipmanı kullanılmayacaksa, betonun yeterli dayanımı sağlayacak şekilde sıkışması için akıcı kıvamda beton üretilir. Akıcı beton sızdırmaz kalıplara transmikseler aracılığıyla veya pompa yardımıyla dökülebilir. Yan basınç etkisine karşı çelik kalıplar kullanılabilir. Sıkıştırma, perdahlama makinesine bağlı yüzey vibratörleri ile sağlanır (THBB, 2002).

#### **1.6.4.2. Kuru Yoğun Beton**

Bitümlü kaplama için kullanılan makine parkının kullanılabilceği bir yöntem olarak ortaya çıkmıştır. Makine parkındaki finişer ve greyderlerin tekniğine uygun olarak kullanılması sağlanmıştır. Bu yöntemde beton, toprak kıvamında olmakta, uygun priz süresi dikkate alınmakta, yeterli taşıma gücünün kısa sürede sağlanması hedeflenmektedir (THBB, 2002).

#### **1.6.4.3. Lifli Beton**

Betonun içine çelik tel parçalarının koyulması ile çekme gerilmelerine karşı direnci arttırılmaktadır. Özellikle çelik lif ağı dingil yüklerine ve aşınmaya karşı betonun direnci arttırılmaktadır. Üst tabakalara uygulanan lifli beton eski tabakaya takviye olarak da başarı göstermektedir (THBB, 2002).

#### **1.6.4.4. Öngermeli Beton**

Yeterli bir öngörme işlemiyle ısı değışiklikleri ve mekanik zorlanmalardan kaynaklanabilecek çekme gerilmelerinin oluşmaması sağlanmaktadır. Böylelikle plak kalınlıkları 12-15 cm'ye düşürülmektedir. Bu yöntem özellikle malzeme ekonomisi sağladığından ve çatlama riskini en aza indirdiğinden hizmet ömrü daha uzun olmakta ve derz sayıları azaltılabilmektedir (THBB, 2002).

#### **1.6.4.5. Sürekli Betonarme**

Klasik beton yol teknolojisinde beton plaklar planlanan aralıklarla enine ve boyuna derzlerle parçalara bölünmektedir. Dingil yüklerinden gelen zorlamalar ve iklim koşulları nedeniyle oluşacak genleşme farkları derzlerin açılmasına neden olacaktır. Bunu önlemek amacıyla derzsiz betonarme yol tekniğinde çatlakların meydana gelmesini önlemek veya bunların belirli ve arzu edilen yerlerde oluşmasını sağlamak yerine çatlakların rastgele oluşması sağlanır. Ancak karşılığında, oluşan çatlakların açılmaması ve yüklerin iletilmesi sürekli donatılarla sağlanır (Ağar vd., 1998).

#### **1.6.4.6. Geçirimli Beton**

Islak zeminde belli bir aderansın sağlanması amacı ile yüzeyde su birikmeleri engellenmelidir. Bunun için yeni bir kaplama oluşturulmuştur. Geçirimli plaklar içindeki boşluk hacmi yüzdesi yüksek olup gelen suyun kaplama içine girmesi ve drenaj sistemine ulaştırılması sağlanmaktadır (THBB, 2002).

#### **1.6.5. Beton Yolların Performansı**

##### **1.6.5.1. Beton Yolların Yapımı ve Performansını Etkileyen Unsurlar**

– Derzler:

Sıcaklık ve nem miktarındaki değişimler, betonun genişip büzülmesine sebep olur. Beton plak serbestçe hareket edecek biçimde yapılmazsa, bu hareketler nedeni ile çatlayabilir. Ancak uygun aralıklarla derz yapılması halinde geniş çatlak oluşumunun önlenmesi ve çatlakların belli yerlerde oluşmasının sağlanması olanağı vardır.

Bu sürüş konforunu azaltıcı bir olgu olarak görülmektedir. Ancak, yeni geliştirilen, iyi derz dolgu malzemeleri kullanılarak bu durum önenebilir. Ayrıca ağır ve orta trafik yükleri için sürekli betonarme yol tekniği uygulanarak, derzsiz beton yollar da yapılabilir.

– Yapım Sırasındaki Bekleme Süresi:

Yapım sırasında, beton prizini tamamlayıncaya kadar yolun trafiğe kapalı kalması gerekebilir. Bunu önlemek için, priz hızlandırıcı kimyasal katkıları veya erken dayanımı yüksek çimentolar kullanılarak bekleme süresi 12 saate kadar indirilebilir. Çok düşük kıvamlı silindirle sıkıştırılabilen betonlar kullanılarak yol kısa sürede trafiğe açılır.

– Kent Yollarında Altyapı Çalışmasının Sıklığı:

Beton yolların altyapı sistemlerinin tamiratlarında güçlük yaratacağı düşünülebilir. Gelişmiş ülkelerde iyi bir altyapı planlaması ve koordinasyonu ile, öne sürülen bu sorunlar yaşanmamaktadır. Ayrıca beton alt tabakalara su geçirmediği, trafik yük ve titreşimini aşağıya yansıtmadığı için altyapı tesisleri daha iyi korunmuş olacaktır (THBB, 2002).



### 1.6.5.2. Uzun Süreli Performans İçin Alınacak Önlemler

Beton yolun hangi çevresel etkilerin altında kalacağı hesaba katılarak, çeşitli sorunlarla karşılaşmamak için önlemler alınabilir.

Kullanılmakta olan deney kriterlerinin, betonun bir yol malzemesi olarak kullanımında yeterli olup olmadığı incelenmeli ve gerekirse ek deneyler ve kriterler ortaya konulmalıdır. Örneğin betonun boşluk yapısının kullanım ömrünü hangi şekilde etkilediği incelenmelidir. Donma-çözülme kaynaklı hasarlara karşı gerekli önlemler alınmalıdır. Betonun erken yaşta yüksek dayanıma sahip olması için karışım oranları ve kür şartları uygun şekilde belirlenmelidir. Yüksek dayanımlı betonların, uzun dönem performansları göz önünde tutulmalıdır.

Donatı kullanılması durumunda korozyona karşı gerekli önlemler alınmalıdır. Donatılarda koruyucu kaplama kullanımı, yeterli pas payı bırakılması veya korozyon hasarına uğramayan malzemelerden yapılmış donatı tipi seçimi araştırılmalıdır. Kullanılan donatıların rijitliği nasıl etkilediği ve beton ile nasıl bir aderansa sahip olduğu belirlenmelidir.

Uygun bir drenaj sistemi ve bakımı uygulanarak beton yolun daha uzun ömürlü olması sağlanmalıdır. Su akımının stabilize edilmiş veya edilmemiş alt yol temellerindeki etkisi belirlenmelidir. Bu tür etkilerin beton yolun kullanım ömrünü ne şekilde etkilediği modellenmelidir. Rijit bir beton yol performansının, taşıt yükü, süspansiyonu, lastik cinsi ve aks tasarımı etkilerinden nasıl etkilendiğini tahmin edebilecek bir prosedür geliştirilmelidir. Yol yapımında kullanılan malzemelerin ve betonun buz çözücü tuzlardan nasıl etkilendiği ve bunun yol performansına yansımaları araştırılmalıdır.

Otoyollarda gittikçe artan trafik nedeniyle, yeni yol projesi şartları getirilmesi ve uygulanması kaçınılmaz olmuştur. Yeni yolların inşası ve bakımı, eski yolların onarımı ve yeniden inşası gibi konularda zamanlama ve kabul edilebilir bir servis düzeyi sağlanmalıdır. Hızlı bir inşaat veya onarım hızlı bir şekilde kullanıma hazır olan ve dayanıklı malzemelerin kullanılmasını gerektirmektedir. Bunun yanında hızlı veya hızlandırılmış deney programlarının geliştirilmesi de kullanılan malzemelerin kalitesinin sağlanması açısından önemlidir. Bu nedenle, inşaatlarda yeni teknikler sürekli olarak geliştirilmelidir.

Proje tasarımı ve inşaat teknikleri, onarım işleri için uygun olarak hazırlanmalı ve böylece onarım nedeniyle oluşacak zaman kayıpları en aza indirilmelidir. Hızlı bir inşaat

ve hızlı bir onarım için, betonda kullanılacak malzemelerde hızlı dayanım ve dayanıklılık deneyleri geliştirilmeli, kullanılan malzemelerin ekonomik olmasına dikkat edilmelidir (URL-1).

### **1.6.6. Beton Yolda Oluşabilecek Bozulma**

Beton yolların esnek kaplamalı yollara kıyasla en önemli üstünlüklerinden biri, çok az düzeyde bozulma göstermeleri, fazla bakıma gerek duymamaları ve çok uzun ömürlü olmalarıdır. Yine de gerek betonun özellikleri gerekse yan etkiler nedeniyle beton kaplama üzerinde bazı bozulmaların görülmesi olasıdır. Bu bozulmalar başlıca, Çatlak Oluşumu, Çukur Oluşumu, Plak Oturmaları, Dilatasyon Derzlerindeki Bozulmalar, Altyapı Tesis İnşaatının Yol Açtığı Bozulmalar ve Yüzeysel Pürüzlüğün Kaybolması şekilleriyle kendini göstermektedir. Beton Plaklardaki Çatlaklar beton yollarda diğer bozulma türlerine kıyasla daha fazla görülmektedir (URL-2).

#### **1.6.6.1. Projelendirme Hataları**

##### **1.6.6.1.1. Plak Kalınlığının Yetersizliği**

Projelendirme safhalarında göz önünde tutulan parametrelere bağlı olarak saptanmış olan plak kalınlığı, yolun taşıdığı trafik yüküne karşı yetersiz kalmışsa, öngörülen gerilmelere, bu plağın yeterli ve beklenen süreci gösteremeyeceği açıktır. Bu da ilk aşamada plağın, bütün kalınlık boyunca kırılması şeklinde görülen çatlaklarla ortaya çıkar.

##### **1.6.6.1.2. Uygun Olmayan Derz Aralıkları**

Derz açıklıkları için kesin bir hesap yöntemi bulunmamakta ve bu aralıklar, deneysel olarak saptanmaktadır. Gözlem ve deneyler sonunda, yarım derzler arasının 6 – 9 metre, genişleme derzlerinin arasının ise 25 – 35 metre kadar olması önerilmektedir. Bu değerlerin altındaki açıklıklar, konfor ve maliyeti olumsuz yönde etkilemekte, çok üzerindeki açıklıklar ise, genişleme gerilmelerinin tek bir yerde toplanamaması sonucu çatlakların oluşmasına neden olmaktadır.

### **1.6.6.1.3. İklim Etkisinin İhmali**

Çok soğuk veya sıcak ve daha da önemlisi günlük sıcaklık farklarında büyük değişmelerin bulunduğu bölgelerde betonun yapı ve özellikleri nedeniyle doğacak ani gerilmelerin dikkate alınması gereklidir. Bu gerilme ve deformasyonlar büyük ölçüde genişleme derzleri ile karşılanmakta, ayrıca beton plak altında imal edilecek bir Kaplama Altı tabakası da bu konuda yardımcı olmaktadır.

### **1.6.6.1.4. Ağır Yükleme**

Projelendirmede göz önünde tutulan en önemli parametrelerden biri, o yol üzerinde seyredecek trafiğin yük etkisidir. Taşıt yüklerinin gerek tekerrür sayısı, gerekse tonaj itibarıyla düşük alınması veya artışındaki tahminlerde hataya düşülmüş bulunması durumlarında, hesaplanmış olan geometrik boyutların yetersiz kalması söz konusu olmaktadır. Öngörülenin üzerindeki yüklemeler ve bunların doğuracağı gerilmeler sonunda, beton plakta çatlama oluşmaktadır.

### **1.6.6.1.5. Beton Bileşim Hesaplarındaki Hatalar**

Bu hesaplar, ideal gronülometriye sahip belirli miktardaki agreganın, yine belirli miktardaki su ve çimento ile bağlanması, istenen dirençte, boşluksuz veya şartname sınırlarını aşmayan boşluklu betonun yapılmasını amaçlamaktadır. Hesap hataları sonunda, fazla boşluklu, düşük dirençli betonun, öngörülen trafik yüklerine dayanması söz konusu olamaz. Bu dayanıksızlık da kendini, betonun çatlama yapması ile göstermektedir (URL-2).

### **1.6.6.2. İnşaat Hataları**

#### **1.6.6.2.1. Erken veya Geç Perdah**

Betonun dökülüp masterlanması ile prizini alması arasındaki sürede bu plağın, önce şişme sonra da rötreden dolayı belli gerilmelere maruz kaldığı bilinmektedir. Özellikle

rötre gerilmeleri prizini almakta olan betonda, gözle görülür yüzeysel çatlaklar meydana getirir. Bu nedenle beton plak yüzeyinde perdahlama işlemi yapılmakta, çatlaklar da bu şekilde önlenmekte veya yok edilmektedir. Erken yapılan perdahlama, önleyici olmaktan uzaktır ve priz ve rötre sırasında yine çatlamların olduğu görülür. Perdahlamanın geç yapılması durumunda ise yerleşik bir özellik gösteren çatlakların yok edilmesi olanak dışı kalmaktadır. Bu yüzeysel çatlaklar, beton plağın o kesimlerinde kesit zayıflığına yol açmakta, daha sonra tam kalınlık çatlağına ve nihayet çukurlaşmalara yol açmaktadır.

#### **1.6.6.2.2. Derz Yapımındaki İmalat Hataları**

Beton Yollarda uygulanan derzlerin mutlak surette kalifiye bir ekip tarafından yapılması ve denetlenmesi gerekmektedir. Yarım derz oyuklarının açılması, içlerinin uygun malzeme ile doldurulması, genleşme derzlerinde uygun açıklığın bırakılması, kayma demirlerinin istenen nitelik ve nicelikte yerleştirilmesi, ve nihayet derz boşluklarının gerektiği gibi doldurulması, belirli bir özellik, deneyim, titizlik, duyarlılık ve ustalık gerektirmektedir. Bu nedenle derzlerin imal ve kontrolündeki bir eksiklik, ileride büyük boyutta zararlara yol açabilmektedir.

#### **1.6.6.2.3. Alt yapının Sağlam Olmaması**

Beton yol plakları trafik yüklerini kendi üzerlerinde taşır, yük ve gerilmeleri altyapıya çok fazla iletmezler. Bu nedenle altyapı zayıflığının beton plağı çok fazla etkilemeyeceği gibi bir kanı bulunmaktadır. Oysa plağı alttan destekleyen taban zemininin sağlam olması, plak ömrünü de attırmaktadır. Taban zemininde oluşacak lokal bir oturma, o noktadaki beton çekme gerilmelerini de arttırmakta ve plakta çatlama neden olabilmektedir. Ayrıca zeminde Pompaj Etkisi varsa, plak altının özellikle kenar ve köşelerinde meydana gelecek zemin kaybolması ve altyapı boşlukları, beton plağın mesnetsiz kalmasına, daha doğrusu yayılı mesnetli durumdan tekil mesnetli duruma dönmesine yol açmaktadır. Böyle bir durumda da plak, değişik noktalarda maruz kaldığı çok değişik nitelik ve nicelikteki gerilmeler etkisiyle çatlamlar göstermektedir.

#### **1.6.6.2.4. Homojen Olmayan Beton**

Betoniyerde gerekli bir karıştırma süresi geçirmeden dökülen veya segregasyona uğrayan beton, zayıf olan yerlerinde çatlamakta ve kırılmaktadır.

#### **1.6.6.2.5. Sıkıştırma Hataları veya Yokluğu**

Betoniyerden yola dökülen ve ilk serme düzenlemesi yapılan betonun, vibratörle uygun şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. Vibrasyonun hiç uygulanmaması düşük yoğunluklu, zayıf dirençli betonun oluşmasına yol açar. Vibratörün betonda gerekenden uzun sürede tutulması da, iri malzemesi aşağıya çökmüş, ince malzemesi ve çimentosu üstte kalmış, homojen olmayan bir betonun ortaya çıkmasına neden olur. Bu nedenle vibratörü kullanacak kişinin bu konuda deneyimli olması ve vibrasyon sırasında betonun kontrol edilmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

#### **1.6.6.2.6. Malzeme Kalitesindeki Yetersizlik**

Kaliteli malzeme (agrega, su, çimento) kullanılmamış olmanın sonucunda istenen dirençte beton elde edilemeyeceğinden, bu zayıf direncin ilk göstergesi olan çatlakların ortaya çıkması da kaçınılmaz olmaktadır. Bu da inşaat öncesinde, kullanılacak malzemenin seçim, deney ve kontrolünün ne denli önem taşıdığını ortaya çıkarmaktadır.

#### **1.6.6.2.7. Dökülen Betonun Korumadaki İhmal ve Yetersizlik**

Beton plağın dökümünden sonra 72 saat süre ile beton suyunun kaybolmaması için önlemler alınmalıdır. Buna 'Betonun Korunması' denir. Betonda, yetersiz koruma sebebiyle oluşacak erken bir su kaybı, bağlayıcı çimentonun eksik hidrasyon yapması sebebiyle beton direncini olumsuz etkilemekte, böylece öngörülmesi trafik yüklerine maruz kalan daha düşük dirençli betonda çatlaklar oluşmaktadır(URL-2).

## 1.7. Beton Karışımında Kullanılacak Malzemeler ve Özellikleri

Beton bileşenleri çimento, mineral agrega, su ve zaman zaman kimyasal katkıdır. Belirtilen bileşenlerin her birinin karışımında, çok iyi tanımlanmış rolü ve etkisi bulunmaktadır. Ayrıca her bileşenin, amaçlanan özelliklerin elde edilmesinde önemli katkısı vardır.

### 1.7.1. Çimento

Genel tanım olarak çimento, su ile karıştırıldığında, az veya çok akıcı niteliğe kavuşan sadece suyun etkisiyle priz yapan, katılaştıran ve nihayet sertleşen ve bir daha yumuşamayan, ince taneli, hidrolik bağlayıcı malzemedir. Tane boyutları büyük oranda 90 mikronun altına düşürülmüştür. Çimento hamurunun katılaşması sırasında, agrega tanelerini birbirine bağlama ve zamanla sertleşme yeteneğinden dolayı mukavemet kazanma özelliğine sahiptir. Betonun mukavemeti çimento tarafından sağlandığından çimentoya ait özelliklerin iyi bilinmesi gereklidir. (Ağar vd., 1998)

Yaklaşık %70 kalker, %30 kil karışımı 1500°C'de pişirilir ve erken priz yapmasını önlemek için %2~6 oranında jips (alçı taşı) ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ilave edilerek çimento elde edilir (Güner ve Süme, 2001).

Ülkemizde, Türk Standartlarına göre çok değişik tipte çimento üretilebilmektedir. Beton yollarda basınç direnci yeterli, eğilme çekme direnci yüksek, rötresi az ve yavaş priz yapan çimentolar tercih edilir (Ağar vd., 1998).

Yapılan araştırmalar göstermiştir ki; KYB'de genel olarak normal portland çimentosu kullanılmıştır. Bu konuda yapılan bir çalışmada; TÇ 32,5 ve PKÇ 32,5 çimentolarının KYB katkılarının ilk kuşak türleri ile uyumsuzluk gösterdiği belirtilmiştir. Daha sonra, bu katkıları üzerinde çok hızlı gelişmeler gerçekleştiği ve bu uyum sorununun giderek azaldığını vurgulamıştır (Özkuş, 2002).

Portland çimentosu; klinkerin kütlece yaklaşık %3 - %5 oranındaki alçı taşı ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ile birlikte öğütülmesi sonucu elde edilen katkısız hidrolik bağlayıcılardır. Klinker kompozisyonu ve öğütme inceliği farkıyla PÇ 42,5 ve PÇ 52,5 oluşturulur (Ağar vd., 1998).

ASTM C 150'ye göre portland çimentosu; bir veya daha fazla kalsiyum sülfat formu içeren hidrolik kalsiyum silikattan oluşan klinkerin toz haline getirilmesiyle üretilen hidrolik bir bağlayıcı olarak tanımlanmıştır (Krebs ve Walker, 1971).

Yaptığımız çalışmada da CEM I PÇ 42,5 R' kullanılacaktır.

### 1.7.2. Agregata

Kum, çakıl, kırmataş, cüruf gibi, mineral kökenli genellikle 100mm'ye kadar çeşitli boyutlarda tanelerden oluşan malzemeye "Agregata" denir. Agregata bağlayıcılar yardımıyla beton yapımında kullanılırlar. Betonun hacimce yaklaşık %75 ve ağırlıkça yaklaşık %60'ı agregatardan oluşmaktadır. Betonun işlenebilirlik, durabilite ve mukavemet özelliklerine önemli ölçüdeki etkisinden dolayı agregata önemli bir malzemedir. (Tunç, 2001; Güner ve Süme, 2001)

Agregata sınıflandırma tane boyutuna göre yapılır. 4 mm kare gözlü elekten geçen malzemeye "İnce Agregata" ve "Kum", bu eleğin üzerinde kalan malzemeye de "İri Agregata" denir. Ocak taşlarının konkasörle kırılması sırasında elde edilen ve 0,25 mm kare gözlü elekten geçen malzeme "Taş Unu" veya "Filler" adını alır. Taş unu taze beton kohezyonunun arttırılması amacıyla kullanılır.

İri agregataların, betonun yoğunluğu üzerinde önemli ölçüde etkisi bulunmaktadır. İnce agregata uygun bir dizilişle, iri agrata tanelerinin ara boşluğuna girmek suretiyle daha yoğun ve dolayısıyla daha dirençli bir bünye oluşmasına yardımcı olur.

Beton üretimine uygun nitelikteki bir agregata temiz, sert ve sağlam olmalı, bu özelliklerinin yanı sıra suyun etkisiyle yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemeli ve donatının korozyona karşı korunmasını tehlikeye düşürmemelidir. Beton üretiminde kullanılacak agregataların yuvarlak (küresel) biçimde olması, işlenebilirlik yeteneğini ve betonun doluluğunu (kompasitesini) arttıracak nitelik gösterir. Bu bakımdan vibrasyon yöntemiyle kalıba yerleştirilecek olan betonlarda yuvarlak biçimli doğal agregata tercih edilir. Beton yollarda aşınma tabakasını oluşturan üst betonda kullanılacak agregatanın basınç dayanımı yüksek (en az 1500 kgf/cm<sup>2</sup>), aşınma direnci büyük ve hava etkilerine dayanıklı malzemedir sağlanması gerekir. Kırmataşın (mıcırın) dane biçimi, kübik forma yeterince yakın olmalıdır. Yassı ya da uzun dane formulu mıcırlar, betonun işlenebilirlik yeteneğini azaltırlar. Kırmataş yapımına uygun kayac cinsleri granit, diyabaz, kuvars, kalker, andezit ve benzerleridir. Agregatanın 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 kayaçtan oluştuğu petrografik, içinde hangi minerallerin bulunduğu ise mineralojik analizlerle ortaya çıkar. Çimento hamuru ile en iyi aderansı gerçekleştiren kayalar kalsiyum karbonatlar yani kalkerler, en kötü aderansı sağlayanlar kalsiyum sülfatlı kayalardır. 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 (Akakin, 2007).

Beton agregalarında, en düşük agregaya boyutunun 0,25 mm (250 mikron) olarak saptanmasına rağmen, üç alt boyut bölgesi olduğu da unutulmamalıdır. Tane boyutu 250-60 mikron arasında kalan agregaya "Çok İnce Kum", 60-2 mikron arasında kalan zemine "Silt", tane boyutu 2 mikrondan küçük olan zemine de "Kil" denir. Kil malzemesinin beton üretiminde yeri yoktur. Silt ise toplam agregaya içinde %5'den fazla olmamalıdır (Ağar vd., 1998).

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, özellikleri 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 ısı genleşmesi az olmalıdır. İçerisinde sertlik değerleri çok az da fark etse değişik mineraller bulunmalıdır ki trafik altında aşınma sırasında farklı aşınma nedeniyle yüzeyde sürekli olarak gerekli pürüzlülük sağlanabilsin. Genel olarak asfalt yollarda sürtünmeyi kaba agregaya özellikleri belirlerken beton yol kaplamalarında ince agregaya kısmı daha çok etkilidir (Henry, 2000).

KYB'de de geleneksel betonda kullanılan ince ve iri agregalar kullanılabilir. Ancak maksimum agregaya boyutu geleneksel betondakinden daha küçüktür ve genellikle 20 mm'nin altında kalır (Özkul, 2002).

KYB'nin geleneksel betondan birleşim açısından temel farklılıklarından birisi de belli miktarda ince malzeme (<100 mm) içerme zorunluluğudur. Çimento inceliğindeki ya da daha ince olan bu malzemelerin bir bölümünü çimentonun kendisi oluşturur; buna ek



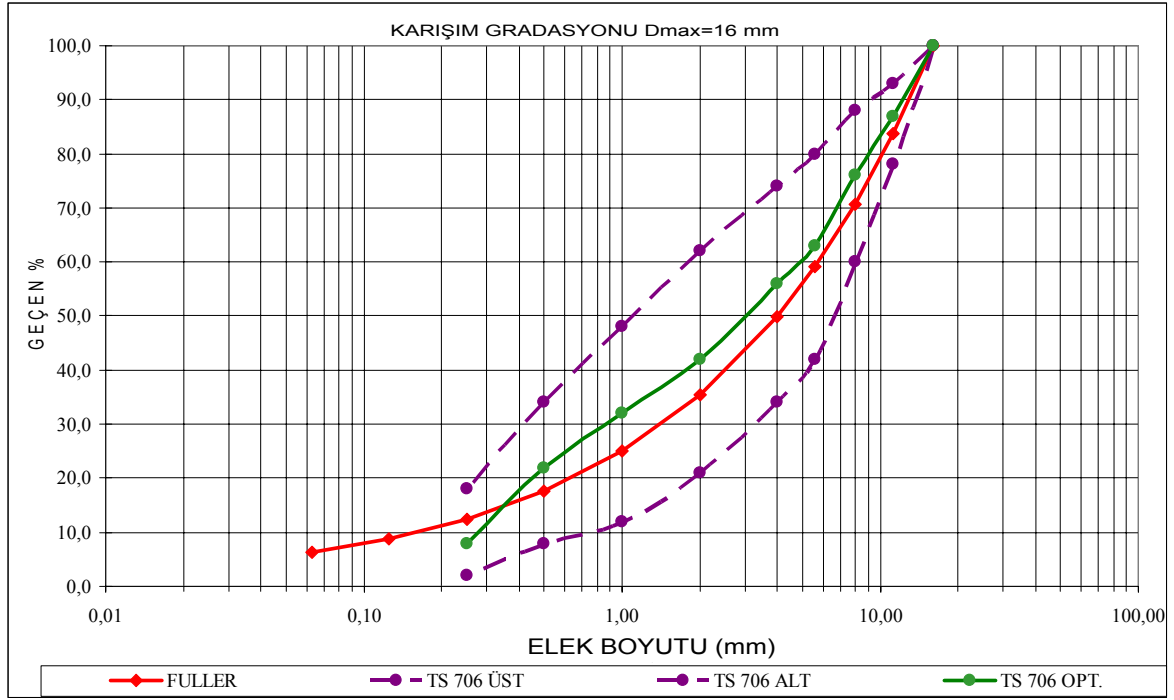
olarak bazı çalışmalarda cüruf (öğütölmüş), silis dumanının da kullanılabildiği görölmüşür (Ghezal ve Khayat, 2002; Özkul vd., 1999).

Bu çalışmada kullanılacak olan agregalar kireçtaşı ve bazalttır. Agrega granölometrisi olarak TS 706 EN 12620'de verilen beton agregası referans eğrilerinden yararlanılmıştır. Agrega karışımına ait referans eğrileri Şekil 6'de verilmektedir.

Diğer öлке standartlarında olduğu gibi Türkiye'de de TS 706 EN 12620, ideal granölometri eğrisi yerine ideal granölometri bölgeleri tanımlamaktadır. Tablo 1'de bu eğrilere ait agrega granölometrisi verilmektedir.

Tablo 1. Agrega granölometrisi referans eğrileri

ELEK AÇIKLIĞI (mm)	ŞARTNAME SINIRLARI ( TS 706)			FULLER EĞRİSİ
16,0	100	100	100	100
11,2	93	87	78	83,7
8	88	76	60	70,7
5,6	80	63	42	59,2
4	74	56	34	50
2	62	42	21	35,4
1	48	32	12	24,7
0,500	34	22	8	17,7
0,250	18	8	2	12,5
0,125				8,8
0,063				6,3



Şekil 6. TS 706 EN 12620 beton agregası referans eğrileri

### 1.7.2.1. Agregalar Üzerinde Yapılacak Deneyler

Betonun hacim bazında %60-%75'ini, ağırlıkça da 4/5'ini agrega oluşturur. Agreganın karakteristikleri taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini, karışım oranlarını ve maliyeti önemli ölçüde etkiler.

Beton üretimine uygun nitelikli bir agrega temiz, sert ve sağlam olmalı, bu özelliklerinin yanı sıra suyun etkisi ile yumuşamamalı, dağılmamalı, çimentoların bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmemelidir.

Aşınma tabakasını oluşturan üst betonda uygulanacak agreganın basınç direnci yüksek (en az 1500 kgf/cm<sup>2</sup>), aşınma direnci büyük ve hava etkilerine dayanıklı malzemeden sağlanması gerekir (Ağar vd., 1998). Bu amaçla agregalar üzerinde çeşitli deneyler yapılmaktadır.

### 1.7.2.1.1. 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 maksadıyla yapılır.

Elek analizine tabii tutulmak üzere belli miktarda malzeme alınarak, iyice yıkandıktan sonra kuruması için 105°C deki etüve konulur. Bu şekilde kurutularak hazırlanan 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. Bu bakımdan, denenecek numuneyi parçalar halinde deneye almak daha uygun olabilir.

Eleme işlemi sonunda her elek üzerinde kalan malzeme tartıldıktan sonra her bir elek için geçen yüzde (%P) değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Macit, 2003).

$$\%P = \frac{\text{ElektenGeçenMiktar}}{\text{ElenmeyeTabiTutulanMiktar}} \quad (1)$$

Bu agrega granülometrisine ait incelik modülü:

$$\dot{I}M = \frac{\sum (100 - \text{GranülometriOrdinatları})}{100} \quad (2)$$

### 1.7.2.1.2. Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri (TS EN 1097-6)

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.

### 1.7.2.1.2.1. İnce Agreganın Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranının Tayini

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.'de belirtilen miktar kadar alınır. Alınan numune tam doygun hale gelinceye kadar en az 24 saat su içinde bekletilir.

Tablo 2. İnce agreganın birim hacim ağırlığının tespiti için 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 malzemeden yaklaşık 400 gr kadar alınır ve bu değer M2 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 M1 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 (M3). Boş ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile 500 ml işaret çizgisine kadar doldurulur ve tartılır (M4). 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 (Şimşek 2004).

M1: Malzemenin kuru ağırlığı (etüv kurusu)

M2: Malzemenin DKY ağırlığı

M3: Ölçü kabı + su + Numune ağırlığı

M4: 500 ml çizgisine kadar su ile dolu ölçü kabı ağırlığı

ρ<sub>K</sub>: İnce agreganın kuru birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iK} = M1 / (M2 + M4 - M3) \quad (3)$$

$\rho_{iD}$ : İnce agreganın DKY birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iD} = M2 / (M2 + M4 - M3) \quad (4)$$

$\rho_{iG}$ : İnce agreganın görünen birim hacim ağırlığı

$$\rho_{iG} = M1 / (M1 + M4 - M3) \quad (5)$$

$m_i$ : İnce agreganın su emme oranı

$$m_i = [(M2 - M1) / M1] \cdot 100 \quad (6)$$

İnce Agreganın Doğal Suyu;

Doğal Su=(oda sıcaklığındaki ağırlık – etüv kurusu ağırlık)/oda sıcaklığındaki ağırlık

#### 1.7.2.1.2.2. İri Agreganın Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Oranının Tayini

Deneyin amacı, iri taneli 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 3.'de belirtilen miktarın karışımından çeyrekleme yöntemi ile önerilen miktarda alınır. Alınan numune tam doygun hale gelinceye kadar en az 24 saat su içinde bekletilir.

Tablo 3. İri agreganın birim hacim ağırlığının tespiti için numune miktarı

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

Suya doygun hale gelmiş numune, ince taneleri kaybolmayacak şekilde süzülür ve doygun kuru yüzey (DKY) haline getirilir. DKY malzemedden bir miktar alınır ve bu değer

M2 olarak kaydedilir. Daha sonra malzeme etüve konularak etüv kurusu haline getirilir. Oda sıcaklığına gelinceye kadar soğutulur ve tartılır (M1). 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 (M3). Boş ölçü kabı yaklaşık 20°C su ile doldurulur ve yine kabarcık kalmayacak şekilde kapağı kapatılarak tartılır (M4). İri agreganın kuru birim hacim ağırlığı, DKY birim hacim ağırlığı, görünen birim hacim ağırlığı ince agrega 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 ince agreganın birim hacim ağırlığı olarak alınır.

### 1.7.3. Beton Karma Suyu

Beton karışımının üretilmesinde kullanılan suya özel itina gösterilmesi gerekmektedir. Çünkü beton malzemesinin önemli bileşenlerinden biri olan karma suyu bulunduran eriyik ve askıdaki çeşitli maddeler çimentonun priz sürelerini, betonun direncini ve işlenebilirliğini etkileyebilecekleri 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 suyu bulunduran beton özelliklerini olumsuz etkileyebilecek ölçüde zararlı madde bulunmaması gerektiği anlamına gelmektedir.

Eğer beton karışım suyunun niteliğinden şüphe ediliyorsa laboratuvarda suyun kimyasal analizi yaptırılabilir veya bu suyla üretilen betonun dayanımı, kalitesinden emin olunan suyla üretilen özel örnek betonun dayanımıyla karşılaştırılır. Karışımında kullanılacak karma suyu bulunduran asidik ortam bulunmaması yani pH değerinin 7'nin üzerinde olması istenmektedir. Karma suyundaki asitli ortam, çürümüş bitki köklerinden oluşan humik asitten kaynaklanır. Bu asit priz olayını geciktirir. Suya kanalizasyon karışırsa, şeker ve nişasta gibi organik maddelerin olası varlığı priz geciktirici rol oynar. Endüstriyel bölge atık sularında rastlanabilecek ağır metal oksitleri ve tuzlan (Hg, Pb, Zn) priz süresini etkiler. Olası deterjan ve likit yağ kirlenmeleri, karma suyunun priz, katılaşma ve sertleşme üzerindeki rolünü geriletir (Ağar vd., 1998 ).

### 1.7.4 Katkı Malzemesi

Çimento ağırlığının en çok %5'i kadar bir oranda betona eklenen kimyasal katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betona ek yeni özellikler kazandırmak amacını taşırlar. Çok sayıda ve çok farklı amaçlar taşıyan katkı maddeleri üretilmektedir. Katkı maddelerini şu ana gruplar içinde toparlamak mümkündür.

- Akışkanlaştırıcı (su kullanımını azaltıcı) katkılar
- Süper akışkanlaştırıcılar
- Prizi hızlandırıcı katkılar
- Prizi geciktirici katkılar
- Hava sürükleyici katkılar
- Geçirimsizliği azaltıcı katkılar

Konumuzla bağlantılı olarak bu katkı maddeleri içinde süper akışkanlaştırıcılar incelenecektir. Bunlar; sabit kıvamda beton karışım suyunun yüksek oranda azaltılmasını sağlayan veya sabit su miktarında çökmeyi önemli oranda artıran veya her iki etkiyi birlikte yapan katkılardır. Bu katkı tipi daha çok ulaşılamayan yerlerde kolay yerleşmeyi sağlamak için işlenebilirliği arttırmak amacıyla kullanılmakta, yani “akıcı beton” üretiminde özellikle bu katkıdan yararlanılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcıların ikinci bir kullanım alanı ise yüksek dirençli beton üretiminde olmakta, bu katkılar sayesinde çok düşük W/C oranına rağmen normal işlenebilirlik yeteneği elde edilebilmektedir. Bu durumun; işlenebilmeyi arttırmak, pompalanabilirliği düzeltmek, betoniyerde karışmayı kolaylaştırmak, betoniyer ceplerine yapışmayı azaltmak, betonun segregasyonunu önlemek, yerleştirmeyi kolaylaştırmak gibi ek yararları olmaktadır (Ağar vd., 1998; Güner ve Süme, 2001).

KYB’de; yüksek oranda su kesici özelliğe sahip ve moleküler ağırlığı yüksek olan bir kimyasal katkı kullanılabilir. Bu amaçla polikarboksilat veya naftalin esaslı polimerler yaygın kullanılan katkılardır (Okazawa vd., 2000; Ghezal ve Khayat, 2002).

TS EN 934-2’de süper akışkanlaştırıcı için; KYB’nin çalışma süresinin ayarlanmasındaki asıl bileşendir, bu nedenle kimyasal katkı seçiminde, erken dayanım kaybı yaşattırmayacak (geciktirici özellikli olmayan) ve aynı zamanda betona minimum 1 saat çalışma süresi özelliği katabilecek özellikte bir katkı olmalıdır, bu özellikte polikarboksilik eter esaslı özel polimerlerle sağlanabilir denilmektedir.

Yapılan araştırmalarda; viskozite arttırıcı katkılar (VAK), suda çözünen polimerik maddeler olarak şu şekilde sınıflandırılmıştır:

Nişasta ve doğal zamk (sakız) gibi doğal polimerlerler, Ayrışmış nişasta, selüloz eter türevleri (hidroksipropil metil selüloz gibi) yarı sentetik polimetler, Etilen kökenli (polietilen oksit gibi) ve vinil kökenli (polivinil alkol gibi) sentetik polimerler (Kawai, 1987).

Welan sakızı, Khayat ve Yahio (1997) tarafından nişasta ve türevleri Rols vd (1999) tarafından başarılı bulunmuştur (Özkul, 2002).

## **1.8. 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.

### **1.8.1. 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 4 deki 1. grup için 350 kg, 2. grup için 270 kg, 3. ve 4. grup için 250 kg çimento bulunmalıdır (Ağar ve Taşdemir, 2007).



Tablo 4. Trafik yoğunluklarına göre olması gereken dayanım değerleri (Ağar ve Taşdemir, 2007).

Yolun Cinsi	Basınç dayanımı Kgf/cm <sup>2</sup>
1.Ağır transit trafiği geçiren1. sınıf Devlet yolları: Temel ve kaplama betonları	370
2.Orta ağırlıkta trafikli yollar: Kaplama tabakası ya da tek tabaka temel betonu	300 250
3. Lokal trafikli konut yolları, kamyonlu park alanları: Kaplama tabakası ya da tek tabaka temel betonu	250 200
4. Kamyonsuz park alanları: Kaplama tabakası ya da tek tabaka temel betonu	250 200

### 1.8.2. 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 (10x10x40cm) 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 (Ağar ve Taşdemir, 2007).

### 1.8.3. 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 yöntemine ve test yöntemine 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 (Atiş, 2003).

Aşınma ve darbe etkileri, betona fiziksel yönden zarar verebilecek etkenlerdir. Beton kaplamadaki aşınma direnci, doğrudan doğruya agrega danelerinin 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 (Ağar ve Taşdemir, 2007).

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 (Akkaya ve Taşdemir, 2007). Beton yol plağı yüzeyine yakın yerlerde sert agrega dane boyutunun 25 mm'yi aşmamasına, daha iri ve yumuşak danelerin alt katmanlarda yer almasına özen gösterilmelidir.

Taze betonun yüzeyini düzeltme işlemine yüzey bitirme denilmektedir. Farklı yüzey bitirme işlemi ve kür koşulları en fazla birkaç milimetrelik yüzey tabakasında anlamlı derecede farklı yüzey mikrodokulu yapı meydana getirmektedir (Sadegzadeh vd., 1987). 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 (OECD, 1972). Birincisi genel anlamda cilalanma ki agregaların yuvarlaklaşma eğilimidir. Tek tip

mineralli agregalarda görülür. İkincisi ise farklı cilalanmadır. Agregaya 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.

### 1.8.3.1. Aşınma Direnci Ölçüm Yöntemleri

Aşınma direncini ölçmek için birçok teknik ve deney yöntemi vardır. Her birinin aşınma direncine yaklaşımı değişik olduğundan kullanımdaki şartlara uygun olanını deneysel çalışmalarda kullanmak gerekir. Bu deney yöntemleri çelik bilyalarla aşındırma (ball bearing), aşındırıcı disk (dressing wheel), kuma çarptırma (shot blasting), kum çarptırma (sand blasting) olarak sıralanabilir. 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 agregaya danelerinin karıştırma ve sıkıştırma sırasındaki kırılma, köşelerden ufalanma dirençlerini belirlemede kullanılırken; aşındırıcı diskli test aletleri, malzemenin kullanılacağı alanlardaki yüzey aşınmasına direncini belirlemede kullanılmaktadır.



Şekil 7. Böhme aşınma test aleti



Şekil 8. Los Angeles aşınma test aleti

#### 1.8.4. 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 yanı sıra 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 (Ağar ve Taşdemir, 2007).

#### 1.8.4.1. 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 oluşturucu katkı yerine su/çimento oranı 0,4 olan 375 dozluk ve yüksek yoğunluklu beton önerilmektedir (Akakın, 2007).

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 (Ağar ve Taşdemir, 2007). 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 artışını 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 (Ağar ve Taşdemir, 2007).

#### **1.8.4.2. 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  $SO_3$  '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 kayaçlardan 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 -agrega 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  $SO_3$  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  $C_4A$  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 hidratasyonu 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 içyapısını etkileyip erozyona uğratırlar (Ağar ve Taşdemir, 2007).

### 1.9. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar göstermektedir ki oluşturulan beton yüksek dayanımlı beton sınıfına girmektedir. Yüksek dayanımlı betonlar hakkında literatürden aşağıda verilen bazı bilgilere ulaşılmıştır.

Günümüze dek betonun basınç altındaki davranışı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Ancak betonun kırılma davranışının daha iyi anlaşılması ve çekme ile ilgili özelliklerin ve kırılma parametrelerinin belirlenmesi için daha fazla bilgiye gereksinim vardır (Taşdemir vd., 1996).

Tek eksenli basınç altındaki betonun, gerilme şekil değiştirme eğrisinde en büyük gerilmedeki şekil değiştirmenin hassas olarak ölçülmesi önemlidir (De Nicola vd., 1994). Eğilme halinde, farklı yaşlardaki betonların eğilme dayanımı ile eğilme-çekme şekil değiştirmesi arasında kuvvetli korelasyonlar bulunmuştur (Welch, 1966; Oladapo, 1964). Basınç dayanımı  $80 \text{ N/mm}^2$ 'ye erişen betonların eğilmede çekme şekil değiştirme kapasitesi Giovambattista vd. (1992), tarafından hızlı ve yavaş yükleme koşullarında incelenmiştir. Bu araştırmacılar beton dayanımındaki artma ile eğilmedeki şekil değiştirme kapasitesinin arttığını göstermiştir. Brooks vd. (1987), de aynı dayanım ve işlenebilme özeliğine sahip betonların ısıl şekil değiştirme kapasitesinin kullanılan agreganın tipine bağlı olacağını göstermiştir.

Taşdemir vd. (1996), ise tek eksenli çekme durumunda betonun davranışını ve betonun kırılmasında çekme özelliklerinin başlıca işlevini gösteren bir çalışma yapmışlardır. Söz konusu çalışmada çentiksiz beton numunelerin geniş bir aralığında, tek eksenli çekme halinde kısa süreli çekme şekil değiştirme kapasitesinin “çekme dayanımı elastisite modülü” oranının verilmesiyle tahmin edilebileceği gösterilmiştir. Aynı çalışmada önerilen bağıntının yayınlanmış deney sonuçları ile iyi bir uyum sağladığı

belirtilmiş ve bağıntının kullanılan deney tekniği, agrega granülometrisi, kökeni ve en büyük agrega boyutu, ölçü boyu, betonun yaşı ve yükleme hızı gibi değişkenlerden bağımsız olduğuna işaret edilmiştir (Taşdemir vd., 1996).

Çok geniş bir dayanım aralığına sahip betonlar için tek eksenli çekme, eğilme, burulma ve tek eksenli basınç gibi farklı yükleme koşullarında betondaki en büyük gerilmelere karşı gelen şekil değiştirmelerin analizi için yeterli deney verisi literatürde mevcuttur.

Son yıllarda, beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedilmiştir. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi (Alexander,1993). Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200 - 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık  $30000 \text{ J/m}^2$  olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir (Walraven, 1999). Beton teknolojisinde söz konusu yüksek dayanımlı bu malzemeler Reaktif Pudra Betonları (RPC) olarak adlandırılırlar ve dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır (Bonneau vd., 1997; Dugat vd., 1996). Düşük porozite değerleri bu betonlara önemli dürabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırmaktadır. Bunlar, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme niteliği sağlamaktadır (Feylessoufi vd., 1996; Matte ve Moranville, 1999). Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Böylece dürabilite iyileştirilir ve dayanım yükseltilir. Silis dumanı veya diğer bir deyişle mikrosilika, silis ve ferrosilis endüstrilerinin bir yan ürünüdür; 1950'lerden beri betonun özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Bu tanelerin etkili olabilmesi için, beton içinde iyi bir dağılım gereklidir ve bunu da bir süperakışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır (Taşdemir vd., 1998; Taşdemir vd., 1999). Bununla birlikte, reaktif pudra betonlarının içyapısına yönelik olarak maksimum yoğunluğu sağlamak için karışımdaki tüm danelerin boyut dağılımı hassas biçimde optimize edilmektedir. Bunun için, RPC'nin granülometri eğrisi süreksiz olmalıdır. Ayrıca, çok yüksek dayanımlara erişmek için karışımdaki su miktarını azaltmak gerekmekte, sünekliği attırmak için ise kısa kesilmiş çelik teller eklenmekte ve sıcaklık yükseltilerek basınç altında sertleştirme süreci uygulanmaktadır.



Bu çalışmada, incelenecek olan KYB üzerinde literatürde çeşitli çalışmalar yapılmış bulunmaktadır. Bu malzemenin yol betonu olarak kullanılması planlanmaktadır. Bu bağlamda yollarda aranan özelliklere de dikkat çekmek gerekmektedir.

1990 yıllarına kadar karayolu kaplamalarında yol yüzeyinin performansında en önemli parametre olarak güvenlik ön plandaydı. Günümüzde ise, karayolu kaplamalarının en önemli özellikleri olarak güvenliğin yanında, çevre kirliliği, sürüş konforu ve kullanıcı maliyeti gibi faktörleri öne çıkmaya başlamıştır.

Mühendislik yönünden bakıldığında, yeni yapılmış bir beton yolun kabulü veya serviste olan bir beton yolun yüzey özelliklerinin kontrolü aşamasında en öncelikli performans kriteri, beton yolda belirli bir seyir hızında olan taşıtın, tekerlek lastiği ile yol yüzeyi arasında oluşan kayma-sürtünme katsayısının belirli bir seviyede olup olmadığı, yani beton yolun güvenli olup olmadığıdır. Bundan sonra gelen öncelikli performans kriteri ise, sürüş konfordur. Günümüzde, karayolu taşıt trafiğinin çok hızlı bir şekilde artması nedeniyle, ulaştırmanın çevre ve kullanıcıya maliyetleri (ekonomi) de önemli performans kriterleri arasına girmiştir. Konfor, çevre etkileri ve ekonomi ile ilgili teknik şartnameler ve standartlar, genellikle karayolu güvenliği ile ilgili teknik şartnameler ile çalışmakta ve bu da sorunlara yol açmaktadır. Beton kalitesinin gelişmesi ve beton yol yüzey yapım tekniklerinin gelişmiş olması da bu problemlerle karşılaşma olasılığını arttırmaktadır. Bu nedenle öncelikle, bu performans kriterleri ile yol yüzey özelliklerinin ilişkisinin ortaya koyulması gerekmektedir (Ergün ve Öztaş, 2004).

Yol olarak düşünülen bu betonun hareketli yüklere maruz kalacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bakımdan beton için diğer önemli bir faktör olan yorulma dayanımından da bahsetmek gerekmektedir.

### **1.9.1. Betonun Yorulma Dayanımı**

Bazı yapı elemanları, üzerinde bulunan statik yük dışında hareketli yüklere de maruz kalabilmektedir. Örneğin; köprü kirişlerinin üzerinde bulunan yükün miktarı, köprünün üstüne gelen vasıtanın ağırlığı ile artmakta, vasıta geçtikten sonra eski durumuna gelmektedir. Bu tür yapıların üzerinde hareketli yük olmadığı zamanda da belirli bir miktar gerilme mevcuttur. Hareketli yük geldikçe yapıda gerilme miktarı artış göstermekte, sonra eski durumuna dönmektedir; yapının üzerine uygulanan gerilme miktarı, belirli bir minimum değerle, maksimum bir değer arasında değişiklikler göstermektedir.

Maksimum statik gerilme değerlerinin altındaki gerilme değerlerinin tekrar tekrar uygulanmaları sonucunda malzemede yer alan kırılma olayına “yorulma” denilmektedir (Erdoğan, 2003).

Yorulma terimi, ilk olarak 1839 yılında Poncelet tarafından kullanılmış ve o yıllarda, tekrarlı yük altında kırılma olayını tanımlayan yerinde bir terim olarak kabul edilmiştir (Timoshenko, 1953). Aslında tekrarlı uygulanan yüklerin (gerilmelerin) etkisiyle, malzemenin bünyesinde yer almakta olan veya yeni oluşan mikro çatlaklar giderek daha büyük çatlaklara dönüşmekte, malzemenin kırılmasına yol açmaktadır. O nedenle, modern otoriteler, bu olay için “ilerleyen kırılma” teriminin daha uygun olacağı görüşünü taşımaktadırlar (Juvinall, 1967).

Bir malzemenin ne kadar sayıdaki yük tekrarı altında kırılacağı, o malzemeye tekrarlı olarak uygulanan toplam gerilme miktarının büyüklüğü ile ilgilidir. Uygulanan toplam gerilme miktarı azaldıkça, malzemenin kırılmasına yol açacak yük tekrarı sayısı artmaktadır.

Betonda belirgin bir yorulma sınırı yoktur. Betona tekrarlı olarak uygulanan gerilme değeri küçüldükçe, malzemenin kırılmasına yol açacak yük tekrarı sayısı çok fazla artmaktadır. Genel olarak, betondaki yorulma sınırı, 10 milyon yük tekrarı karşılık gelen gerilme değeri olarak kabul edilmektedir.

Yorulma dayanımı, belirli sayıdaki yük tekrarı altında, malzemenin kırılmadan direnebileceği en büyük gerilme değeri olarak tanımlanmaktadır (Erdoğan, 2003).

### **1.10. Kendiliğinden Yerleşen Beton**

KYB, kendi ağırlığı ile sık donatılı dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç veya dış vibrasyon gerektirmeksizin kendiliğinden sıkışabilen, bu özelliklerini sağlarken, segregasyon ve terleme gibi problemler yaratmayacak kohezyonunu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı özel bir beton türüdür (Felekoğlu, 2003).

Klasik beton tasarımından 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 tasarımında uygun oranlarda kullanılmasına yönelik yeni deney yöntemleri ve dolayısıyla standartlar geliştirilmektedir (Felekoğlu, 2003).

KYB, özellikle hazır-beton sektörü, onarım ve güçlendirme işleri ve prefabrike sektörü başta olmak üzere inşaatın değişik dallarında giderek daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. KYB kendi ağırlığı ile herhangi bir vibrasyon gerektirmeden kolayca yerleşebilmesi, yüksek ayrışma direncine sahip oluşu, yüksek dayanıklılık özelliği gibi nedenlerle yüksek performanslı beton üretimine olanak vermektedir.

### **1.10.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tarihçesi**

KYB kullanımı 1980 yılı sonlarına doğru Japonya'da sıkıştırmanın pratik olmadığı, kısıtlanmış yerlerde betonun yerleştirilmesi ve sık donatılı elemanların dökümü için kabul görmüştür. Japonya'da 1983 yılından itibaren usta işçilerin sayısındaki azalma ile beton yapıların dayanıklılığı problemi büyük bir ilgi odağı haline gelmiş ve bu konuda çözüme yönelik araştırmaların başlamasına neden olmuştur. Gelecekte dayanıklı yapılar garanti etmek için KYB'nin geliştirilmesi şart olmuş ve farklı inşaat alanlarında kullanmanın yararlarını ve avantajlarını görmek için dünyada değişik araştırmalar yapılmıştır (Okumara ve Ouchi, 1999).

Betonda kendiliğinden yerleşebilirlik kavramı ilk olarak Tokyo Üniversitesinde 1986 yılında öğretim üyelerinden Hajime Okamura tarafından ortaya atılmıştır. Kendiliğinden yerleşen beton konusunda ilk makale, 1989 yılında Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği Konferansı'nda (EASEC) sunulmuştur. KYB konusunda ilk kitap Okamura tarafından yazılmış olup, 1993 yılında Japonca olarak yayınlanmıştır (Felekoğlu, 2003).

İlk KYB uygulaması 1980'lerin başında İtalya'nın S.Marco Rihtim inşaatında sualtı temel betonu dökümünde 40.000 m<sup>3</sup> Reoplastik Beton kullanılarak yapılmıştır (Kandemir, 2005).

2000 yılı sonunda KYB kullanımı Amerika'da yaygınlaşmaya başlamıştır. Prefabrike beton endüstrisi bu gelişmeye hızla ayak uydurmuş fakat hazır beton endüstrisinde kullanımı kısıtlı kalmıştır (Felekoğlu, 2003).

### **1.10.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları ve Dezavantajları**

Kendiliğinden yerleşen betonların avantajları ve dezavantajları aşağıda belirtilmiştir.

### **1.10.2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Avantajları**

Taze betonu sıkıştırma ihtiyacı ortadan kalkacak, böylece vibratör kullanımının yarattığı zaman, enerji ve para kaybı ortadan kalkacaktır. Vibratör kullanımının çevreye yaydığı gürültü kirliliği (özellikle prefabrike beton sektörü için) önlenecektir (Walraven, 2002).

Betonun sık donatılı perde tipi dar ve derin kesitlere kendi ağırlığı ile boşluk bırakmadan yerleşmesi betonun mekanik performansını arttıracaktır (Felekoğlu, 2003).

Efektif kimyasal katkıların KYB üretiminde kullanımıyla, prefabrike sektöründe erken kalıp alma için, özellikle kış aylarında uygulanan buhar kürü ortadan kaldırılabilir (Corradi vd., 2002).

KYB'nin perdahlanabilirliği geleneksel betona kıyasla daha rahattır. Beton dökümünü önemli ölçüde hızlandırır (Felekoğlu, 2003).

KYB kalıp yüzeylerinde sağladığı boşluksuz görünüm ile sıva ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Fakat bu durum aynı zamanda bir dezavantaja dönüşebilir; sıva yapılması gerekiyorsa pürüzsüz yüzeyi sebebiyle KYB sıva tutmayabilir (Felekoğlu, 2003).

### **1.10.2.2 Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dezavantajları**

KYB malzeme maliyeti açısından normal betona kıyasla daha pahalıdır. Maliyeti arttırıcı ana etken efektif kimyasal katkılar olup, gelecekte bu katkıların maliyetlerinin düşmesi beklenmektedir (Kandemir, 2005).

KYB'nin performansı malzeme tip ve oran değişkenliklerine hassastır (özellikle agrega nemi ve gradasyonu). Klasik betona göre daha sıkı kontrol gerektirir. Kesinleşmiş tasarım yöntemi ve standart deneylerinin yokluğu kalite kontrol işlerinde genelleme yapılmasını engellemekte ve standartlaştırmada sıkıntılara yol açmaktadır. Geleneksel betona göre yüksek oranda toz malzeme içerdiği için, boyutsal stabilitesi toz malzemenin tipine göre farklı sonuçlar doğurabilir (Felekoğlu, 2003).

Prefabrike beton üretiminde mevcut kalıp sistemlerinin bir kısmı KYB kullanımına uygun değildir (çatı makası gibi eğimli elemanlar). Kalıp sistemlerinin KYB kullanımına göre modifiye edilmesi gereklidir. % 2'den fazla eğimli elemanlar KYB ile dökülemez (Tviksta, 2000).

KYB dilatant yapısı gereği, belli bir süre karıştırılırsa akıcılığı artar başka bir deyişle viskozitesi düşer. Viskozitesinin kararlı bir konuma gelmesi için gereken karıştırma süresi normal betona kıyasla daha fazladır. Bu özellik zaman ve enerji kaybına yol açacaktır. Fakat bu kayıp yerleştirme işlemindeki kolaylıklar dikkate alındığında ihmal edilebilecek kadar azdır (Felekoğlu, 2003).

### **1.10.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları**

Günümüzde KYB özel tip betonlar sınıfında sayılabilir. Genellikle büyük boyutlu inşaatlarda, sık donatılı dar kesit özelliklerinin bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, tamir, bakım ve yenileme işlerinde, tünel gibi özel kalıp gerektiren işlerde kullanılan KYB henüz normal beton kadar geniş kullanım alanına sahip değildir. Bunun en önemli nedeni maliyetinin yanı sıra, tasarım ve uygulama alanlarında yeni yöntemler gerektirmesidir. KYB üretiminde yöntem geliştirilmesi çalışmaları çeşitli kuruluşlar tarafından devam ettirilmektedir.

Geleneksel betonun teknik olarak kullanımının mümkün olamayacağı durumlarda KYB kullanımı tercih edilebilir. Örneğin, bakım ve onarım işlerinde betonla doldurulacak bölgeye vibratör girmesi mümkün değilse geleneksel beton kullanılamaz. Böyle bir durumda KYB kullanımı en akılcı çözüm olacaktır (Felekoğlu, 2003).

ABD’de KYB’nin kullanımı otoyol köprü inşaatlarında oldukça sınırlıdır. Bununla beraber, Amerika prefabrik endüstrisi KYB teknolojisini mimari beton uygulamalarında kullanmaya başlamıştır. KYB, otoyol köprü inşaatlarında daha geniş uygulama için yüksek bir potansiyele sahiptir. 2000 yılında Japonya’da prefabrik elemanlarda ve hazır beton olarak kullanılan KYB miktarı yaklaşık, 400.000 m<sup>3</sup> olmuştur (Ouchi vd., 2003).

Geleneksel beton ile yol üst kaplaması inşaatında yüzeysel vibratörler kullanılmaktadır. Amerika’da özellikle donma-çözülme riski olan bölgelerde, hava sürükleyici katkı kullanılarak hava içeriği yüksek beton tasarımları hazırlanmaktadır. Fakat vibrasyon işlemi taze betonda hava kabarcığı kaybına yol açabilmektedir. Örneğin, Iowa eyaletinde servis ömründen çok daha önce donma-çözülme hasarına uğrayan yol kaplamaları tespit edilmiştir. Bu kaplamaların taze haldeki hava içerikleri şantiyede ölçüldüğünde yüksek seviyelerde olduğu raporlarda görülmüştür. Fakat yerleştirme sırasında yapılan vibrasyonun beton içindeki hava yapısını özellikle yüzey bölgesini bozduğu ve taze betonun hava içeriğini azalttığı belirlenmiştir. Bu örnekte de görüldüğü

gibi, vibrasyon işleminin yararın yanında zarar da getirdiği durumlar söz konusudur (Hughes vd., 2002).

Yol üst yapısında geleneksel beton kullanılması halinde yetersiz veya aşırı sıkıştırma, taşıma sırasında segregasyon, yerleştirme süresi ve dayanım kazanma hızı (trafiğe açılma süresi) gibi sorunlarla karşılaşmaktadır (Felekoğlu, 2003).

Beton bileşenleri çimento, mineral agrega, su ve zaman zaman kimyasal katkılarıdır. Belirtilen bileşenlerin her birinin karışımda, çok iyi tanımlanmış rolü ve etkisi bulunmaktadır. Ayrıca her bileşenin, amaçlanan özelliklerin elde edilmesinde önemli katkısı vardır.

KYB'nin aşağıdaki taze beton özelliklerini taşıması gerekir. 65-80 cm yayılabilme özelliğini sağlayabilmek ve işlenebilirliğini min. 1 saat koruyabilmek ve bunları yaparken de betonun segregasyonunu ve terlemesini engellemek tasarımın en önemli hedefleridir. Beton yüksek oranda kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcılarla yüksek akışkanlık özelliğine sahip olsa da, segregasyonunu engellemek ve uzun çalışma süresine sahip olabilmesi ancak iyi bir karışım tasarımı ve doğru kimyasal katkılarla mümkün olabilir (Aykan vd., 2004).

Karışım tasarımı yöntemleri ve kendiliğinden yerleşebilirlik deney yöntemleri araştırmaları, KYB'yi standart beton haline getirmiştir. Bu araştırmaların sonucunda Kendiliğinden Yerleşen Beton'nun test edilebilmesi için bazı deneysel yöntemler ve tasarım yöntemi ortaya çıkmıştır. EFNARC 2002 yılında Kendiliğinden Yerleşen Beton ile ilgili gerekli tüm bilgileri içeren "Specification and Guidelines for SCC" isimli dökümanı yayınlamıştır (Efnarc, 2002).

(EFNARC; Uzman yapı kimyasalcılarına ve beton sistemlerine ithafen oluşturulmuş bir Avrupa federasyonudur. Avrupa'da birçok Avrupa'lı şirketin bu federasyona üyeliği bulunmaktadır. EFNARC'ın ana faaliyet alanları; CEN Teknik komitesinde ve Avrupa seviyesinde, zemin kaplamaları, beton koruma ve tamirleri, yumuşak zemin tünelleri, püskürtme betonlar ve kendiliğinden yerleşen betonlardır.)

#### **1.10.4. Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneyleri**

KYB, TS EN 206-1'deki en yüksek kıvam değerinden daha yüksek kıvama sahiptir (TS EN 206). Bu nedenle de, bu standartta tarif edilmemiş bazı özelliklere sahip olmalıdır.

65-80 cm yayılabilme özelliğini sağlayabilmek ve işlenebilirliğini min.1 saat koruyabilmek ve bunları yaparken de betonun segregasyonunu ve terlemesini engellemek tasarımın en önemli hedefleridir. Beton yüksek oranda kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcılarla yüksek akışkanlık özelliğine sahip olsa da, segregasyonunu engellemek ve uzun çalışma süresine sahip olabilmesi ancak iyi bir karışım tasarımı ve doğru kimyasal katkılarla mümkün olabilir.

Hacimsel olarak; betonun %50'si harç ve %50'si kaba agregadan oluşmalıdır. %50'lik harç kısmının da %30'u çimento, %30'u su ve %40'ı ince agregadan oluşmalıdır.

Düşük W/C oranı elde edebilmek ve uzun süreli işlenebilirlik için Polikarboksilik eter esaslı Hiper akışkanlaştırıcı katkıları kullanılabilir.

Bu tasarım yöntemine göre tipik karışım için tavsiye edilen malzeme miktarları aşağıdaki gibidir.

Tablo 5: KYB'nin tasarım yöntemine göre tavsiye edilen malzeme miktarları

İnce Malzeme Miktarı ( $<0,125$ mm)	400-600 kg/m <sup>3</sup>
Kum Miktarı (0,125 mm-4 mm)	Yaklaşık olarak harç hacminin %40'ı
Kaba Agregası Miktarı D <sub>max</sub> = 15 cm	Yaklaşık olarak gerçek birim ağırlığının %50'si
Uçucu Kül Miktarı	Yaklaşık olarak çimento + uçucu kül hacminin %40'ı
Su/Toz	0,9-1,0 (Hacimsel olarak)

KYB'de kullanılacak malzemelerin özellikleri, genel olarak TS EN 206-1 standardında belirtilen standartlara uygun olmalıdır.

Çimento, TS EN 197-1'e uygun olmalıdır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarı %10'nun üzerinde olan çimentolar çalışma süresinin kısılmasına neden olur.

Agrega, TS EN 12620'ye uygun olmalıdır. Partikül boyutları uygulama yapılacak yere göre değişmekle birlikte, D<sub>max</sub> için genellikle üst limit değer 20 mm'dir. Agreganın içindeki; partikül boyutu 0,125 mm'nin altında olan malzemeler tasarımda ince malzeme miktarına dahil edilmelidir.

Karışım Suyu, TS EN 1008'e uygun olmalıdır.

Süper Akışkanlaştırıcı, TS EN 934-2'ye uygun olmalıdır. Süper akışkanlaştırıcı, KYB'nin çalışma süresinin ayarlanmasındaki asıl bileşendir. Bu nedenle kimyasal katkı seçiminde, erken dayanım kaybı yaşattırmayacak (geciktirici özellikli olmayan) ve aynı zamanda betona min. 1saat çalışma süresi özelliği katabilecek özellikte bir katkı olmalıdır. Bu özellikte ancak polikarboksilik eter esaslı özel polimerlerle sağlanabilir.

Viskozite Ayarlayıcı, segregasyonu yok etmek için katılabilir. Fakat iyi bir tasarımla viskozite ayarlayıcıya ihtiyaç duyulmadan da KYB üretilebilir. Bu katkının herhangi bir EN Standardı yoktur. Eğer kullanılacaksa TS EN 934-2'in Tablo1 bölümündeki genel özellikler mutlaka sağlanmalıdır.

Hava Sürükleyici, betonu, donma-çözünmelere karşı daha dirençli hale getirmek için kullanılabilir. Eğer kullanılacaksa TS EN 934-2 standardına uygun bir hava sürükleyici katkı kullanılmalıdır.

Mineral Katkı Tasarıma bağlı olarak aşağıdaki mineral katkılardan biri veya bir kaç KYB içinde kullanılabilir.

Filler Tozu, TS EN 12620'ye uygun olmalıdır. İnce kırma taş, dolomit veya granit tozu, tasarımda ihtiyaç duyulan 0,125 mm'den küçük ince malzeme miktarını sağlamak için kullanılabilir. Dolomit alkali karbonat reaksiyonuna sebep olacağı için risklidir. Eğer kullanılacaksa tasarımda miktarı çok iyi ayarlanmalıdır.

Uçucu Kül, TS EN 450'ye uygun olmalıdır. Puzzolonik özellikli ince inorganik bir malzemedir. KYB özelliklerini geliştirmek için kullanılabilir. Kullanımından önce mutlaka standarda uygunluğu kontrol edilmelidir.

Silis Dumanı, Betonun mekanik özelliklerini artıracığı gibi, kimyasallara da dirençli hale getirerek beton durabilitesine olumlu yönde etki eder.

Yüksek Fırın Curufu, Betonun reolojik özelliklerini geliştirmek için kullanılabilir.

Lif, çelik veya polimer lif olabilir. Normal betonda olduğu gibi KYB'nin özelliklerini artırmak için kullanılabilir. Çelik lif mekanik direnci ve eğilme dayanımını artırmak için, polimer lif ise segregasyonu ve plastik rötreyi azaltmak veya yanma direncini artırmak için kullanılabilir.

Bir betona KYB denebilmesi için aşağıdaki özelliklerin ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının da verilen sınır değerlerinin içinde kalması gerekir. Bu özellikler:

- Doldurma Kabiliyeti "Filling Ability"
- Geçme Kabiliyeti "Passing Ability"
- Ayırmaya Karşı Direnç "Segregation Resistance"



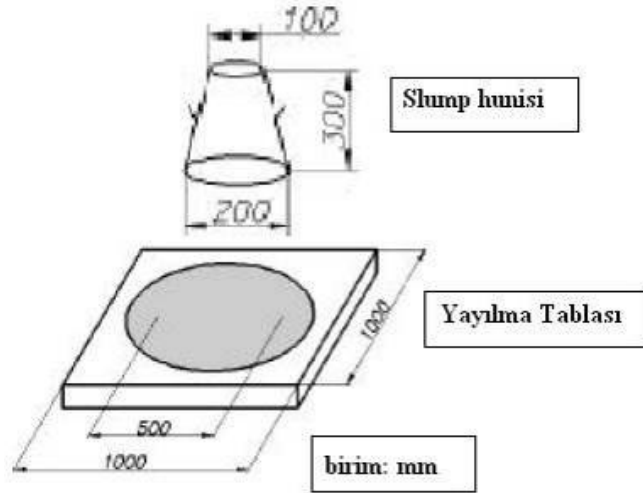
Bu parametrelerin ölçülmesi için bazı deney yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler ve kabul edilebilir limit değerleri Tablo 6.'de verilmiştir (Aykan vd., 2004)

Tablo 6. KYB test metodları ve kabul edilebilir limit değerleri (EFNARC, 2002).

Deney Metodu	Ölçülecek Özellik	Birim	Limit Değer	
			Min	max
Yayılma Tablasında Yayılma	Doldurma Kabiliyeti	mm	650	800
Yayılma Tablasında İlk 50 cm yayılma için geçen süre	Doldurma Kabiliyeti	sn	2	5
V-Funnel	Doldurma Kabiliyeti Ayrışmaya Karşı Direnç	sn	6	12
U-Box Yükselme Miktarı Ölçümü (H)	Geçme Kabiliyeti	mm	30	-
Fill Box	Geçme Kabiliyeti	%	90	100

#### 1.10.4.1. Çökme Yayılma Deneyi

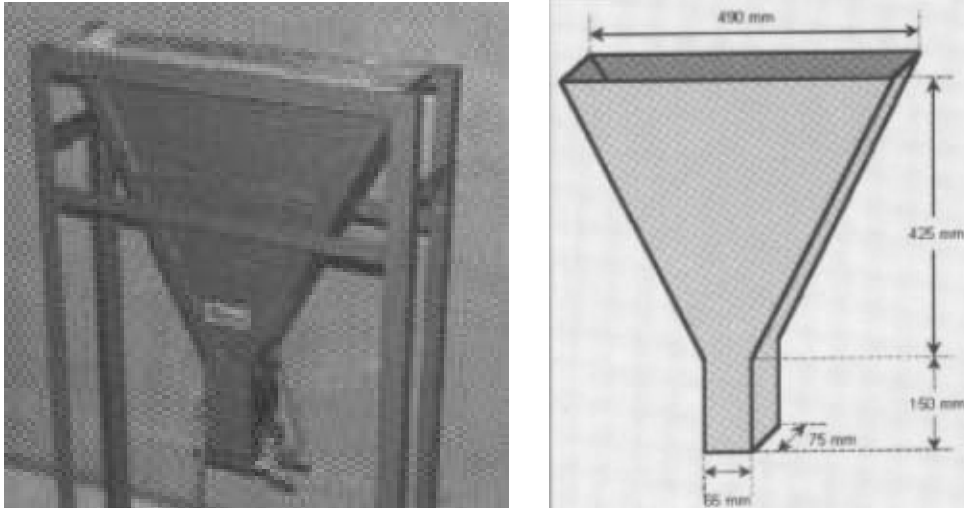
Alman Standardı DIN 1048'de yer alan çökme konisi kullanılabileceği gibi klasik çökme konisi de kullanılabilir. Bazen koni ters konumda, yani geniş ağzı üste kalacak şekilde de yerleştirilebilir. Alta konulan çelik plak üzerine çizilen 50 cm çaplı bir dairenin merkezine yerleştirilen koni beton ile şişleme yapmadan, doldurulduktan sonra yukarıya çekilerek herhangi bir sarsma yapmadan betonun kendi ağırlığı ile yayılması beklenir. 50 cm çaplı daireye ulaşmaya kadar geçen süre ölçülür ve t50 olarak kaydedilir. Bu değer betonun başlangıçtaki akış hızını verir ve yukarıda belirtilen sınır değerleri içinde kalmalıdır. Yayılma tamamlandıktan sonra iki farklı noktadan yayılma çapları ölçülerek kaydedilir (D1, D2)(Özkul, 2002).



Şekil 9. Yayılma tablası ve hunisi boyutları

#### 1.10.4.2. V Funnel Akış Deneyi

Bu deney Betonun dar bir aralıktan geçiş yeteneğini ve viskozitesini ölçmeye yöneliktir. V Funnel deney aletinin içi en üst seviyesine kadar doldurulduktan sonra alt uçtaki kapak açılarak akış başlatılır. Üsten bakıldığında alttan ışık geçmeye başladığı ana kadar geçen süre ölçülür (Özkul, 2002).



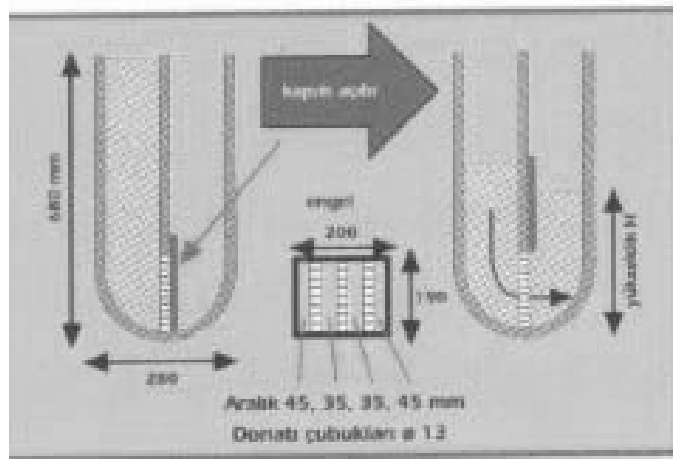
Şekil 10. V funnel aleti ve ebatları

### 1.10.4.3. U Box Deneyi

U borusu şeklinde iki kutu yan yana yerleştirilmiş ve aralarında alttan  $19 \text{ cm}^2$ 'lik bölüm açık olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu açıklığa 10mm çaplı 5 adet çelik çubuk aralarında 35 mm aralık kalacak şekilde düşey konumda yerleştirilmiştir. Beton doldurulmadan önce bu açıklık hareket edebilen bir kapak ile kapatılır. Kutulardan birisi belirli bir yüksekliğe kadar doldurulduktan sonra kapak düşey olarak kaldırılır ve betonun diğer kutuya akması sağlanır. Beton kendi ağırlığı altında bu kutuyu belirli bir yüksekliğe kadar doldurur. Burada hem betonun donatılar arasından geçme yeteneği hem de doldurma yeteneği ölçülmektedir. Doldurma işlemi bitene kadar geçen süre ve ikinci kabinde betonun yükselme değeri kaydedilir (Özkul 2002).



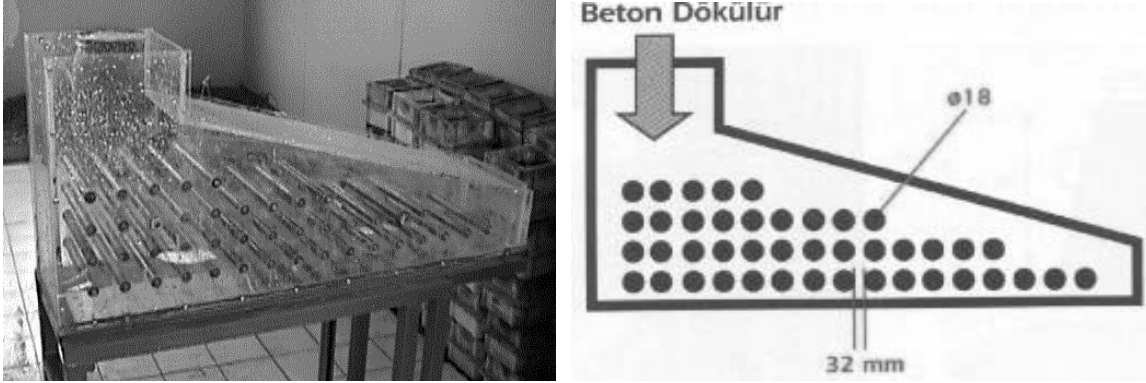
Şekil 11. U box aleti



Şekil 12. U box deneyinin uygulama şekli

#### 1.10.4.4. Fill-Box Metodu

Betonun ağırlığı altında sıkı donatı çubukları arasından akarak, doldurma kabiliyetini ölçmek için kullanılan bir deneydir. Betonun segregasyon ve terleme yapmadan sıkı donatılar arasından akışını gözlemleyerek ölçülür (Aykan vd., 2004).



Şekil 13. Fill box aleti

#### 1.11. Beton Yolların Yüzey Yapısı

Yol kaplama yüzeyinin pürüzlülüğü üç başlık altında incelenmektedir. Bunlar, yüzey düzgünlüğü (yüzey teğetinden sapmalar), dalgalanmalar ve tekerlek-yüzey arası sürtünme katsayısı değeridir. Yol kaplaması sahip olacağı pürüzlülükle, yapısal sağlamlığının yanında taşıtların güvenli, konforlu ve ekonomik bir şekilde seyretmelerine uzun yıllar boyunca olanak sağlamalıdır.

Tüm yol tipleri için yol yüzey özelliklerinin uluslararası tanımı PIARC (Permanent International Association of Road Congresses) tarafından 1987 yılındaki kongresinde yapılmıştır (Kuennen, 2003). Bu tanımlamaya göre, yol yüzey özellikleri, yolun gerçek profilinin, yolun teorik profilinden sapmaları olarak belirtilmiştir. Yol yüzey özellikleri, bu sapmaların dalga boyuna ( $\lambda$ ) bağlı olarak, yol yüzey dokusu ve geometrik düzgünlüğü olmak üzere iki ana kısma ayrılmıştır (Şekil 14). Bu tanımlama aşağıdaki gibi belirtilebilir;

Yol Yüzey Dokusu-Pürüzlülüğü:

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

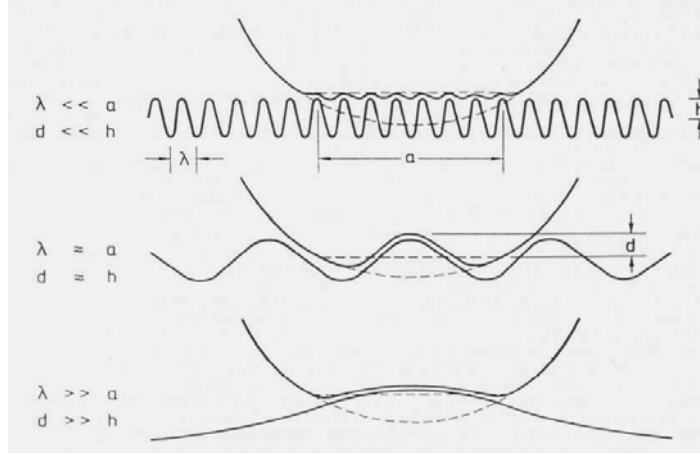
Makro doku  $0,5 \text{ mm} < \lambda < 50 \text{ mm}$ .

Mega doku 50mm.  $< \lambda < 500$  mm.

Geometrik Düzgünlük:

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

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



Şekil 14. Yol yüzey özelliklerindeki farklı durumların basit gösterimi (Piarç, 1987).

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 (Karpuz 2008).

### 1.11.1. Geometrik Düzgünlük

Geometrik düzgünlük yolun teorik yüzeyi ile gerçek yüzey arasındaki farklılıktan ileri gelir. İki yüzey arasındaki düşey farkların problemi üç boyutludur. Ancak yol mühendisleri yalnızca enine ve boyuna profilleri inceleyerek problemi iki boyutlu hale indirgemişlerdir.

- Yapım sırasında iyi bir geometrik düzgünlük elde edilmesi;
- Üniform kıvama ve yeterli bir islenebilirliğe sahip, serme makinelerine uyum sağlayabilen beton kullanılması,
  - Beton santrali kapasitesinin, serme makinelerini, duraklamalara yol açmayacak şekilde sürekli besleyebilecek düzeyde olması,
  - Şantiye uzaklığının, taşıma sırasında betonun prizinden sakınmak için sınırlandırılması,
  - Taban zemininin ve kaplama altının yeterli ve üniform bir dayanıma sahip olması ve iyi tesviye edilmesi,
  - Kalıpların, makinelerin geçişleri sırasında yerlerinden oynamayacak şekilde ve proje kotunda monte edilmesi,
  - Taze betona donatıların vibrasyonla gömülmesi sırasında geometrik düzgünlüğün bozulmamasına özen gösterilmesi,
- faktörlerine bağlıdır (Karpuz, 2008).

### **1.11.2. Pürüzlülük**

Pürüzlülük, PIARC tarafından üç seviyede tanımlanmıştır.

#### **1.11.2.1. Mikro Pürüzlülük**

Mikrodoku düşeyde 0,001 mm ile 0,5mm, yatayda 0,5 mm den küçük çıkıntıları kapsar. Beton yüzeylerin mikrodokusu çoğunlukla çimento hamurundaki ince agregalarca ve agrega yüzey özellikleri tarafından 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 arttırarak etkili temas alanı oluşturur. Bu noktada çimento hamuru ile agrega yüzeyi arasındaki aderans önem kazanmaktadır.

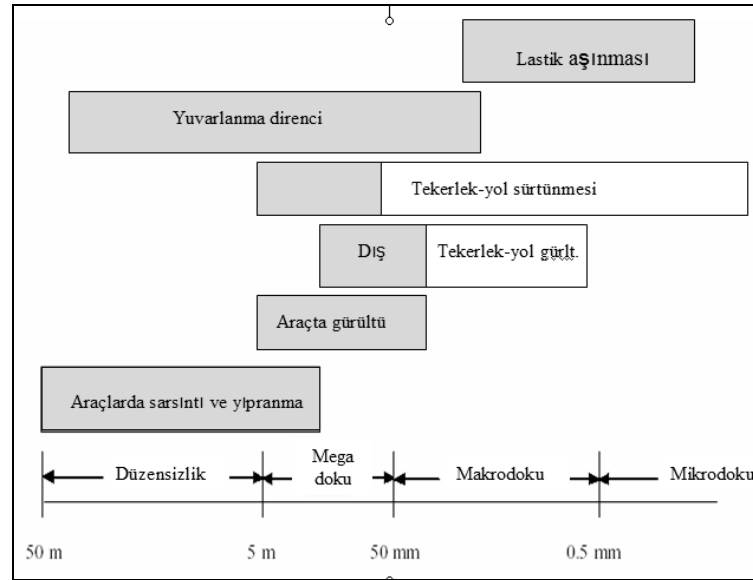
#### **1.11.2.2. Makro Pürüzlülük**

Makrodoku düşeyde 0,5 mm ile 20 mm 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 derinliği veya ortalama profil derinliği olarak ifade edilir (Henry, 2000).

### 1.11.2.3. Mega Pürüzlülük

PIARC tanımıyla mega doku, yatayda 50-500 mm, düşeyde 20-50 mm ölçülere sahiptir (Şekil 15). Pürüzlülükten daha çok kaplama yüzeyindeki dalgalanma, kusur, arıza olarak algılanmaktadır.



Şekil 15. Yol yüzey özelliklerinin araçlara etkisi (Piarc, 1987).

### 1.11.2.4. 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 gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda yol yüzeyi mikrodokusunun tekerlek lastiğinin aşınmasında belirleyici bir rolü olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla; tekerlek lastiği ile yol yüzeyi arasındaki aderansın büyük bir kısmının mikrodoku seviyesinde gerçekleştiği görülmektedir. (Karpuz, 2008).

### 1.11.3. 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 iç içe geçmiş bu pürüzleri birbirinden ayıracak bir kuvvet uygulamak gereklidir. Hareketin zıt yönünde oluşan sürtünme kuvvetlerinin nedeni budur.

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.

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.

$$F_s \leq \mu_s \cdot N \quad (7)$$

$\mu_s$ : 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;

$$F_k = \mu_k \cdot N \quad (8)$$

eşitliği sağlanacaktır. Burada  $\mu_k$  kinetik sürtünme katsayısıdır ve  $\mu_s$  statik sürtünme katsayısından küçüktür. Bazı cisimler arası sürtünme değerleri Tablo 7 de verilmiştir.



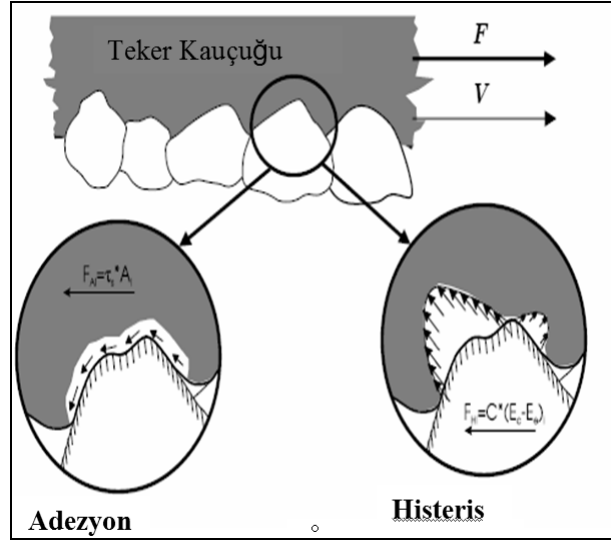
Tablo 7. Bazı durumlardaki statik ve kinetik sürtünme katsayısı değerleri (Karpuz, 2008).

	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. Tekerlek yol yüzeyi etkileşimi tarih boyunca 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 (Karpuz,2008).

#### 1.11.3.1. Tekerlek-Yol Etkileşim Mekanizması

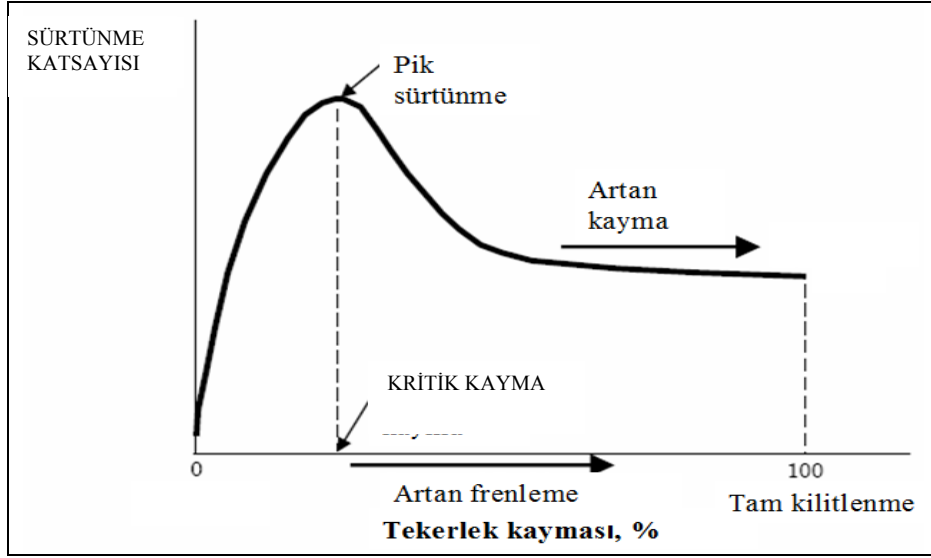
Sürtünme kuvvetleri kabaca iki kuvvetin toplamıdır. Birincisi arayüzdeki temas noktalarındaki yüzeylerin birbiri üzerinden kaymalarını engelleyen adezyon, diğeri ise bu noktalardaki çıkıntılardan dolayı tekerlek kauçuğunun içeri doğru deformasyonunu sağlayan basınçtır (histeris) (Şekil 16). Adezyon mikrodokuyla ilgili iken histeris makrodokuyla ilgilidir. Her ikisi de frenleme sırasında visko-elastik kauçuğun yerdeğiştirmesine karşı direnç oluşturarak enerji kaybettirir. Islak kaplamalardaki su filmi, temas eden yüzeyler arasında bir çeşit yağlanma etkisi yapar ve aracın hızı arttıkça adezyonu azalır (Henry, 2000).



Şekil 16. Tekerlek ile yol temas noktalarındaki sürtünme kuvvetleri (Henry, 2000).

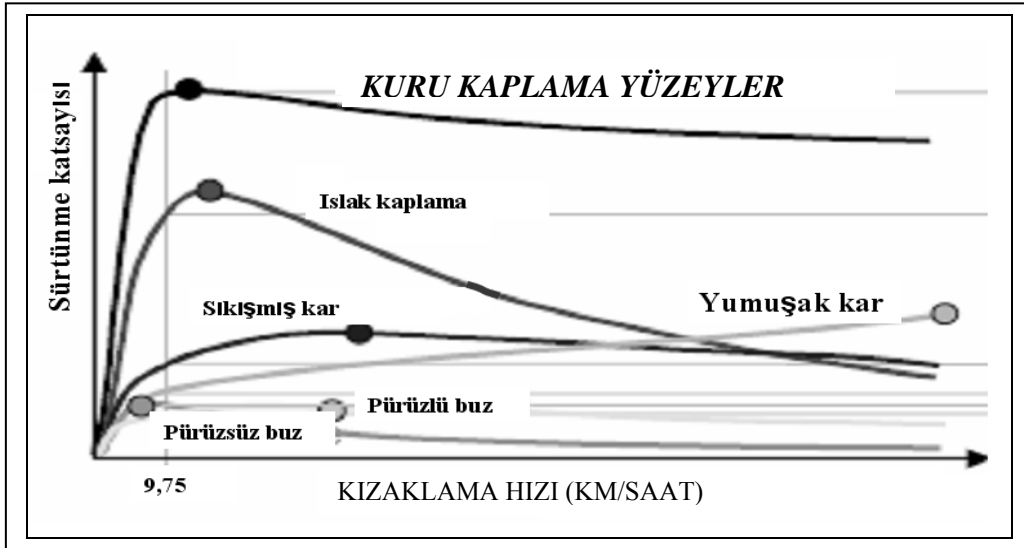
Hız arttıkça tekerlek-yol temas alanları küçülür ve sürtünme katsayısı azalır. Hız artışının karesi oranında fren mesafesi uzar (Moore, 1975).

Sürtünme katsayısı aynı yol tekerlek şartlarında kayma derecesine göre değişik değerler alabilmektedir. % 10–20 arasındaki kritik bir kayma noktasına kadar hızla yükselmekte sonra tam kızıklamadaki değerine kadar hızla azalmaktadır. Islak kaplamalardaki kayıp daha fazla olmaktadır. Bu durum Şekil 17. ve Şekil 18. de görülmektedir (Henry,2000; Moore,1975).



Şekil 17. Sürtünme katsayısı değerinin frenleme derecesiyle değişimi (Henry, 2000).

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 18. Sürtünme katsayısı kayma hızı ilişkisi (Henry, 2000).

Pik sürtünme değeri yaklaşık 9,75 km/saat kızaklama değerinde meydana gelmekte, frenleme sırasında tekerlekteki kilitlenme arttıkça sürtünme değeri de hızla düşmektedir.

Aynı yol kaplamasının farklı yüzey durumlarında elde edilen sürtünme katsayısı-kızaklama ilişkisi Şekil 18. de gösterilmektedir

Yol kaplama tabakasının malzemesine, ıslak olup olmamasına göre kızaklamadaki sürtünme katsayısı kaybı da farklı olmaktadır (Tablo 8). Islak yollarda en az kayıp beton kaplı yüzeylerde olurken, sonra asfalt yollarda olmaktadır. En çok kayıp yüzeyi buz tutmuş yollarda olmaktadır (Kuennen, 2003)

Tablo 8. Yol yüzeyi durumuna göre kızaklamada sürtünme katsayısı kaybı değerleri (Kuennen, 2003).

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 basıncı artarsa adezyon tipi sürtünme azalır. Düşük yüklü test tekerleği ile kuru rijit yüzeyde yapılan ölçümlerde aynı tekerleğin ağır yükte 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, cilalanma olarak da bilinen, aynı sertlikteki minerallerden oluşmuş agregaların yüzeylerindeki çıkıntıların yuvarlaklaşması şeklinde olur. İkincisi ise sertlikleri farklı minerallerden oluşan agregalarda oluşandır ki bunda yumuşak kısımların aşınmasıyla sert olanları çıkıntılar oluşturur. Böylece pürüzlülük muhafaza edilmiş olur (Henry, 2000).

Mevsimler yol kesimindeki sürtünme katsayısı üzerinde etkilidir. Sürtünme katsayısı yazın sonlarında en düşük değere sahip olur. Ilıman kışın hâkim olduğu yerlerde de en yüksek değerlerdedir. Yazın yağış olmadığından tekerlek ile yol arasında sürekli toz parçacıkları vardır. Yol yüzeyinin mikrodokusu tozlarla doludur ya da aşınmıştır, sürtünme azalır. Fakat kışın yağın yağmur suları bu tozları uzaklaştırır. Agregalar yıkanır, mikrodoku 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 katsayısını azaltır.

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 arttırılmış yüksek cilalanma direncine sahip ince agrega içeren beton karışımlardan üretilmiş yolların 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 ya da yapay agrega kullanıldığında aşınmaya bağlı olarak sürtünme katsayısı değerinde oluşacak kayıp daha az olacaktır (Henry,2000).

### **1.11.3.2. 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 (Henry, 2000).

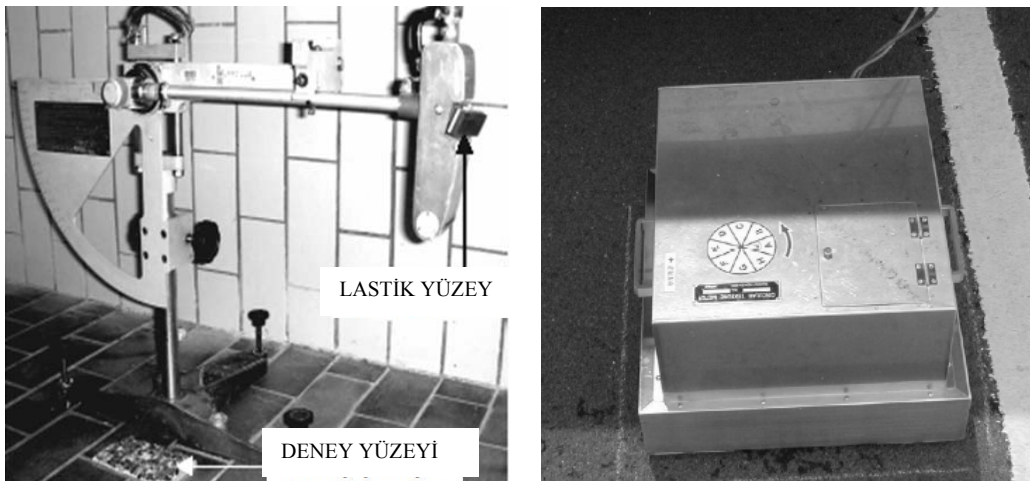
### **1.11.3.3. Sürtünme Katsayısı Ölçüm Yöntemleri**

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 (Henry, 2000).

- Tam kilitlemede 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.

Laboratuvar ölçümleri için hâlihazırda yaygınlıkla kullanılan iki ana ölçüm yöntemi bulunmaktadır: British Portable Tester (BPT, ASTM E-303) ve Japon Dynamic Friction Tester (DFT, ASTM E-1890) (Şekil 22). BPT belli bir konumdan serbest bırakılan ucunda lastik bulunan kolun yüzeye belirli bir uzunluk boyunca sürttükten sonra çıkabildiği yüksekliğin 0-150 arası bir sıklarda ölçülmesiyle kaybettiği kinetik enerjinin bulunması yöntemiyle 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 hızla bağlı olarak sürtünme katsayısı değerini vermektedir.



Şekil 19. İngiliz sürtünme pandülü ve Japon dinamik sürtünme ölçer

Arazideki ölçümler içinse önceleri BPT kullanılıyordu. Ancak günümüzde artık araçlara ya da çekilen römorklere yerleştirilmiş yukarıda bahsedilen dört yöntemden biriyle çalışan yazılım destekli dinamik sürtünme ölçüm sistemleri kullanılmaktadır (Şekil 20). Bunlar ölçüm tekerleğine etkiyen çekme kuvvetinin ya da çevirme momentinin frenleme boyunca sürekli ölçülmesiyle çalışmaktadırlar (Karpuz, 2008).



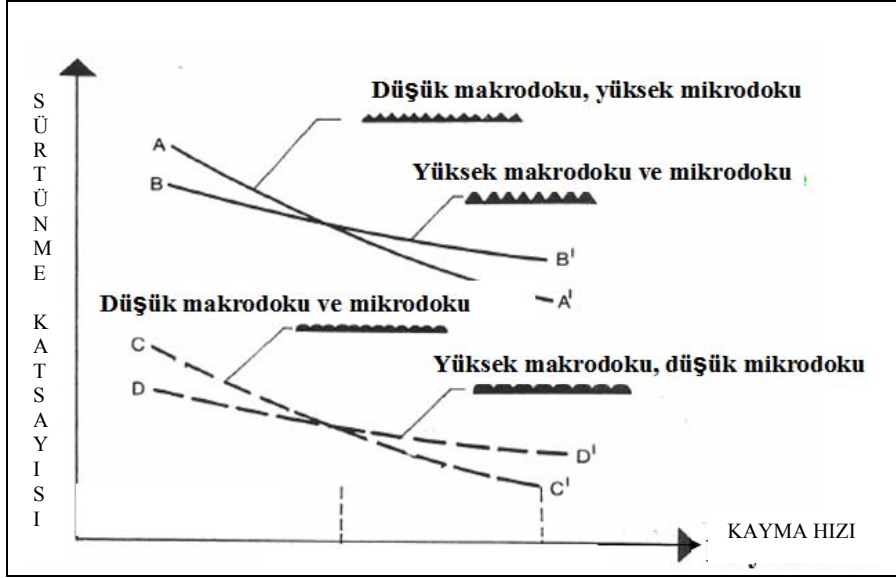
Şekil 20. Dinamik sürtünme ölçüm araçları

Bu şekilde çalışan aletlerin 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.

#### 1.11.3.4. Sürtünme Katsayısı- Pürüzlülük İlişkisi

Yıllarca sürtünme katsayısı değerleri ile onların ölçüldüğü yol yüzeyinin pürüzlülük parametreleri arasında sağlam bir korelasyon bulmak için çalışılmıştır. 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 21 de gösterilmektedir.



Şekil 21. Hız ve pürüzlülük durumuna göre sürtünme katsayısının değişimi (Henry, 2000).

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 (Henry,2000).

#### 1.11.3.5. 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.



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 da 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 istatistiki 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 (Kapuz, 2008).

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 9. da verilmektedir.

Tablo 9. Yol kesimine ve kamyon trafiği yoğunluğuna göre olması gereken agrega cilalanma değeri ve sürtünme katsayısı değerleri (Karpuz, 2008).

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. 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 (Karpuz, 2008).

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR**

### **2.1. Amaç**

Beton yol kaplaması yüksek mekanik ve durabilite özelliklerine sahip olmalıdır. Basınç ve eğilme dayanımlarının yüksek, donma-çözülme, aşınma ve buz çözücü tuzlara karşı dayanıklı olması gerekir. KYB'nin daha geçirimsiz olması nedeniyle, yüksek durabilite özelliklerine sahip olması ve kolay uygulanabilirliği bakımından beton yollarda geleneksel normal betonun yerine kullanılması düşünülebilir.

Bu çalışmada; kendiliğinden yerleşebilirlik şartlarını yerine getiren betonların, beton yollarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. İlk olarak kireç taşı agrega ile iki farklı katkı malzemesi kullanılarak Tip 1 ve Tip 2 KYB örneklerinin değişik yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Daha sonra sonuçlarla ilgili problemler nedeni ile bazalt agrega kullanılarak Tip 3 KYB karışımları oluşturulmuştur. Bu karışımda kendi içinde ikiye ayrılarak çimentoya mineral malzeme olarak uçucu kül katılmak üzere, iki grup KYB üretilmiş ve bu betonların değişik yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları ile yüzey aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerleri ölçülmüştür.

### **2.2 Kapsam**

Beton karışımlarında kullanılacak malzemeler belirlenip ilgili deneyleri yapıldıktan sonra hedeflenen beton özelliklerini saptamak üzere tasarımlar hazırlanmıştır. Malzeme seçimi amacıyla, farklı malzemelerle karışımlar oluşturulmuş, bu malzemelerin betondaki performansı incelenmiş ve uygun karışım oranları ve uygun karışım belirlenmiştir.

Trafik taşıma kapasitesine göre kullanılan beton tipleri değişiklik göstermektedir. Buna göre hafif trafik için C30, ağır trafik için C40 beton sınıfları gerekmektedir (Kandemir, 2005).

Deneysel çalışmada, farklı agrega ve katkı tipleri ile karışımlar hazırlanmış ve bu karışımların özellikleri birbiri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Kireçtaşı ve bazalt olmak üzere iki tip agrega farklı katkı ve uçucu kül kullanılarak hazırlanan KYB örneklerinin mekanik özelliklerinden basınç ve eğilme dayanımları, aşınma kayıpları ile sürtünme katsayıları incelenmiştir. Diğer taraftan en uygun karışımı karşılaştırmak amaçlı olarak da süper akışkanlaştırıcı katılmadan aynı granulometriye sahip geleneksel beton hazırlanarak dayanım elde edilmiş olan KYB ile karşılaştırılmıştır.

KYB'nin yollarda boyuna ve enine eğim değerleri düşünülerek uygulanabilirliği için yayılma çap değerlerinin minimum düzeyde tutacak karışım tasarımları hazırlanmıştır. Beton yollarda donatı yoğunluğunun ve plak derinliğinin fazla olmaması, beton dökülürken pompa ile sürekli ve hızlı döküm yapılacağından düşük yayılma çapının bir sorun yaratmayacağı düşünülmektedir.

En büyük agrega çapı 16 mm olup, çimento tipi PÇ 42,5'dur. Tez süresince dört tip karışım hazırlanmıştır. Üçüncü tip karışım en uygun sonuçları verdiği için kendi içinde uçucu kül de katılarak iki grup halinde denenmiştir. 4. Tip karışım (ki bundan sonra Kontrol Karışımı olarak anılacaktır) karşılaştırma amaçlı olan geleneksel beton özelliklerindeki betondur.

	<u>Agrega Türü</u>	<u>Dozajı</u>	<u>Katkı Maddesi</u>
Tip 1 Karışım	: Kireçtaşı	550	Viscocrete 5W
Tip 2 Karışım	: Kireçtaşı	550	Polycar 300
Tip 3 Karışım :			
Tip3-1	: Bazalt	600	New Flow 200
Tip3-2	: Bazalt	450 (çimento) + 150 (Uçucu Kül)	New Flow 200
Kontrol Karışımı	Bazalt	600	Yok

### 2.3. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Kullanılan malzemeler ve bunların özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

#### 2.3.1. Çimento

Yapılan deneylerde CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento, deney çalışmaları süresince, değişik zamanlarda getirilmiş olup aşağıdaki tabloda çimentonun fiziksel, kimyasal analizinin değerleri verilmiştir.

Tablo 10. Çimento özellikleri

Kimyasal Analiz	Standartlar	Sonuçları	Fiziksel Özellikler	Standartları	Sonuçları	
Toplam SiO <sub>2</sub>	-	20,54	Özgül Ağırlık(gr/cm <sup>3</sup> )	-	3,12	
Çözünmeyen Kalıntı	-	0,95	Priz Süresi (Vikat) Başlangıç	Min. 01:00	02:30	
Çözünen SiO <sub>2</sub>	-	16,23	Saat Bitiş	Max. 10:00	03:55	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,85	Hacim Genleşmesi (mm)	Max. 10	2	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3,47	İN	Özgül Yüzey	Min. 2800	3991
CaO	-	63,04	CE	200 mikron Elekte Kalıntı %	-	0,00
MgO	-	2,64	Lİ	90 Mikron Elekte Kalıntı %	-	0,2
SO <sub>3</sub>	Max. 3,50	2,12	K	46 Mikron Elekte Kalıntı %	-	
Kızdırma Kaybı	Max. 5,00	1,87		Gün		
Na <sub>2</sub> O	-	0,19	Basınç	2	Min. 20,0	22,9
K <sub>2</sub> O	-	0,77		7	-	40,0
Na <sub>2</sub> O Eq.	-	0,78	Dağılımı	28	Min.-Max. 42,5-62,5	49,3
Cl <sup>-</sup>	Max. 0,10	0,027				
Serbest CaO	-	1,16				

### 2.3.2. Agregas

Deneyisel çalışmalarda Bazalt ve Meryemana Taş Ocağından alınan Kireçtaşı olmak üzere iki farklı tipte agregas kullanılmıştır. Karışım tasarımlarında iki farklı gradasyon sınıfında malzeme kullanılmıştır.

Beton yollarda en büyük dane çapının genelde 32 mm olarak kabul edilmesine karşın, KYB’de 16 mm’den büyük dane çapları ayrışma eğiliminde olduğundan en büyük dane çapı 16 mm olarak seçilmiştir.

İri malzeme olarak 4-16 mm arasında dağılıma sahip ve ince malzeme olarak 0-4mm arasında dağılıma sahip olmak üzere iki farklı gradasyonda agregas kullanılmıştır. Agregalar üzerinde bazı deneyler yapılmış ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

#### 2.3.2.1. Elek Analizi

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

Elek analizine tabi tutulmak üzere belli miktarda malzeme alınarak, iyice yıkandıktan sonra kuruması için 105°C deki etüve konuldu. Bu şekilde kurutulmuş malzeme, karışımda kullanılacak agregas sınıflarını oluşturabilecek göz açıklığına sahip (elekler yukardan aşağıya göz açıklığı büyük olandan küçük olana doğru) elek serisinin en üstündeki eleğe konularak sarsma makinesi ile yaklaşık 10 dakika eleme işlemine tabi tutuldu. Elek üzerinde bulunan malzeme miktarı, eleme sırasında tüm tanelerin rahatlıkla hareket edebileceği şekilde ayarlandı.

Eleme işlemi sonunda her elek üzerinde kalan malzeme tartıldıktan sonra her bir elek için geçen yüzde (%P) değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır (Macit, 2003).

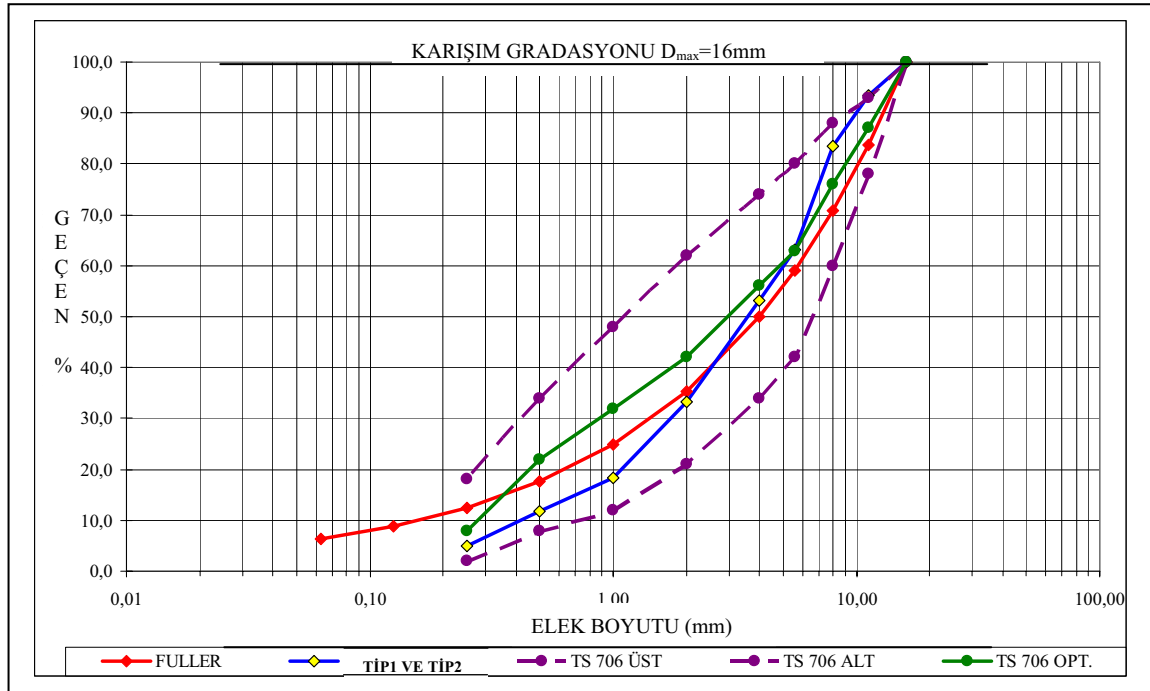
$$P = \frac{\text{Elekten Geçen Miktar}}{\text{Elemeye Tabi Tutulan Miktar}} \quad (9)$$

Bu şekilde bulunan tüm türler için agregas granülometreleri Tablo 11’de verilmektedir.

Tablo 11. Agrega granülometrisi

Elek Açıklığı	Şartname Sınırları (TS 706)				Fuller Eğrisi	Toplam Geçen % Tip 1	Toplam Geçen % Tip 2	Toplam Geçen % Tip 3		Karışım	
	4.Bölge		3.Bölge					İri Agrega	İnce Agrega	Tip 3-1 + Kontrol Karışımı	Tip 3-2
	Üst	Alt	Üst	Alt							
	Üst	Alt	Üst	Alt				%51+%49	%52+%48		
16,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
11,2	93	87	78	83,7	93,49	93,49	91,2	100	95,5	95,4	
8	88	76	60	70,7	83,43	83,43	40,7	100	69,7	69,1	
5,6	80	63	42	59,2	63,12	63,12	11,5	100	54,9	54,0	
4	74	56	34	50,0	53,17	53,17	3,6	95,68	48,7	47,8	
2	62	42	21	35,4	33,29	33,29	1,3	76,41	38,2	37,5	
1	48	32	12	24,7	18,30	18,30	0,9	49,41	24,7	24,2	
0,500	34	22	8	17,7	11,77	11,77	0,9	25,42	12,9	12,7	
0,250	18	8	2	12,5	5,02	5,02	0,9	11,65	6,2	6,0	
0,125	---	---	---	8,8	---	---	0,9	4,2	2,5	2,5	
0,063	---	---	---	6,3	---	---	0,9	2,63	1,7	1,7	

Bu agregalardan Tip 1 ve Tip 2. karışımlar için granülometri eğrileri de Şekil 22'de verilmektedir

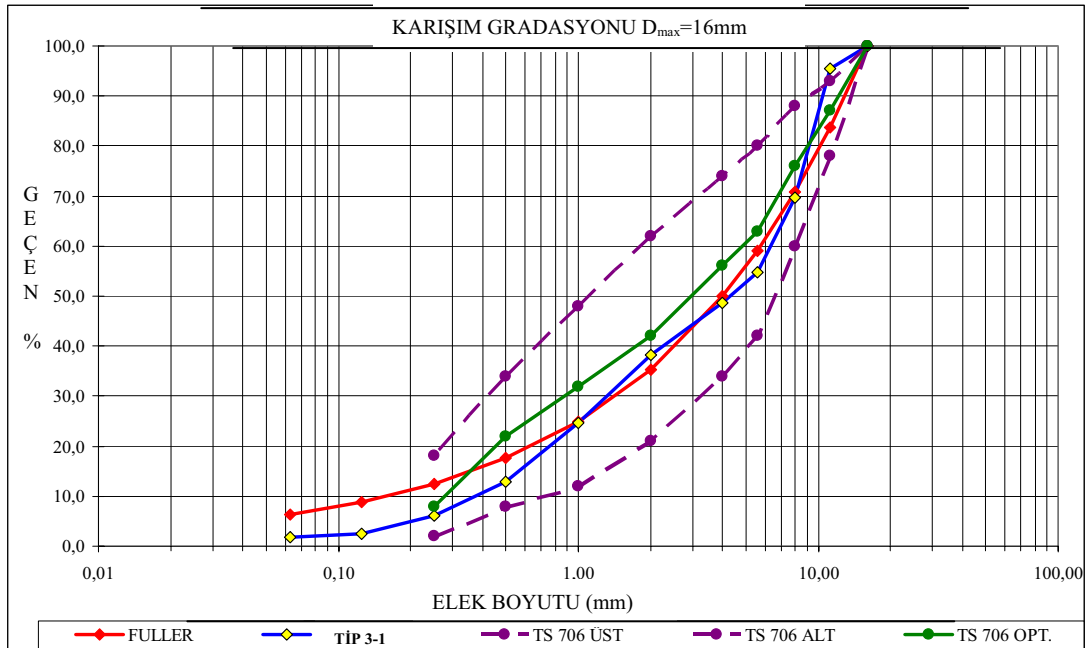


Şekil 22. Tip1 ve Tip 2 karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri

Tip 3 agrega karışımları yapılan analiz ve granülometrileri her iki grup için aşağıda ayrıntılı olarak verilmektedir.

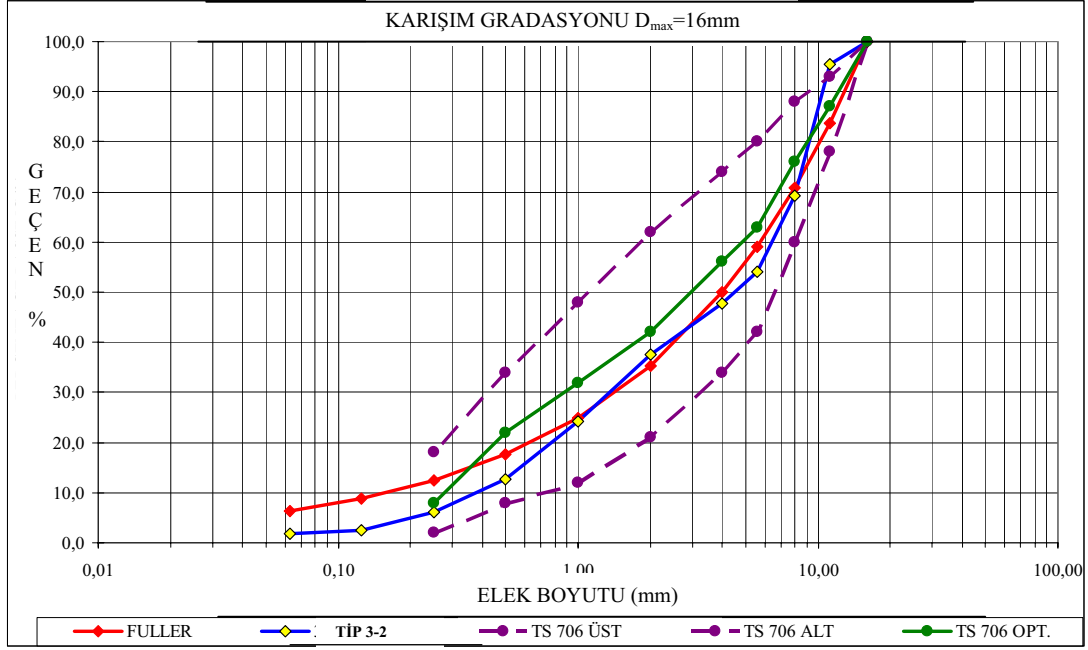
Tablo 12. Tip 3 karışım granülometrisi

ELEK AÇIK. (mm)		16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,50	0,25	0,125	0,063
1.GRUP KONTROL KARIŞIMI	%51 İri	51,0	46,5	20,7	5,9	1,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	%49 İnce	49,0	49,0	49,0	49,0	46,9	37,6	24,2	12,5	5,7	2,1	1,3
2. GRUP	%52 İri	52,0	47,4	21,1	6,0	1,9	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	%48 İnce	48,0	48,0	48,0	48,0	45,9	36,8	23,7	12,2	5,6	2,0	1,3
TİP 3-1 GRA.		100,0	95,5	69,7	54,9	48,7	38,2	24,7	12,9	6,2	2,5	1,7
TİP 3-2 GRA.		100,0	95,4	69,1	54,0	47,8	37,5	24,2	12,7	6,0	2,5	1,7



Şekil 23. Tip 3-1 ve kontrol karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri





Şekil 24. Tip 3-2 karışım agregası granülometrisi ve referans eğrileri

### 2.3.2.2. Birim Hacim Ağırlık ve Su Emme Deneyleri

Bu deney gerek karışım hesapları gerekse agreganın fiziksel özelliklerinin tayini için yapılmaktadır. İki grup agrega üzerinde deney ayrı ayrı uygulanmıştır.

İnce agregaların birim hacim ağırlığı ve su emme oranları için deney 1.6.2.1.2.1. başlığında anlatıldığı şekilde her iki tür agrega (kireçtaşı ve bazalt) için üçer numune halinde ayrı ayrı yapılmıştır. İnce agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak Tablo 13. de verilmiştir.

İri agregalar için de deney 1.6.2.1.2.2. başlığında anlatıldığı şekilde her iki tür agrega için üçer numune halinde ayrı ayrı yapılmıştır. İri agreganın birim hacim ağırlıkları ve su emmesi formüllerle hesaplanan değerlerin ortalamaları alınarak Tablo 13. de verilmiştir.

Tablo 13. Agregalar üzerinde yapılan deney sonuçları

		Kuru Birim Hacim Ağırlık	DKY Birim Hacim Ağırlık	Görünen Birim Hacim Ağırlık	Su Emme Oranı	Doğal Su
Tip1 ve 2 Agrega İçin (Kireçtaşı)	İnce Agregası (0-4 mm)	2,57	2,63	2,73	2,25	0,0013
	İri Agregası (4-16 mm)	2,70	2,72	2,76	0,74	0,001
Tip3 Agrega İçin (Bazalt)	İnce Agregası (0-4 mm)	2,52	2,58	2,68	1,58	0,001
	İri Agregası (4-16 mm)	2,65	2,67	2,71	0,60	0,0008

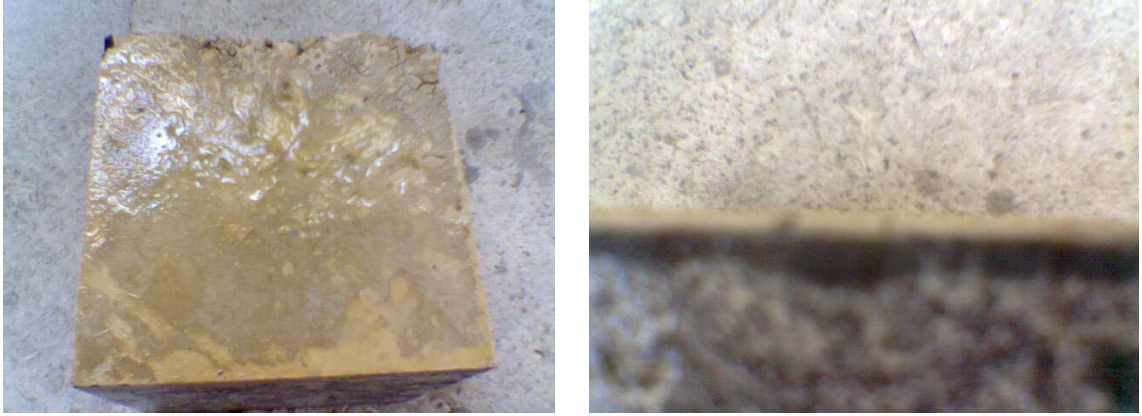
### 2.3.3. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Bu çalışmada yapılan 3 tip karışımda 3 ayrı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Tip 1 karışımda süper akışkanlaştırıcı olarak firmanın 3. nesil süper akışkanlaştırıcı olarak belirttiği ViscoCrete-5W kullanılmıştır. Modifiye polikarboksilat esaslı sıvı tipindedir. Bu katkının fiziksel ve kimyasal özellikleri:

Fiziksel Durum	: Sıvı
Renk	: Koyu kahverengi
Koku	: Karakteristik
Kimyasal Yapısı	: Naftalin sülfonat formaldehit kondensanı
Parlama Noktası	: Uygulanamaz
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	: Uygulanamaz
Yoğunluk, 20°C'de	: 1.12 g/cm <sup>3</sup>
Sudaki çözünürlük	: Çözünür
pH değeri, 20°C'de	: 6.7

olarak verilmiştir.

Tip 1 karışımda kullanılmış olan ViscoCrete 5W ile oluşturulan betonun ayrışma direncinin düşük olduğu, segregasyona uğradığı ve numune üzerinde bir tabaka meydana geldiği gözlenmiştir. Bunun üzerine süper akışkanlaştırıcı değiştirilerek Polykar 300 adlı katkı ile Tip 2 karışımlar oluşturulmuştur.



Şekil 25. ViscoCrete 5W katkı ile oluşturulan numuneler

Beton yüksek oranda kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcılarla yüksek akışkanlık özelliğine sahip olsa da, segregasyonunun engellenebilmesi ve uzun çalışma süresine sahip olabilmesi ancak iyi bir karışım tasarımı ve doğru kimyasal katkılarla mümkün olabilir (Aykan vd., 2004).

Tip 2 karışımında Polycar-300'ü firması; yüksek oranda su azaltıcı, mukavemet artırıcı, işlenebilirlik süresi uzun, kullanım dozajına bağlı olarak kendiliğinden yerleşen, sıkışan beton üretimine kullanılabilen prefabrik beton üretimi sektörü için geliştirilmiş yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak tanımlanmaktadır. Yapısında betona ve donatıya uzun vadede zarar veren klorür ve benzeri maddeler bulunmamaktadır.

#### Fiziksel ve Teknik Özellikleri:

Tip	: Polikarboksilat
Görünüm	: Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk	: $1.05 \pm 0.02$ kg/L
pH	: 6,50 – 8,00
Klorür	: $\leq \%0,1$ (TS EN 480-10)
Alkali İçeriği	: $\leq \%10$ (TS EN 480-12)

Tip 3 karışımlar da; ilk iki tip karışımdan istenen sonuçlar alınamadığından dolayı bazalt agrega ile oluşturulmuş ve süper akışkanlaştırıcı katkı olarak New Flow 200 kullanılmıştır.

New Flow 200, modifiye polikarboksilat esaslı, yüksek oranda su azaltarak (%25-%30) betona kendiliğinden sıkışma özelliği kazandıran, yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı beton katkıdır.

Teknik Özellikleri:

Kimyasal İçeriği	: Modifiye polikarboksilat esaslı
Görünüm/Renk	: Açık kahverengi homojen sıvı
Yoğunluk (20°C) (ISO 758)	: 1,070 – 1,120 kg/l.
pH (20°C) (ISO 4316)	: 4,50 – 7,50
Klorur Miktarı (Cl) % (TS EN 480-10)	: < % 0,10
Alkali Miktarı ( Na <sub>2</sub> O) % (TS EN 480-12)	: < % 5,0
Donma Noktası	: - 4°C

#### 2.3.4. Uçucu Kül

600 dozlu beton üretiminin yüksek çimento oranı açısından ekonomikliğini sağlamak amaçlı olarak Tip 3-2 karışımına Tip 3-1'den farklı olarak 150 kg uçucu kül eklenip 600 kg'lık çimento miktarı 450 kg'a indirilerek sonuçlardaki değişim araştırılmıştır.

Uçucu kül en yaygın puzolandır. Bu malzeme termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Baca gazları atmosfere bırakılmadan önce bu gazlar içindeki ince tanelerin toz toplama sistemi tarafından toplanmasıyla elde edilir.

Bu çalışmada uçucu kül olarak Çatalağzı Termik Santrali Uçucu Külü kullanılmıştır. Bu külün kimyasal analiz sonuçları Tablo 14. de verilmektedir.

Tablo 14. Çatalağzı uçucu külünün kimyasal analiz sonuçları

Oksit(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S+A+F	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	KK	Cl <sup>-</sup>
Sonuç	58,75	25,24	5,76	89,75	1,46	2,22	0,08	4,05	0,60	1,12	0,015

Bu sonuçlar irdelendiğinde standartlarda aranılan kimyasal bileşen bazında istenen koşullar tamamıyla uygun bir kül olduğu bilgi föyünde gösterilmektedir.

## 2.4. KYB Bileşimi Tasarımı

KYB'nin aşağıdaki taze beton özelliklerini taşıması gerekir. 65-80 cm yayılabilme özelliğini sağlayabilmek ve işlenebilirliğini min. 1 saat koruyabilmek ve bunları yaparken de betonun segregasyonunu ve terlemesini engellemek tasarımın en önemli hedefleridir. Beton yüksek oranda kullanılan geleneksel süper akışkanlaştırıcılarla yüksek akışkanlık özelliğine sahip olsa da, segregasyonunun engellenebilmesi ve uzun çalışma süresine sahip olabilmesi ancak iyi bir karışım tasarımı ve doğru kimyasal katkılarla mümkün olabilir. (Aykan vd., 2004)

Yapılan çalışmalarda, Tip 1 karışımda betonun 550 dozlu olmasına karar verilmiş, çeşitli deneme numuneleri sonunda W/C oranı 0,36 olarak alınmıştır. Karışım için PÇ. 42,5 kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı miktarı çimento miktarının %1,5'i olarak alınmıştır. 1m<sup>3</sup> karışım için yapılan hesaplar Tablo 15.'de verilmektedir. Tip 1 karışımın segregasyona uğradığı gözlenince agrega ile süper akışkanlaştırıcının uyumsuz olabileceği düşünülerek Polycar 300 adlı süper akışkanlaştırıcı ile Tip 2 karışımlar oluşturulmuştur.

Tip 2 karışımlarda da; betonun 550 dozlu olmasına karar verilmiş, çeşitli deneme numuneleri sonunda W/C oranı 0,36 olarak alınmıştır. Karışım için PÇ. 42,5 kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı miktarı çimento miktarının %2'si olarak alınmıştır. 1m<sup>3</sup> için yapılan hesaplar aşağıda verilmektedir.

Tip 2 Karışım İçin:

$$\begin{aligned}
 \text{PÇ 42,5 için } \gamma_c & : 3,10 \text{ kg/lt} \\
 \text{Hava Miktarı (H)} & : 20 \text{ lt} \\
 \text{Çimento Miktarı} & : 550 \text{ kg} \\
 \text{Su Miktarı} & : W = C \times W/C \\
 & = 550 \times 0,36 \quad W = 198 \text{ kg}
 \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Agrega Hacmi} & : V_{Ag} = 1000 - (C / \gamma_c + W + H) \\
 & V_{Ag} = 1000 - (550 / 3,10 + 198 + 20) = 604,58 \text{ lt}
 \end{aligned} \tag{11}$$

İri Agreganın İçin :

$$\gamma_{iri} = 2,72 \text{ kg/lt}$$

$$\text{İri Agreganın Ağırlığı} = 2,72 \times 0,50 \times 604,58 = 822,23 \text{ kg}$$

Nem Düzeltmesi ;

$$A'_{iri} = A \times (1 + DN) / (1 + DS) \tag{12}$$

$$= 822,23 \times (1,001) / (1,0074)$$

Alınacak iri agrega ağırlığı = 817,006 kg

İri agregaya katılacak doyma suyu miktarı  
= 822,23 – 817,006 = 5,224 kg

İnce Agrega İçin :

γ<sub>ince</sub> = 2,63 kg/lt

İnce Agrega Ağırlığı = 2,63 · 0,50 · 604,58 = 795,023 kg

Nem Düzeltmesi ;

A<sub>ince</sub> = 795,023 x (1,0013) / (1,0225)

Alınacak ince agrega ağırlığı = 778,539 kg

İnce agregaya katılacak doyma suyu miktarı  
= 795,023 – 778,539 = 16,484 kg

1 m<sup>3</sup> Karışım İçin :

Σ İri Agrega = 817,006 kg

Σ İnce Agrega = 778,539 kg

Σ Doyma Suyu = 5,224 + 16,484 = 21,708 kg

Σ Çimento Miktarı = 550 kg

Σ Karma Suyu = 198 kg

Σ Süper Akışkanlaştırıcı = 550 x 0,020 = 110 kg (çimento ağırlığının %2'si)



Şekil 26. Tip 2 karışımların hazırlanması

Yapılan çalışmalarda, Tip 2 karışımdan sonra bazalt agrega kullanılarak Tip 3 karışımlar da oluşturulmuştur. Daha önceden de belirtildiği gibi Tip 3 karışım kendi içinde

uçucu küllü ve uçucu külsüz olarak iki gruba ayrılmıştır. Bunların da karışım oranları aşağıda verilmektedir. Süper akışkanlaştırıcı katkı olarak New Flow 200 kullanılmıştır.

Tip3-1 karışımlarda 600 kg CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Tip3-2 karışımında yine aynı çimento 450 kg kullanılarak 150 kg uçucu kül ilave edilmiştir. Çeşitli deneme numuneleri sonunda Tip 3-1 karışım için W/C oranı yaklaşık 0,35; Tip3-2 karışım için W/C oranı yaklaşık 0,34 olarak belirlenmiştir. Süper akışkanlaştırıcı miktarı her iki karışım için çimento miktarının % 1,2 si olarak alınmıştır. 1m<sup>3</sup> için yapılan hesaplar aşağıda verilmektedir.

Tip3-1 Karışım İçin:

PÇ 42,5 için  $\gamma_c$  : 3,12 kg/lt

Süper Akışkanlaştırıcı için  $\gamma$  : 1,12 kg/lt

Hava Miktarı (H) : 20 lt

Çimento Miktarı : 600 kg

Süper Akışkanlaştırıcı (çimento ağırlığının %1,2'si) :  $600 \times 0,012 = 7,2$  kg

Su Miktarı : W =  $600 \times 0,35$

W = 210 kg

Agrega Hacmi :  $V_{Ag} = 1000 - (600 / 3,12 + 210 + 20 + 7,2/1,12)$   
 $\approx 571,26$  lt

İri Agregaya İçin :  $\gamma_{iri} = 2,67$  kg/lt

İri Agregaya Ağırlığı  $\approx 2,67 \times 0,51 \times 569,69 \approx 777$  kg

Nem Düzeltmesi ;

İri Agregaya için doğal nem % 0,8 dir.

A`iri =  $777 - 777 \times 0,008 = 770,8$  kg

İri agregaya katılacak doyma suyu miktarı

=  $777 - 770,8 = 6,2$  kg

İnce Agregaya İçin :  $\gamma_{ince} = 2,58$  kg/lt

İnce Agregaya Ağırlığı  $\approx 2,58 \times 0,49 \times 571,26$  kg  $\approx 722$  kg

Nem Düzeltmesi ;

İnce Agregaya için doğal nem % 0,98 dir.

A`ince =  $722 - 722 \times 0,0098 = 714,9$  kg

İnce agregaya katılacak doyma suyu miktarı

=  $722 - 714,9 = 7,1$  kg

1 m <sup>3</sup> Karışım için;	
Σ İri Agrega	= 771 kg
Σ İnce Agrega	= 715 kg
Σ Doyma Suyu	= 7,1 + 6,2 = 13,3 kg
Σ Çimento Miktarı	= 600 kg
Σ Karma Suyu	= 210 kg
Σ Süper Akışkanlaştırıcı	= 7,2 kg



Şekil 27. Tip 3-1 karışımların hazırlanması

Tip3-2 Karışım İçin:

PÇ 42,5 için  $\gamma_c$  : 3,12 kg/lt

Uçucu Kül için  $\gamma$  : 2,18kg/lt

Süper Akışkanlaştırıcı için  $\gamma$  : 1,12 kg/lt

Hava Miktarı (H) : 20 lt

Çimento Miktarı : 450 kg

Uçucu Kül Miktarı : 150 kg

Süper Akışkanlaştırıcı (çimento ağırlığının %1,2'si) :  $600 \times 0,012 = 7,2$  kg

Su Miktarı : W =  $600 \times 0,34 = 204$  kg

Agrega Hacmi :  $V_{Ag} = 1000 - (450/3,12 + 150/2,18 + 204 + 20 + 7,2/1,12)$   
= 556,53 lt

İri Agrega İçin :  $\gamma_{iri} = 2,67$  kg/lt

İri Agrega Ağırlığı =  $2,67 \times 0,52 \times 556,53 \approx 774$  kg

Nem Düzeltmesi;

İri Agrega için doğal nem % 0,8 dir.

A`iri =  $774 - 774 \times 0,008 = 767,9$  kg

İri agregaya katılacak doyma suyu miktarı



$$= 774 - 767,9 = 6,1 \text{ kg}$$

$$\text{İnce Agregaya İçin} \quad : \gamma_{\text{ince}} = 2,58 \text{ kg/lt}$$

$$\text{İnce Agregaya Ağırlığı} \quad \approx 2,58 \times 0,48 \times 556,53 \approx 690 \text{ kg}$$

Nem Düzeltmesi ;

İnce Agregaya için doğal nem % 0,98 dir.

$$A_{\text{ince}} = 690 - 690 \times 0,0098 = 683,2 \text{ kg}$$

İnce agregaya katılacak doyma suyu miktarı

$$= 690 - 683,2 = 6,8 \text{ kg}$$

1 m<sup>3</sup> Karışım için ;

$$\Sigma \text{ İri Agregaya} = 768 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ İnce Agregaya} = 684 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Doyma Suyu} = 6,1 + 6,8 = 13 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Çimento Miktarı} = 450 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Uçucu Kül Miktarı} = 150 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Karma Suyu} = 204 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Süper Akışkanlaştırıcı} = 7,2 \text{ kg}$$



Şekil 28. Tip 3-2 karışımların hazırlanması

Kontrol Karışım İçin:

Kontrol karışımı elde ettiğimiz KYB'yi performans olarak karşılaştırma amacı ile üretilmiş geleneksel betondur. Hazırlanan kontrol numunelerinin KYB olma özelliklerini sağlanması beklenmemektedir.

Süper akışkanlaştırıcı katkı suyun %25 ila %30 unu kestiğini bildiğimizden bu fark karışıma su olarak eklenmiştir. Kontrol Karışımı için  $W/C=0,53$  olarak alınacağı belirlenmiştir.

$$\begin{aligned} \text{PÇ 42,5 için } \gamma_c &: 3,12 \text{ kg/lt} \\ \text{Hava Miktarı (H)} &: 20 \text{ lt} \\ \text{Çimento Miktarı} &: 600 \text{ kg} \\ \text{Su Miktarı} &: W = 600 \times 0,53 \\ &W = 318 \text{ kg} \\ \text{Agrega Hacmi} &: V_{Ag} = 1000 - (600 / 3,12 + 20 + 318) \\ &\approx 469,7 \text{ lt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{İri Agregaya İçin} &: \gamma_{iri} = 2,67 \text{ kg/lt} \\ \text{İri Agregaya Ağırlığı} &\approx 2,67 \times 0,51 \times 469,7 \approx 639 \text{ kg} \end{aligned}$$

Nem Düzeltmesi ;

İri Agregaya için doğal nem % 0,8 dir.

$$A'_{iri} = 639 - 639 \times 0,008 = 634 \text{ kg}$$

İri agregaya katılacak doyma suyu miktarı

$$= 639 - 634 = 5 \text{ kg}$$

$$\text{İnce Agregaya İçin} : \gamma_{ince} = 2,58 \text{ kg/lt}$$

$$\text{İnce Agregaya Ağırlığı} \approx 2,58 \times 0,49 \times 469,7 \text{ kg} \approx 593,8 \text{ kg}$$

Nem Düzeltmesi ;

İnce Agregaya için doğal nem % 0,98 dir.

$$A'_{ince} = 593,8 - 593,8 \times 0,0098 = 588 \text{ kg}$$

İnce agregaya katılacak doyma suyu miktarı

$$= 593,8 - 588 = 5,8 \text{ kg}$$

1 m<sup>3</sup> Karışım için;

$$\Sigma \text{ İri Agregaya} = 639 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ İnce Agregaya} = 588 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Doyma Suyu} = 5 + 5,8 = 10,8 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Çimento Miktarı} = 600 \text{ kg}$$

$$\Sigma \text{ Karma Suyu} = 318 \text{ kg}$$

Tablo 15. 1 m<sup>3</sup> karışım için malzeme miktarları

	Tip1	Tip2	Tip3		Kontrol Karışımı
			Tip3-1	Tip3-2	
∑ İri Agregası (kg)	817,006	817,006	771	768	639
∑ İnce Agregası (kg)	778,539	778,539	715	684	588
∑ Doyma Suyu (kg)	5,224+16,487 =21,708	5,224+16,487 =21,708	7,1+6,2 =13,3	6,1+6,8 =13	5+5,8 =10,8
∑ Çimento mik.(kg)	550	550	600	450	600
∑ Uçucu kül mik.(kg)	---	---	---	150	---
∑ Karma suyu (kg)	198	198	210	204	318
∑ Süper Akışkanlaştırıcı (kg)	8,25	11	7,2	7,2	---

### 2.4.1. KYB Üzerinde Yapılan Deneyler

KYB için farklı deney yöntemlerinin geliştirildiğinden ve bu yöntemlerden birinci bölümde bahsedilmiştir. Bu yöntemler ve kabul edilebilir limit değerleri Tablo 6. da verilmiştir. Bu deney yöntemlerinden bu çalışmada her bir numune grubu için yapılan deneyler ve sonuçları aşağıda verilmektedir.

Kontrol karışımı için KYB tasarım deneyleri yapılamamıştır. Çünkü; daha önce de bahsedildiği gibi bu karışım süper akışkanlaştırıcı katılmadığı ve yerine ilave edilen suyun da tam anlamıyla kendiliğinden yerleşme özelliğini sağlayamadığından (süper akışkanlaştırıcı iyonize özelliğe sahip olup partiküllerin birbirini iterek kaymasını sağlıyor) 13cm slump veren geleneksel bir beton elde edilmiştir.

#### 2.4.1.1. Çökme Yayılma Deneyi

Klasik çökme konisi ile bu deney gerçekleştirilmiştir. Alta konulan çelik plak üzerine çizilen 50 cm çaplı bir dairenin merkezine yerleştirilen koni beton ile şişleme yapmadan doldurulduktan sonra yukarıya çekilerek herhangi bir sarsma yapmadan betonun kendi ağırlığı ile yayılması beklendi. 50 cm çaplı daireye ulaşmaya kadar geçen süre ölçüldü ve t50 olarak kaydedildi. Yayılma tamamlandıktan sonra iki farklı noktadan yayılma çapları ölçülerek kaydedildi (D1, D2).

Her 3 tip numune için yapmış olduğumuz çökme yayılma deneyi sonuçları Tablo 16. da verilmektedir.



Şekil 29. Çökme yayılma deneyi

#### 2.4.1.2. V Funnel Akış Deneyi

Bu deney Betonun dar bir aralıktan geçiş yeteneğini ve viskozitesini ölçmeye yöneliktir. V Funnel deney aletinin içi en üst seviyesine kadar doldurulduktan sonra alt uçtaki kapak açılarak akış başlatıldı. Üsten bakıldığında alttan ışık geçmeye başladığı ana kadar geçen süre ölçüldü. Her 3 tip numune için bu deney yapıldı sonuçlar Tablo 16. da verilmektedir.

Bu çalışma yol betonu üzerine bir çalışma olduğu için betonun geçme kabiliyetini ölçen U-Box ve Fill Box deneyleri yapılmamıştır.



Şekil 30. V-Funnel deneyi

Bu yöntemler ve kabul edilebilir limit değerleri ve yapılan deneylerin sonuçları Tablo 16.'da verilmiştir.

Tablo 16. KYB de kabul edilebilir limit değerleri ve deney sonuçları

Deney Metodu	Ölçülecek Özellik	Limit Değer		Br.	Tip1	Tip 2	Tip 3	
		Min.	Max.				Tip 3-1	Tip3-2
Yayılma Tablasında Yayılma	Doldurma Kabiliyeti	650	800	mm	710 730	690 700	670 680	670 680
Yayılma Tablasında İlk 50 cm Yayılma İçin Geçen Süre	Doldurma Kabiliyeti	2	5	sn	4,7	3,59	4,2	4,3
V-Funnel	Doldurma Kabiliyeti Ayrışmaya Karşı Direnç	6	12	sn	10,6	9,6	10,7	11,0

## 2.5. Sertleşmiş Beton ile İlgili Bilgiler

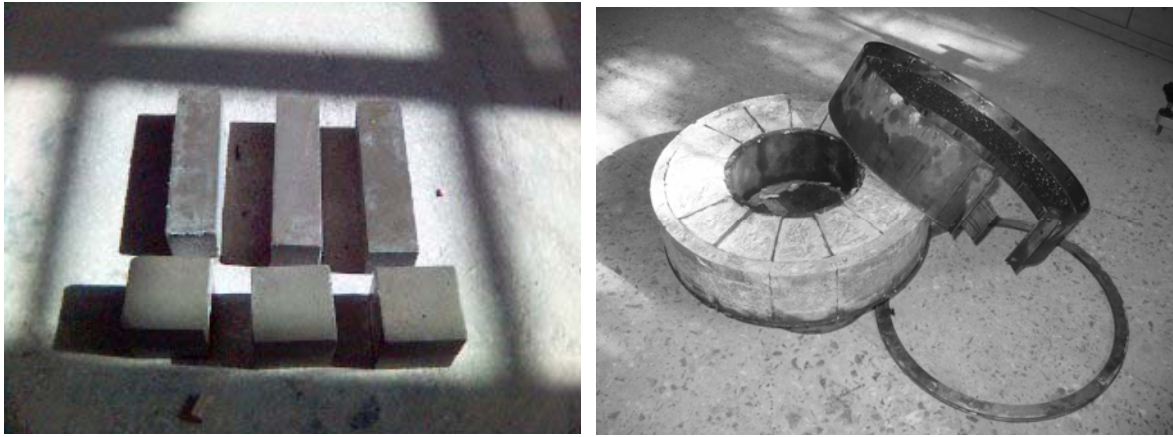
Taze beton deneyleri ile şartların sağlandığı karışım oranıyla hazırlanmış olan beton karışımından her deney için en az 3 tane olacak şekilde, her üç tip numunelerden kalıplara

döküldü. Elde edilen betondan 150x150x150 mm'lik standart küp, 100x100x400 mm'lik prizmatik numuneler hazırlandı.



Şekil 31. Betonun kalıplara yerleştirilmesi

Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıplardan çıkartılarak sıcaklığı  $21 \pm 3$  °C olan standart kür havuzunda bekletildi.



Şekil 32. Hazırlanan küp ve silindir numuneler

Küp ve prizmatik numuneler üzerinde 7, 14, 21, 28 günlük basınç dayanımı ile eğilmede çekme gerilmesinin tespiti için deneyler yapıldı. Beton numunelerinin üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucu beton basınç dayanımları, eğilmede çekme gerilmeleri ve birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

### 2.5.1. Beton Dayanımı

“Beton dayanımı”, üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği maksimum direnme olarak tanımlanır. (ACI Committee)

Bilindiği gibi, malzemenin bir birim alanının üzerinde etki yapan yük, (gerilme)  $\text{kgf/cm}^2$  veya MPa ( $\text{N/mm}^2$ ) gibi birimlerle ifade edilmektedir.

Betonun üzerine değişik yönlerde uygulanan yükler, değişik etkiler yaratabilmektedir. Basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi yaratacak yükler altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyeti, sırasıyla, basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kayma dayanımı olarak tanımlanmaktadır. Tekrarlı yüklerin etkisi altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı göstereceği direnme kabiliyetine ise yorulma dayanımı denilmektedir.

Sertleşmiş betonun belirli dayanımda olmasının yanı sıra, yeterli dayanıklılığı göstermesi, su geçirimsizliğinin az olması gibi bazı özelliklere de sahip olması istenir. Bunun nedenlerini aşağıdaki gibi özetlemek mümkündür:

- Betonun genellikle kullanıldığı yapılar, basınç, çekme, eğilme ve kayma yaratacak kuvvetlerin doğrudan etkisi altındadır. O nedenle, betondaki basınç, çekme, eğilme ve kayma dayanımlarının bilinmesi, beton yapıların bu yükler altındaki taşıma kapasitesinin bilinmesine yaramaktadır.
- Sertleşmiş betonda aranılan hacim sabitliği, dayanıklılık, su geçirimsizlik ve dayanım gibi birçok özellik arasında, deneysel olarak en kolay tayin edileni, betonun dayanım özelliğidir.
- Betonun dayanım özelliği ile diğer özellikleri arasında bir korelasyon kurabilmek ve kalitatif (niteleyici) olarak diğer özelliklerin ne büyüklükte olduğunu değerlendirebilmek mümkündür. Örneğin dayanımı yüksek olan bir betonda, su geçirimsizlik ve dayanıklılık da daha iyi olmaktadır. (Erdoğan, 2003)

#### 2.5.1.1. Beton Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı, “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (eksenel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme)” olarak tanımlanmaktadır.

Betonda araştırılan değişik dayanım türleri arasında mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan basınç dayanımıdır. Bunun nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- Basınç dayanımının bulunabilmesi için uygulanan deney yöntemleri, diğer dayanım türlerinin bulunabilmesi için uygulanan yöntemlerden daha basittir.
- Hemen hemen tüm yapıların tasarımında, betonun basınç dayanımı değeri esas alınmaktadır. Birçok yapıda, betonun önemli miktarda çekme, eğilme, yorulma gibi değişik yüklere maruz kalmayacağı varsayılmakta ve betonun üzerine gelen en önemli yüklerin basınç yükleri oldukları kabul edilerek hesap yapılmaktadır.
- Betonun basınç dayanımı ile çekme ve eğilme dayanımları arasında, yaklaşık da olsa, bir korelasyon bulunmaktadır. O nedenle, basınç dayanımı bilindiği takdirde, diğer türdeki dayanımların büyüklükleri hakkında bir fikir elde edilebilmektedir.

#### **2.5.1.1.1. Beton Basınç Dayanımının Standart Deney Yöntemi ile Elde Edilmesi**

Betonun basınç dayanımının elde edilmesi için uygulanan “standart deney yöntemi” ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır: TS EN12390–2, TS EN 12390–3, ASTM C 31 ve ASTM C 39.

Standart deney yönteminin uygulanmasından beton standartlarında belirtilen boyutlara sahip standart silindir veya küp numuneler kullanılmaktadır. Bu numuneler beton taze iken silindir veya küp şekilli kalıplara, beton standartlarının belirttiği tarzda yerleştirilmekte ve bir gün sonra kalıplardan çıkarılmaktadır (Erdoğan, 2003).

Yapılan çalışmada KYB uygulandığı için numunelerin kalıba yerleştirilmesi esnasında herhangi bir vibrasyon veya şişleme yapılmamış, beton kendiliğinden kalıba yerleşmiştir.

Kalıplarından çıkartılan sertleşmiş beton numuneleri, deney tarihine kadar beton standartlarının belirttiği kür ortamında saklandıktan sonra, deney presi olarak adlandırılan bir alet vasıtasıyla üniform basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulmaktadır.

Basınç dayanımı şu şekilde hesaplanmaktadır.

$$\sigma = N/A \quad (13)$$

Burada,

$\sigma$  = Basınç dayanımı (maksimum basınç gerilmesi),

N = Numunenin kırılmasına yol açan maksimum yük miktarı,



A = Numunenin kesit alanıdır.

Standart deney yönteminin uygulanmasında kullanılan beton numunelerin şekilleri, boyutları, hazırlanması, kürü, deney presinde uygulanan yükün hızı, numunenin sayısı ilgili şartnamelerde belirtilmiştir.

Şartname şartlarına uyularak basınç gerilmesi hesabı için her yaş için en az 3 tane olacak şekilde 150x150x150 mm'lik küp numuneler hazırlandı. Numunelerin kütleleri tayin edilerek deney presinde yerleştirildi. Deney presi çalıştırılarak numuneye uniform dağılımlı yük uygulanması sağlandı ve numune kırılıncaya kadar yük uygulanmaya devam edildi (Şekil 36). Kırılmaya neden olan maksimum yükler kaydedildi. Aynı yaştaki numuneler için belirlenen basınç dayanımlarının ortalaması alınarak Tablo 17. de verilmiştir.

Tip1 karışımda tabakalaşma meydana geldiğinden bu tür dayanım testlerine tabi tutulmamış atıl sayılmıştır. Bundan sonraki karşılaştırmalar Tip2 ve Tip3 karışımlar üzerinde yapılacaktır.

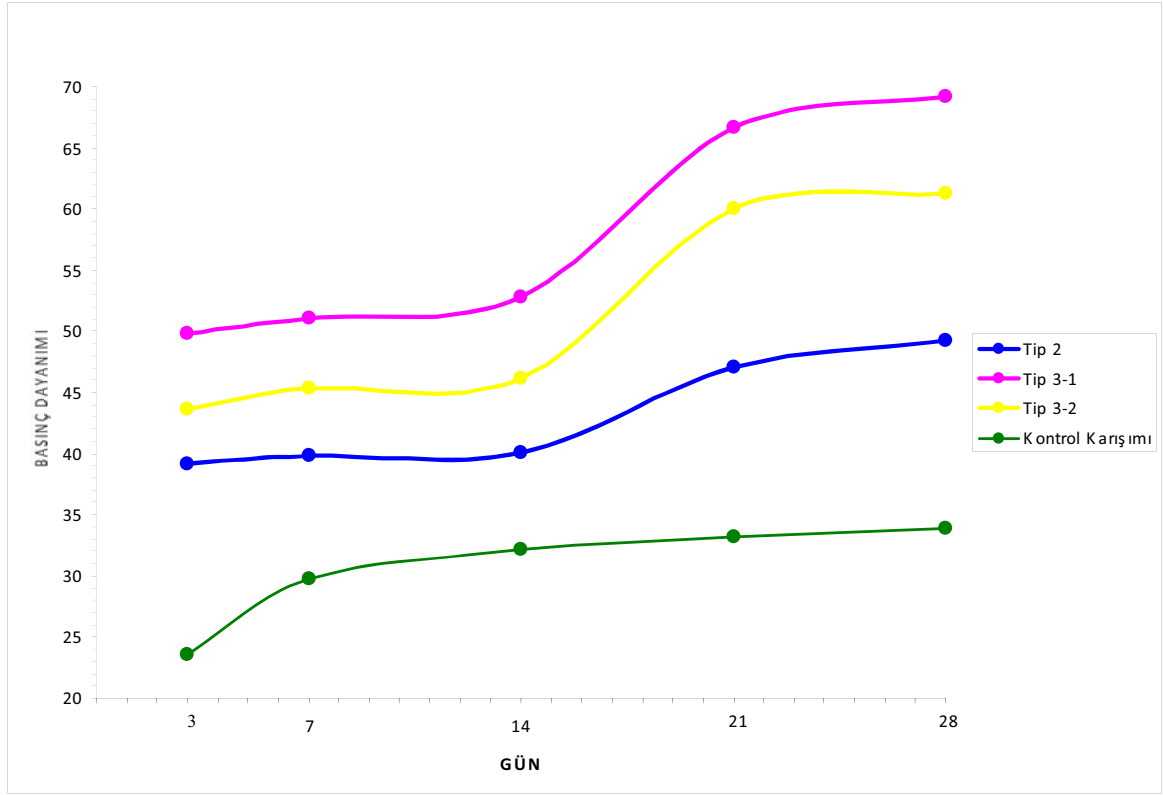


Şekil 33. Basınç dayanımı deneyi

Tablo 17. Numunelerin basınç dayanımları

Basınç Dayanımları	3 Günlük N/mm <sup>2</sup>	7 Günlük N/mm <sup>2</sup>	14 Günlük N/mm <sup>2</sup>	21 Günlük N/mm <sup>2</sup>	28 Günlük N/mm <sup>2</sup>
Tip 2	39,1	39,8	40,1	47,1	49,2
Tip 3-1	49,8	51,1	52,8	66,7	69,2
Tip 3-2	43,6	45,3	46,2	60,0	61,3
Kontrol Karışımı	23,6	29,8	32,2	33,2	33,9

Şekil 34. de basınç dayanımlarının grafiğini verilmektedir.



Şekil 34. Basınç dayanımı grafiği

### 2.5.1.2. Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, “betonda çekme etkisi yaratacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun göstereceği direnme kabiliyeti” olarak tanımlanmaktadır.

Genellikle, yapıdaki betona doğrudan çekme kuvveti uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun içersinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Betonda büzülme olması durumunda yer alacak şekil değiştirmelerin agrega taneleri ve betondaki donatı tarafından engellenerek serbestçe yer almaması nedeniyle de betonun içersinde çekme kuvvetleri oluşmaktadır.

Betondaki basınç ve çekme dayanımları birbiriyle yakından ilgilidir. Genel olarak, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %9 - %10'u kadardır. Betonun kalitesine ve yaşına bağlı olarak, bu oran %7 ile %17 arasında değişebilmektedir.

Betonun çekme dayanımı, üç değişik deney yöntemiyle bulunabilmektedir.

- Çekme yüklerinin doğrudan uygulanması ile çekme dayanımının elde edildiği yöntem (Doğrudan Çekme Dayanımı Deneyi)
- Çekme yüklerinin dolaylı olarak uygulanması ile çekme dayanımının elde edildiği yöntem (Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi)
- Beton kirişlere eğilme yüklerinin uygulanması ile eğilme dayanımının ve böylece çekme dayanımının elde edildiği yöntem (Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi)

Değişik deney yöntemlerinin uygulanması sonucunda elde edilen değerler birbirinden oldukça farklı değerlerdir. (Erdoğan, 2003)

#### 2.5.1.2.1. Doğrudan Çekme Dayanımı

Betonun doğrudan çekme yükleri altındaki dayanımını bulabilmek için standart bir deney yöntemi yoktur. O nedenle, böyle bir deneyde kullanılmak üzere standart boyutlu ve şekilli numunelerde bulunmamaktadır.

Özel başlık düzeni takılan beton numunelerin uçlarındaki metal çubuklar, normal demir çubukların çekme deneyinde olduğu gibi, deney makinesinin çeneleri tarafından sıkıca kavranacak tarzda deney makinesine yerleştirilmektedir. Deney makinesi çalıştırıldığında, makinenin çeneleri birbirinden uzaklaşmakta ve böylece çubuklara ve metal başlıklara sıkıca bağlanmış olan beton numuneye doğrudan çekme yükleri uygulanmış olmaktadır. Yük uygulaması, beton numune kırılıncaya kadar devam etmektedir.

Betonun çekme dayanımı ( $\sigma_c$ ), kırılma yaratacak olan yükün (P'nin), numune boyutunun ortasındaki numune kesit alanına (A'ya) bölünerek hesaplanmaktadır. Yani;

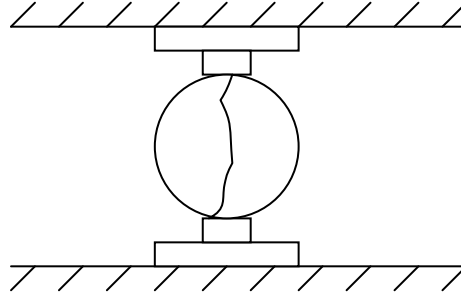
$$\sigma_c = P/A \quad (14)$$

olarak hesaplanmakta ve  $\text{kgf/cm}^2$  veya MPa birimleriyle ifade edilmektedir (Erdoğan, 2003).

### 2.5.1.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı (Dolaylı Çekme Dayanımı)

Dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımının elde edilebilmesini belirleyen deney yöntemi bütün ülke standartlarında yer almaktadır. Bu konudaki Türk ve ABD standartları, sırasıyla, TS EN 12390-6 ve ASTM C 496'dır.

Bu deney genellikle silindir şekilli beton numuneler kullanılmaktadır. Deneyin uygulanmasında, Şekil 40.'da görülebileceği gibi numune deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontraplak çiteler yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.



Şekil 35. Yarma deneyi uygulama düzeni

Yukarıda açıklanan tarzda uygulanan basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulan silindir numunelerin çekme dayanımı,

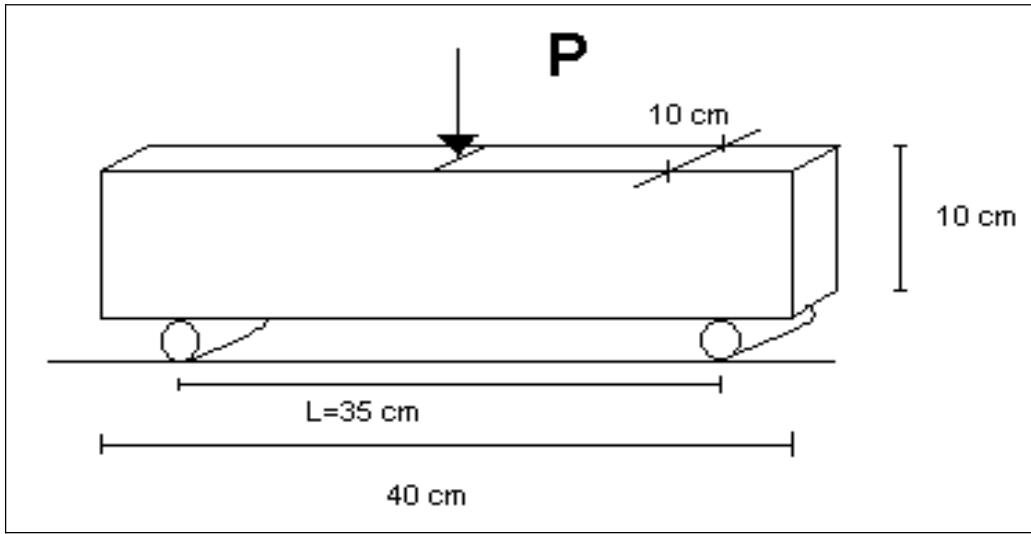
$$\sigma_c = 2P / \pi LD \quad (15)$$

ilişkisinden hesaplanmaktadır.

### 2.5.1.2.3. Eğilme Dayanımı (Eğilmede Çekme Dayanımı)

Betonun eğilme dayanımının bulunabilmesi ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır: TS EN 12390-5, ASTM C 293 ve ASTM C 78.

Betonun eğilme dayanımı; hazırlanan beton kiriş numuneler üzerine ya kirişin orta noktasından ya da kirişin uçlarından  $L/3$  uzaklıktaki mesafelerde yükleme yapılarak bulunabilmektedir. Şekil 36.'da, bizim de deneylerimizde uyguladığımız, kirişin ortadan yüklenmesi durumundaki eğilme deneyi yöntemi görülmektedir.



Şekil 36. Kirişin orta noktasından yüklenmesi durumunda eğilme deneyi yöntemi

6

TS EN 12390-5 ve ASTM C 293 de beton kirişin oturduğu mesnetlerin arasındaki mesafenin orta noktasından ( $L/2$  mesafesinden) yüklenmesi durumundaki deney yöntemi açıklanmaktadır.

TS EN 12390-5 ve ASTM C 78 de ise, beton kirişin oturtulduğu mesnetlerden  $L/3$  uzaklıktaki iki noktadan yüklenmesi durumundaki deney yöntemi anlatılmaktadır

Eğilme dayanımı deneylerinde genellikle kare kesitli kirişler kullanılmaktadır. Numunelerin hazırlanması için kalıplara yerleştirilen taze beton sıkıştırılmakta ve deney güne kadar  $23 \pm 1.7$  °C sıcaklıkta ıslak küre tabii tutulmaktadır. Bu deneyle numune kırılıncaya kadar, belirtilen uygulamalardan biri ile eğilme yükü uygulanmaktadır.

Beton kiriş numunelerde kırılmaya neden olan yük deney presinin göstergesinden okunduktan sonra, eğilme dayanımının hesaplanabilmesi için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\sigma_e = Mc / I \quad (16)$$

Burada;

$\sigma_e$  = Eğilme dayanımı,

M = Maksimum moment,

c = Tarafsız eksen ile kiriş yüksekliğinin en uç noktası arasındaki uzaklık, yani d/2,

d = Kiriş kesitinin yüksekliği,

b = Kiriş kesitinin eni,

I = Atalet moment (dikdörtgen kesitler için  $I = bd^3/12$ ; kare kesitler için  $I = d^4/12$ )

Beton kiriş numunelerinin orta noktadan yüklenmeleri durumunda oluşacak maksimum moment değeri ile mesnetlerden L/3 uzaklıklarda yüklenmeleri durumunda oluşacak maksimum moment değeri farklı olmaktadır. O nedenle, beton kiriş numunelerin orta noktadan veya mesnetlerden L/3 uzaklıktaki iki noktadan yüklenmesi sonucunda hesaplanan gerilme dayanımı farklı değerlerde olmaktadır.

Mesnetlerden L/3 uzaklıktaki iki noktadan yüklenen dikdörtgen kesitli beton kiriş numunelerde ( $\sigma_e = Mc/I$  formülüne uyularak) eğilme dayanımının hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\sigma_e = PL / bd^2 \quad (17)$$

Orta noktadan yüklenen dikdörtgen kesitli beton kiriş numunelerde ise eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_e = 3PL / 2bd^2 \quad (18)$$

Hazırlanan 100x100x400 mm'lik prizmatik numuneler kirişin orta noktasından yüklenerek bulunan yük (18) formülü ile hesaplanarak Tablo 18.'de verilen eğilme dayanımları bulunmuştur.



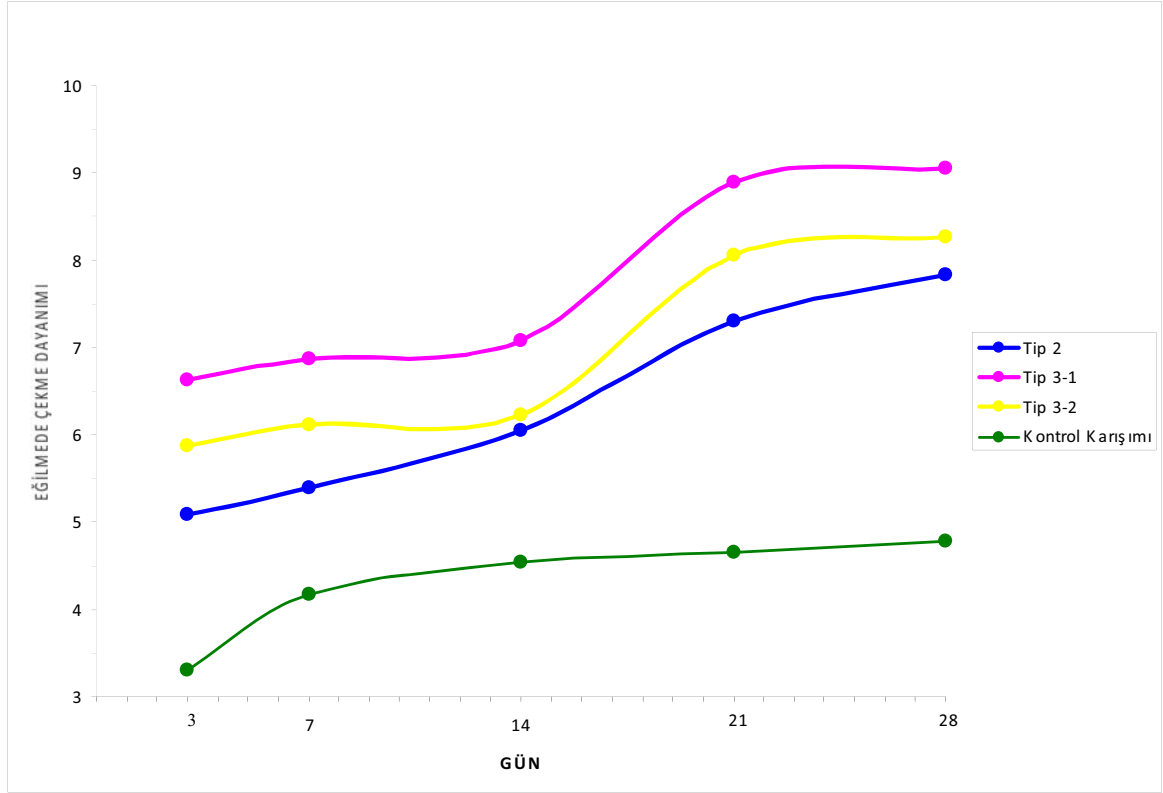
Şekil 37. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Yapılan deney sonuçları Tablo 18. de verilmektedir.

Tablo 18. Numunelerin eğilmede çekme dayanımları

Eğilmede Çekme Dayanımları	3 Günlük N/mm <sup>2</sup>	7 Günlük N/mm <sup>2</sup>	14 Günlük N/mm <sup>2</sup>	21 Günlük N/mm <sup>2</sup>	28 Günlük N/mm <sup>2</sup>
Tip 2	5,08	5,39	6,05	7,31	7,84
Tip 3-1	6,63	6,87	7,07	8,90	9,06
Tip 3-2	5,88	6,11	6,23	8,05	8,27
Kontrol Karışımı	3,30	4,18	4,54	4,66	4,78

Şekil 38. de eğilmede çekme dayanımlarının grafiğini verilmektedir.



Şekil 38. Eğilmede çekme dayanımı grafiği

Beton numunelerin havadaki ağırlıkları, doymun kuru yüzeyli ağırlıkları ve sudaki ağırlıkları tartılarak tüm numuneler için birim hacim ağırlıklar belirlenmiştir.

Tip2 için  $\gamma_{cT2} = 2,292 \text{ gr/cm}^3$

Tip3-1 için  $\gamma_{cG1} = 2,316 \text{ gr/cm}^3$

Tip3-2 için  $\gamma_{cG2} = 2,276 \text{ gr/cm}^3$

Kontrol Karışımı için  $\gamma_{cKK} = 2,307 \text{ gr/cm}^3$

### 2.5.2. Yüzey Aşınma Direncinin Belirlenmesi

Normal bir beton yolun yüzeyindeki çıkıntıları iri agrega danelerinden daha çok çimento hamuru içindeki ince agrega daneleri oluşturmaktadır. Üç tip KYB karışım Karpuz (2008)'un, geliştirdiği deney düzeneği kullanılarak aşınmaya tabi tutulmuştur. Bu düzeneğe ile pürüzlendirilmiş beton yüzeye sabit düşey ve yatay gerilme uygulanmaktadır. Deney düzeneği için agregaların trafik altında cilalanmaya yatkınlığını ölçmede kullanılan

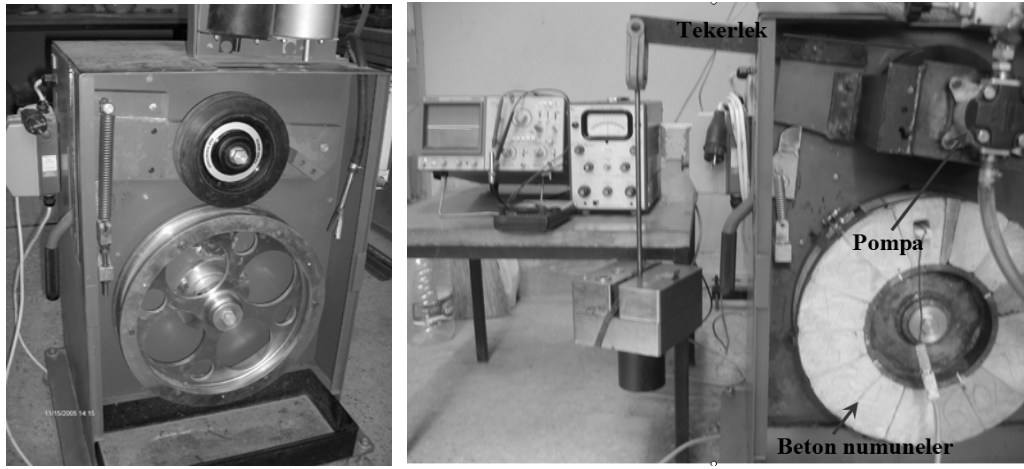


standart Hızlandırılmış Cilalanma Deney Aleti (British Accelerated Polishing Machine) modifiye edilmiştir. Bu deney aletinde serbest dönen belirli bir yük etkisindeki 20 cm çapındaki lastik tekerlek, tekerlek-agrega temas ara yüzeyine ince kum ve su karışımı akarken, 40 cm çaptaki tambur üzerine yerleştirilmiş 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. Deney aletindeki tekerleğin kauçuk kısmının içi doludur. Bu tekerleğin basma yüzeyi düz ve izsizdir. Kauçuğun lastik sertliği 67 değerindedir (Karpuz, 2008).

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, Türkiye piyasasında şerit halde satılan ortalama pürüzlülük derinliği değeri kum yayma yöntemi uygulanarak 0,8 mm bulunan en kalın zımpara kağıdı kullanılmıştır. Kalıbın iç yüzeyine zımpara kâğıdı bütün şerit halinde yapıştırılmıştır. Kalıba dökülen betonla zımpara kâğıdının aderansını beton dökümünden hemen önce zımpara kâğıdı yüzeyi sisleme yapılarak ıslatılmıştır. Beton numuneler kalıptan çıkarılırken pürüzlülüğüne zarar verilmemesine özen gösterilmiştir.

Tambura yerleştirilmiş beton numunelerden başlangıç (0 geçiş) sürtünme katsayısı, profil ve temas noktaları ölçümleri alındıktan sonra, temas alanına maksimum 10 kg/cm<sup>2</sup> düşey basınç uygulayacak şekilde koluna ağırlık asılan ve 1 kg/cm<sup>2</sup> ortalama sürtünme gerilmesi uygulayacak şekilde yağ pompa vanası ayarlanan aşınma düzeneğinin ve osiloskopun kablo bağlantıları yapılmıştır. İlk çalıştırmada torkmetrenin fazla zorlanmaması için düşey yükleme başlangıçta yapılmamıştır. Su döngüsü başlatılarak, alet çalıştırılmıştır. Düşey yük kolu indirilerek tekerlek beton numuneler üzerine bırakılmıştır. Tekerleğin herhangi bir numune üzerindeki bir noktadan toplam geçiş sayısı ya da diğer

ifadeyle tamburun toplam tur sayısı istenen değeri buluncaya kadar çalıştırılmıştır. 1000, 5000, 25000 ve 100000 toplam geçiş sayılarında sistem durdurularak tambur üzerindeki numunelere başlangıçta yapılan ölçümler tatbik edilmiştir. 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 püskürtülmüştür. Aşındırma sırasında tekerlek-beton teması ara yüzeyine aşınmayı etkileyecek su ya da aşındırıcı toz verilmemiştir. Her beş bin de bir sistem durdurularak lastiğin soğuması beklenip tekrar çalıştırılmıştır.



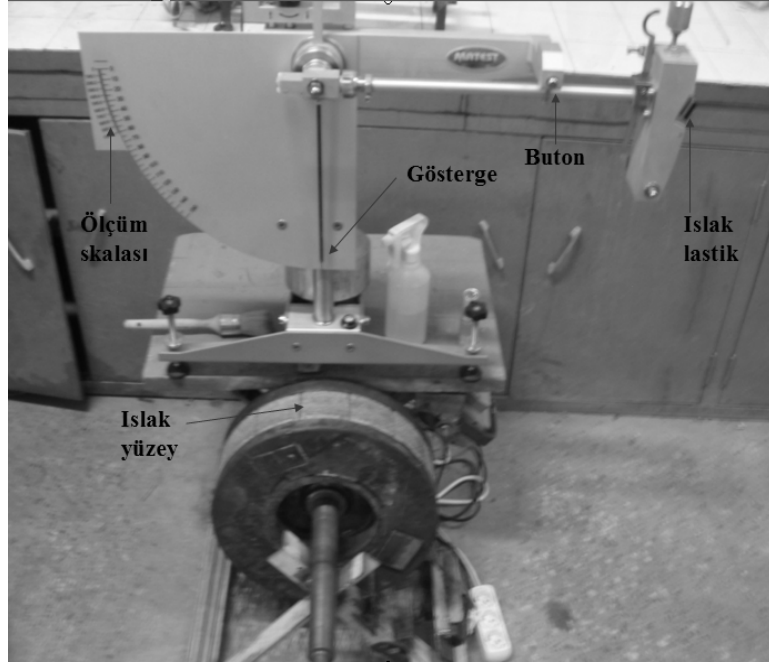
Şekil 39. Tekerlek dönüşü ile betonda oluşacak aşınmanın ölçülme düzeneği

### 2.5.3. Sürtünme Katsayısının Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında imal edilen yeni kalıplara beton yerleştirilmesinden en fazla bir gün sonra kalıbın dışı, vidaları açılıp çıkarılmıştır. Betonda varsa yapışmış zımpara tozları sivri uçlu bir aletle yüzeye zarar vermeden temizlenmiştir. Üç tip karışım için ayrı ayrı hazırlanan halka şeklinde birbirini tamamlayan toplam onbeş adet numune teker teker kalıp dışına alınıp kür için suya konulmuştur. 28 gün sonra sudan çıkarılıp bir gün de açık havada bekletildikten sonra aşınma deney aletinin tamburuna belirli sırada yerleştirilmiştir. Birbirlerine göre yükseklik farkı yapacak şekilde yerlerinden oynamalarına müsaade etmeden tamburun her iki kenarından gergilerle kademeli olarak sıkıştırılıp sabitlenmiştir.

Ağırlık balans ayarı da yapıldıktan sonra numuneler tambur çalışma kapsamında imal edilen sürtünme ve profil ölçüm düzeneğine yerleştirilmiştir. Düzenek tablası normal konumuna alınıp üzerine kalibrasyonu yeni yapılmış İngiliz sürtünme pandülü ölçüm aleti

yerleştirilmiştir. Sürtünme pandülünün salınım yönü ile tambur üzerindeki numunelerin boyuna yönünün paralel olmasına, alet üzerindeki düzecen tam düşeyi göstermesine, pandül salınım yaptığında lastik takozun aşınan beton numune yüzeyinin ortasına sürtmesine ve aletin ölçüm sırasında sarsılmamasına dikkat edilmiştir (TS EN 1097-8). Sonra tambur iki taraftan vidalarla sıkıştırılıp sabitlenmiştir.



Şekil 40. Sürtünme katsayısı ölçümünde düzeneğin durumu

Ucuna lastik sürtünme takozu takılı pandül numune üzerine getirilmiş, ilk değdiği noktayla son değdiği nokta arasındaki sürtünme boyu, alet üzerindeki ayar vidası yardımıyla yukarı aşağı oynanarak, yatayda 76 mm olacak şekilde kumpasla ölçülerek ve yakın ışık kaynağıyla iyice görülerek hassas bir şekilde ayarlanmıştır.

Daha önceden ıslatılıp nemlendirilmiş beton numune yüzeyleri ve lastik takoz bol suyla tekrar iyice ıslatılmıştır. Sürtünme kaybını gösterecek ibre dikeydeki sıfır konumuna getirildi. Sonra yukarıdaki pozisyonunda bekleyen pandül, butonuna basılarak serbest bırakılmış ve salınım yapıp geri döndüğünde numune yüzeyine değmeden elle tutulmuştur. İbrenin gösterdiği küçük yazılı F skaladaki değer, tamsayı olarak kaydedilmiştir. Bu şekilde her bir numune için peş peşe her seferinde ıslatma işlemi yapılarak beş salınım yaptırılmış ve son üç okumanın ortalaması alınarak (TS EN 1341) Tablo.19'e kaydedilmiştir.



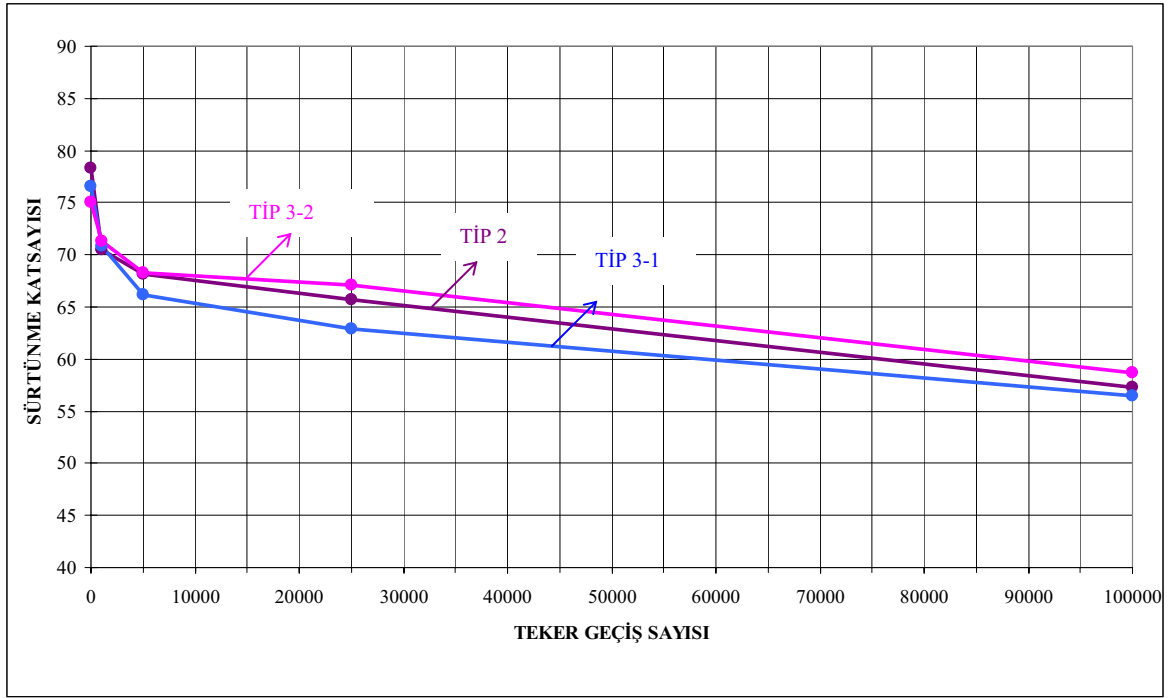
Şekil 41. Numunelerden sürtünme katsayısı ölçümü alınması

İngiliz Sürtünme Pandülü (BPT, ASTM E-303) ile, 3 farklı karışımdan oluşan 9 adet beton numuneler üzerinde 3'er tekerrür olarak yapılan testlerin sonuçları ve ortalama değerleri Tablo 19. da verilmiştir. Tablolara göre başlangıçta ortalama olarak 70-80 aralığında ölçülen ıslak sürtünme katsayısı değerleri 100.000 tekerlek geçişi sonrasında ortalama olarak 50-60 aralığında 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.

Tablo 19. Tip2, Tip3-1 ve Tip3-2 karışımlarda sürtünme katsayısı sonuçları

	Tekerleğin Geçiş (Tekerrür) Sayıları						Kayıplar %				
	VERİ	0	1000	5000	25000	100000	0-100000	0-100000 ORT.	1000-100000	1000-10000 ORT.	
Tip2	N 2-1	1	79	69	67	64	53	32,33	26,84	23,79	18,67
		2	78	68	68	64	51				
		3	75	69	70	63	53				
		ORT.	77,33	68,67	68,33	63,67	52,33				
	N 2-2	1	80	70	68	67	61	22,78		14,08	
		2	79	72	70	67	62				
		3	78	71	68	67	60				
		ORT.	79	71	68,67	67	61				
	N 2-3	1	80	72	68	66	59	25,42		18,14	
		2	78	73	67	66	58				
		3	78	70	67	67	59				
		ORT.	78,67	71,67	67,33	66,33	58,67				
Tip 3-1	N 3-1-1	1	70	67	62	56	52	24,64	26,19	20	20,31
		2	69	63	60	55	52				
		3	68	65	59	56	52				
		ORT.	69	65	60,33	55,67	52				
	N 3-1-2	1	82	71	66	66	58	28,4		18,31	
		2	81	70	65	65	58				
		3	80	72	66	66	58				
		ORT.	81	71	65,67	65,67	58				
	N 3-1-3	1	80	77	73	69	58	25,52		22,61	
		2	80	76	72	67	60				
		3	79	77	73	66	60				
		ORT.	79,67	76,67	72,67	67,33	59,33				
Tip 3-2	N 3-2-1	1	73	70	67	65	58	20,09	21,79	17,06	17,82
		2	73	71	67	65	59				
		3	73	70	66	65	58				
		ORT.	73	70,33	66,67	65	58,33				
	N 3-2-2	1	78	75	73	72	64	18,18		15,63	
		2	77	75	73	71	62				
		3	76	74	72	71	63				
		ORT.	77	74,67	72,67	71,33	63				
	N 3-2-3	1	75	70	66	65	55	27,11		20,77	
		2	75	69	64	65	54				
		3	75	68	66	65	55				
		ORT.	75	69	65,33	65	54,67				

Sürtünme katsayısı değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 42.de verilmektedir.



Şekil 42. Her üç tip karışım için sürtünme katsayısı değişimi

Grafikten de anlaşılacağı gibi her üç grup için 5000 devirden sonra grafik belli bir doğrusallık göstermektedir. Bu gruplar için 5000 tekerlek geçişinden sonra grafiğin denklemleri:

Tip 2 için:

$$y = -1,135 \cdot 10^{-4}x + 68,68 \quad (19)$$

Tip 3-1 için:

$$y = -1,029 \cdot 10^{-4}x + 66,73 \quad (20)$$

Tip 3-2 için:

$$y = -1,005 \cdot 10^{-4}x + 68,72 \quad (21)$$

olarak verilebilir.

### **3. BULGULAR VE İRDELEME**

#### **3.1. KYB Deneylerinin Sonuçlarının İrdelenmesi**

Tip 1 ve Tip 2 kireçtaşı ile hazırlanmış karışımlar için yayılma çapları ortalama 720 mm ile 695 mm olarak ölçülmüştür. KYB için yayılma çapı limit değerleri 650-800 mm aralığındadır. 3.Tip bazalt agregası ile oluşturulmuş her iki grup (hem uçucu küllü hem uçucu külsüz) karışım için yayılma çapı ortalama 675 mm olarak okunmuştur. Yollarda boyuna ve enine eğimler düşünülerek KYB'nin uygulanabilirliği için yayılma çaplarının minimum düzeyde tutulması hedeflenmektedir. Dolayısıyla sonuçların alt limit değerine yakınlığı hem bazalt hem de kireçtaşı agregası ile oluşturulan KYB için yolda uygulanabilirliğin bu yönden olumlu olduğu görülmektedir. Hatta bazalt agregası ile oluşturulan 3.Tip karışımlar Tip 2'ye oranla daha da alt limit değerine yakın olduğu gözlenmektedir.

t50 yayılma süreleri ölçülerek KYB'lerin doldurma kabiliyetleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. En uzun süre Tip 1 karışımında 4,7 sn olarak ölçülmüştür. En kısa sürede 50 cm çapa Tip 2 karışımlar ulaşmıştır (3,59 sn).

V-Funnel deneyi yapılarak betonun ayrışma dirençleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. 3,59 sn'de geçen Tip 2 KYB karışımları en kısa sürede geçen karışım olmuştur. En uzun süre Tip 3-2 KYB karışımları olup (11 sn) segregasyona karşı en yüksek dirence sahip olan karışımında bu grup olduğu görülmektedir.

#### **3.2. Sertleşmiş Beton Deneylerinin Sonuçlarının İrdelenmesi**

##### **3.2.1. Beton Basınç Dayanımı**

Daha öncede belirtildiği gibi Tip 1 karışımlarda meydana gelen tabakalaşma nedeniyle bu beton numuneler deneylere tabi tutulmamış ve kullanılmamıştır. Bu karışım türünde segregasyonun nedeninin agregası ile katkının uyumsuzluğu olabileceği düşünülmektedir.

Tablo 17.de görüldüğü gibi Tip 2 kireçtaşı agrega ile oluşturulan karışımların 28 gün sonunda basınç dayanımları  $49,2 \text{ N/mm}^2$  ye ulaşmıştır. Tip 2 karışım olan kireçtaşı ile hazırlanan bu KYB türü 28 günlük basınç dayanımından C35 beton sınıfında olduğu anlaşılmaktadır. 3.Tip bazalt agrega ile oluşturulmuş karışımlardan uçucu kül karıştırılarak hazırlanan 2. Grup KYB türünün 28 gün sonunda  $61,3 \text{ N/mm}^2$  basınç dayanımına 7, 14, 21, ve 28 günlük düzgün bir eğilimle artan dayanım grafiği izleyerek ulaşmıştır. Bu karışım da C50 beton sınıfına girmektedir. Tip 3-1 olan uçucu kül kullanılmadan hazırlanan bazalt agregalı KYB karışımları en yüksek dayanıma ulaştığı gözlenmiştir. 28 gün sonunda  $69,2 \text{ N/mm}^2$  dayanıma ulaşan bu beton C55 beton sınıfında bulunmaktadır. Aynı granülometriye ve özelliklere sahip süper akışkanlaştırıcı katılmadan (yerine W/C oranı 0,53'e çıkartılarak oluşturulmuş) geleneksel betona uygun olarak üretilen ve 13cm slump veren beton üretilmiştir. Kontrol karışımının dayanım sonuçları KYB ile kıyaslanmıştır. Bu kontrol karışımı 28 gün sonunda elde edilen  $33,9 \text{ N/mm}^2$  dayanım ile C25 beton sınıfındadır.

Kontrol karışımında su oranının arttırılmasına rağmen betona akışkanlık kazandırılmamış, yayılma sağlamayan ancak slump veren bir karışım oluşturulmuştur. Ayrıca geleneksel beton özelliklerindeki bu betonun 600 dozlu bir beton olmasına rağmen 28 günlük dayanımı aynı dozaja sahip KYB'ye nazaran çok düşük çıkmıştır.

### **3.2.2. Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı**

Her üç tip dört grup numune için orta noktadan yüklenen dikdörtgen kesitli beton kiriş numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu elde edilen eğilmede çekme dayanımlarında basınç dayanımlarında olduğu kadar farklılık bulunmadığı gözlenmiştir. Tip 2 numuneler  $7,84 \text{ N/mm}^2$ 'lik eğilmede çekme dayanımı ile 28 gün sonunda en düşük dayanıma sahip olan KYB grubudur Tip 3-2 uçucu küllü bazalt agregalı karışımlar çok farklılık olmamakla birlikte Tip 2'den daha fazla dayanıma sahip olup 28 gün sonunda  $8,27 \text{ N/mm}^2$ 'lik eğilmede çekme dayanımına ulaşmışlardır. En yüksek eğilmede çekme dayanımına basınç dayanımında da olduğu gibi Tip 3-1 numuneler sahiptir ( $9,06 \text{ N/mm}^2$ ). Kontrol karışımlarının basınç dayanımında olduğu gibi eğilmede çekme dayanımı da KYB'lere oranla oldukça düşük çıkmıştır. 28 gün sonunda bu geleneksel beton karışımlar  $4,78 \text{ N/mm}^2$  eğilmede çekme dayanımına ulaşmışlardır.



### 3.3. Yüzey Aşınma Direncinin ve Sürtünme Katsayısının İrdelenmesi

Şekil 45. de görüldüğü gibi sıfır tekerlek geçişinde en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan Tip 2 kireçtaşı agregası ile oluşturulmuş karışım en yüksek kayıp yüzdesine sahip olup 100000 devir tekerlek geçişi sonunda Tip 3-2 karışımdan daha düşük ama 1.Grup karışımından daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olmuştur. Sıfır tekerlek geçişinde en düşük sürtünme katsayısına sahip olan Tip3-2 karışımlar en düşük kayıp yüzdesine sahip olup 100000 devir sonunda en yüksek sürtünme katsayısına sahip olan numunelerdir. Tip 3-1 numunelerse sıfır tekerlek geçişinde sürtünme katsayıları ikinci sırada iken ortalama bir kayıp yüzdesine sahip olarak 100000 devir sonunda en az sürtünme katsayısı değerine ulaşmıştır.

Tablo 18.incelendiğinde sürtünme katsayısı kayıp yüzdesi en az 0-100.000 tekerlek geçişi için Tip 3-2 karışım (%21,79) numunelerinde elde edilmiştir. Ortalama kayıp yüzdeleri bakımından genel bir sıralama yapmak gerekirse, en düşük Tip 3-2 olan uçucu küllü bazalt agregalı karışım (%21,79), sonra Tip 3-1 olan bazalt agregalı karışım (%26,19) ve son olarak en yüksek kayıp yüzdesine sahip olan da Tip 2 kireçtaşı agregası ile oluşturulan karışımlardır (%26,84).

Aşınma deneyine tabi tutulan örnekler bakıldığında kireçtaşı örneklerde hem agregası hem de beton hamuru aşınarak parçalandığı görülmüştür. Bazaltlı örneklerde ise agregada çok fazla aşınma ve parçalanma görülmezken daha çok beton hamurlarından kopma olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin bazaltın aşınma direncinin yüksek ancak betona aderans yeteneğinin daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Kendiliğinden Yerleşen Beton'un (KYB), beton yol kaplaması olarak kullanılabilirliği, farklı agrega ve süper akışkanlaştırıcı türleri ile denenerek belirlenmeye ve karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, öncelikle, oluşturulacak karışımların bileşenlerinin doğru olarak saptanması sağlanarak her tip beton karışımı için KYB'da aranan şartlar sağlanmıştır. Çalışmanın sonunda varılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1- KYB elde edebilmek için öncelikle, agrega-süper akışkanlaştırıcı uygunluğu test edilmeli; segregasyon ve tabakalaşma olmamasını sağlayacak seçim yapılmalıdır. Örneğin, çalışmada kullanılan Kireçtaşı agregası ile Viscocrete 5W süper akışkanlaştırıcısının uygun bir karışım sağlamadığı gözlemlenmiş; buna karşın, Kireçtaşı ile Polycar 300 ve Bazalt ile New Flow 200 süper akışkanlaştırıcısının uygun sonuçlar verdiği saptanmıştır. KYB'nin performansı, uygun bileşen seçimine bağlıdır.

2- KYB granülometrisine uygun Bazalt + 600 kg çimento + New Flow 200 karışımından ibaret olan Tip 3-1 karışımının 28 günlük basınç dayanımı  $69,2 \text{ N/mm}^2$  olup süper akışkanlaştırıcı dışında aynı malzeme ile hazırlanmış geleneksel betonda 28 günlük basınç dayanımı  $33,9 \text{ N/mm}^2$  olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, geleneksel betona göre KYB'de %100'ün üzerinde, yani yaklaşık 2 kat daha büyük bir basınç dayanımı elde edilmiştir. Bazalt + Uçucu kül + Çimento + New Flow 200 karışımında (Tip 3-2) 28 günlük basınç dayanımı  $61,3 \text{ N/mm}^2$  olurken, Kireçtaşı + Çimento + Polycar 300 karışımında (Tip 2) ise basınç dayanımı  $49,2 \text{ N/mm}^2$  olarak bulunmuştur. Buradan görüldüğü gibi, farklı KYB tiplerinde farklı basınç dayanımları elde edilmektedir.

3- Eğilmede 28 günlük çekme dayanımları Tip 3-1'de  $9,06 \text{ N/mm}^2$  olup bu granülometri ve çimento oranına göre hazırlanan geleneksel tip beton karışımında 28 günlük eğilme çekme dayanımı  $4,78 \text{ N/mm}^2$  olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi eğilmede çekme dayanımları açısından da KYB, geleneksel betona göre %88'lik bir iyileştirme sağlamaktadır. Çekme dayanımları Tip 3-2'de  $8,27 \text{ N/mm}^2$ , Tip 2'de ise  $7,84 \text{ N/mm}^2$ 'dir.

4- Tekerlek ile kaplama yüzeyi arasındaki sürtünme katsayısı, trafik güvenliği açısından son derecede önemli olup üretilen her 3 tip KYB için laboratuarda sürtünme deneyleri yapılmıştır. Numunelerin beton döküm yüzeyi 0,8 mm'lik zımpara kağıdı kullanılarak mikro düzeyde pürüzlendirilmiştir. Islak numune yüzeyleri üzerinde yapılan sürtünme deneyleri sonucunda Şekil 45'teki grafiklerden görüldüğü gibi, teker geçiş sayısına göre giderek azalan değerler ortaya çıkmıştır: Numuneler üzerinden ilk 5000 teker geçişine kadar sürtünme katsayılarının çok yüksek bir hızla 75-80'lerden 65-70'lere düşmüş; 5000 teker geçişinden sonraki sürtünme katsayıları ise çok düşük bir eğimle azalmış ve 100 000 tekerlek geçişinde sürtünme katsayısı 55-60'lara inmiştir. 5000-100000 arası tekerlek geçişi grafikten görüldüğü gibi doğrusal olduğundan bu kesim (19), (20), (21) regresyon denklemleri ile ifade edilmiştir. Çeşitli yöntemlerle beton kaplama yüzeylerinin pürüzlendirilip sürtünme katsayılarının artırılabilceği bilinmektedir.

5- Yüzey aşınma oranının en az olduğu KYB, %22'lik aşınma değeri ile Tip 3-2 karışımı olup en yüksek aşınma değeri ise %26 ile kireçtaşı Tip 2'dir. Kireçtaşı KYB'lerde aşınma hem agregada ve hem de çimento hamurunda olmuştur. Bazalt agregalı karışımlarda agregada çok fazla aşınma olmazken daha çok beton hamuru aşınmıştır. Dolayısıyla, aşınma ve sürtünme katsayıları açısından bazaltlı karışımların daha iyi ve uzun ömürlü olduğu anlaşılmaktadır.

6- Üretilen geleneksel betonda su/çimento oranı 0,53 iken Tip 3-1 KYB'de 0,35'dir. Buradan açıkça görüldüğü gibi, su/çimento oranı, geleneksel betonda oldukça fazla olmaktadır. Dolayısıyla, geleneksel betondaki su/çimento oranının yüksekliği, basınç ve çekme dayanımlarını yaklaşık yarı yarıya düşürmektedir. Başka bir anlatımla, suyun yerini alan süper akışkanlaştırıcılar, su/çimento oranını son derecede düşürmekte ve dayanımları yaklaşık 2 kat arttırmaktadır.

7- Buraya kadar açıklanan verilerden açıkça görülebileceği gibi, KYB'nin yol kaplaması olarak kullanılmasıyla çok olumlu sonuçlar alınabilir ve yüksek dayanımlı yollar elde edilebilir. Bilindiği gibi yolu en çok tahrip eden unsurların başında "su" olup KYB, geleneksel betona göre çok daha az geçirgen olduğundan bu yönden de olumlu bir katkı sağlayacaktır. KYB'nin, yol kaplaması olarak kullanılmasında en baş sorun bu betonların

özelliği gereği %2'den fazla eğimli kesimlerde kullanılamayacağı hususudur. Ancak, bu sorun, eğimin %2'den büyük olduğu yol kesimlerinde kayar kalıp sistemleri kullanmak suretiyle aşılabılır. Şöyle ki; eğimli yol kesiminin en düşük kotundan başlanarak kayar kalıp sistemiyle döküme başlanarak yüksek kotlara doğru döküm işi ilerletilebilir. Kayar kalıbın, çeşitli yol eğimlerine göre ne kadar sürede kaydırılabileceği ayrıca araştırılmalıdır. %2'den düşük eğimli yol kesimlerinde ise hiçbir sorun yoktur. KYB, özellikle, yüksek mekanik özellikler gerektiren hava limanlarının pist inşaatlarında ideal bir malzeme olarak kullanılabilir.

8- KYB için diğer bir dezavantaj; "ekonomiklik" gibi gözükmetedir: Karışıma katılan süper akışkanların pahalı olması, KYB'yi geleneksel betona göre pahalı yapmaktadır. Ancak, yukarıda vurgulandığı gibi KYB, çok yüksek mekanik özellikler sağlamaktadır. Yüksek mukavemetin sağlayacağı beton kaplama kalınlığındaki azalma bir yana karşılaştırmayı asla ilk yatırım maliyetleri ile mukayese etmemelidir: Bilimsel sonuç, ancak, 20-50 yıllık uzun vadeli Fayda/Maliyet analizleri ile elde edilebilir. Bilindiği gibi bu ekonomik analizler yapılırken ilk yatırım maliyetleri yanında, göz önüne alınan ekonomik analiz ömrü boyunca alternatiflerin bakım giderleri ile yolu kullanacak taşıtların işletme giderlerinin de göz önüne alınarak karşılaştırma yapılması gerekmektedir. Uzun vadeli bu analizler yapıldığında; KYB'nin, yüksek trafik hacimli otoyollarda ve hava limanı pistlerinde yüksek bir rantabiliteye sahip olacağı düşünölmektedir ki; bu konu ayrı bir araştırma konusudur.

## 5. KAYNAKLAR

- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G. 1996. “Asfalt Kaplama İle Beton Yol Karşılaştırılması” THBB Hazır Beton Dergisi – Beton Yollar Özel Eki.
- Ağar, E., Süttaş, İ. ve Öztaş, G., 1998. Beton Yollar, 1. Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Ağar, E. ve Taşdemir, Y., 2007. Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar, THBB.
- Akakın, T., 2007. Almanya'daki Beton Otoyolların Yapım ve Tasarımında Son Gelişmeler, THBB.
- Akkaya, Y. ve Taşdemir M. A., 2007. Beton Yollarda Kullanılan Malzemelerle İlgili Genel Bir Değerlendirme, THBB.
- Akter, M., Hossain, M., Boyer J. ve Parcells W. J., 2002. Factors Affecting Rapid Roughness Progression on Portland Cement Concrete Pavements in Kansas, TRB, 1809.
- Alexander, M. G., 1993. From Nanometres to Gigapascals Cementing Future, A University of Cape Town Publication, Inaugural Lecture, 23p.
- Arıoğlu, E. ve Köylüoğlu, Ö, 1996. “Yüksek Performanslı Betonların Yol Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi” THBB Hazır Beton Dergisi – Beton Yollar Özel Eki.
- Atiş, C. D., 2002. High Volume Fly Ash Abrasion Resistant Concrete, Journal of Materials In Civil Engineering, 5-6, 274-277.
- Atiş, C. D., 2003. Abrasion-Porosity-Strength Model For Fly Ash Concrete, Journal of Materials In Civil Engineering, 7-8, 176-179.
- Atiş, C.D., Sevim U.K., Özcan F., Bilim C., Karahan O., Tanrikulu A.H. ve Ekşi A., 2004. Strength Properties Of Roller Compacted Concrete Containing A Non-Standard High Calcium Fly Ash, Materials Letters, 58, 1446– 1450.
- Aykan, G., Gürol, G., Tezel, O.O., Yüceer, Z., 2004. Kendiliğinden Yerleşen Beton Deney Metodları ve Uygulama Örnekleri, Beton 2004 Kongresi, Haziran, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 321-325.
- Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. ve Aitcin, P-C., , 1997. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes, ACI Materials Journal, 94, 4, 286-290.

- Brooks, J. J., Bennett, E. W. ve Owens, P. L., 1987. Influence of Lightweight Aggregates on Thermal Strain Capacity of Concrete, Magazine of Concrete Research, 39, 60-72.
- Bui, V.K., Montgomery, D., Hinczak, I. ve Turnerc, K., 2002. Rapid Testing Method For Segregation Resistance Of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 1489–1496.
- Corradi M., Khurana R. , Magarotto R. , Torresan I., 2002. Zero Energy System: An Innovative Approach for Rationalized Precast Concrete Production, BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry, İstanbul.
- De Nicola, B., Pani, L. ve Pozzo, E., 1994. Strain of Concrete at Peak Compressive Stress for a Wide Range of Strengths, Materials and Structures, 27, 206-210.
- Donza, H., Cabrera, O.ve Irassar E. F., 2002. High-strength Concrete With Different Fine Aggregate, Cement and Concrete Research, 32, 11, 1755–1761.
- Dugat, J., Roux, N. ve Bernier, G., 1996. Mechanical Properties of Reactive Powder Concretes, Materials and Structures, 29, 233-240.
- EFNARC, 2002. Specification and Guidelines of SCC.
- Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, 1. Baskı, METU Pres, Mayıs.
- Eren, Ö. ve Yılmaz, Z., 2003. Lif Donatılı Yüksek Dayanımlı Betonlarda Kırılma Tokluğu ve Darbe, Teknik Dergi, 14-1.
- Ergün, M., Öztaş, G., 2004. Beton Yolların Yüzey Özelliği ve Etkileri, Beton 2004 Kongresi, İstanbul, Haziran, Bildiriler Kitabı, 268-275 .
- Felekoğlu, B., 2003, Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Feylessoufi, A., Villieras, F., Michot, L. J., De Donato, P., Cases, J. M. ve Richard, P., 1996. Water Environment and Nanostructural Network in a Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Composites, 18, 23-29.
- Fwa, T. F. ve Tan C.C., 1992. Laboratory Study of Microtexture-Related Skid Resistance of Concrete Pavement Materials, Journal of Testing and Evaluation, 20, 3, 207-215.
- Geiker, M.R., Brandl, M., Thrane, L.N., Bager, D.H. ve Wallevik O., 2002. The Effect Of Measuring Procedure On The Apparent Rheological Properties Of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 32, 1791–1795.
- Ghafoori, N. ve Sukandar, B. M., 1995. Abrasion Resistance of Concrete Block Pavers, ACI Materials Journal, 92, 1.

- Giovambattista, A., Violini, D. ve Zerbino, R., 1992. Extensibility of High-Strength Concretes, *Materials and Structures*, 25, 552-557.
- Ghafoori, N. ve Diawara, H., 1999. Abrasion Resistance of Fine Aggregate-Replaced Silic Fume, *Concrete Materials Journal*, 96, 5.
- Ghezal, A. ve Khayat, H., 2002. Optimizing Self-Consolidating Concrete With Limestone Filler By Using Statistical Factorial Design Methods, *ACI Materials J.*, 99, 3, 264-272.
- Grüneward, S. ve Walraven J. C., 2001. Parameter-Study On The Influence Of Steel Fibers And Ccoarse Aggregate Content On The Fresh Properties Of Self-Compacting Concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 1793–1798.
- Güner, M.S. ve Süme, V., 2001. *Yapı Malzemesi ve Beton*, 3. Baskı, Aktif Yayınevi, İstanbul.
- Hadi, M.N.S. ve Arfiadi, Y., 2001. Optimum Rigid Pavement Design By Genetic Algorithms, *Computers and Structures*, 79, 1617-1624.
- Henry, J. J., 2000 *Evaluation of Pavement Friction Characteristics*. NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, Washington DC.
- Ho, D.W.S., Sheinn, A.M.M., Ng, C.C. ve Tam C.T., 2002. The Use Of Quarry Dust For SCC Applications, *Cement And Concrete Research*, 32, 505– 511.
- Hughes J.J., 2002. *Evaluation of Self-Consolidating Concrete–Summary Report*, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- Hui, Li, Mao-hua Zhang ve Jin-ping Ou, 2005. Abrasion Resistance of Concrete Containing Nano-Particles for Pavement, *Wear*.
- Juvinall, R.C., 1967. *Stres, Strain, and Strenght of Materials*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kandemir, A., 2005. *Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Karadelis, J.N., 2000. A Numerical Model For The Computation of Concrete Pavement Moduli: A Non-Destructive Testing And Assessment Method, *NDT&E International*, 33, 77–84.
- Karpuz, O., 2008. *Beton Yol Karışımındaki İnce Agreganın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Khayat, K.H. ve Yahio, A., 1997. Effect Of Welan Gum-High-Range Water Reducer Combinations On Rheology Of Cement Grout, *ACI Materials J.*, 94,5, 365-372.

- Krebs, R.D. ve Walker, R.D., 1971. Highway Materials, Woolson, R.S., Clark, B.J. ve Contrucci L.E., McGraw-Hill Inc., USA.
- Kwai, T., 1987. Non-Dispersible Underwater Concrete Using Polymers, Marine Concrete Int. Cong. On Polymers In Concrete, 9, Brighton, England, 6.
- Lee, S. W., Cho, Y. H., Lee, H. J., Kim, N. C. ve Chun, S. J., 2005. Rate of Skid Resistance Loss for Tinned Concrete Pavements, TRB.
- Macit, S.,2003. Beton Yollar, Mühendislik Bülteni, 61, 21-24.
- Macit, S.,2003. Reverber Fırın Cürufunun Sıcak Karışım Asfalt Betonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Matte, V. ve Moranville, M., 1999. Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes, Cement and Concrete Composites, 21, 1-9.
- Momber, A. W., 2000. The Erosion of Cement Paste, Mortar and Concrete by Gritblasting Wear, 246, 46-54.
- OECD, 1972. Winter Damage To Road Pavements, Road Research Group, May, Paris.
- Okamura, H., 1997. Self-Compacting High-Performance Concrete, Concrete International, 19-7, 50-54.
- Okamura, H. and Ouchi, M., 1999. Self Compacting Concrete Development, Present Use and Future, Proceedings of the First International RILEM Symposium, pp. 3-14, Stockholm, Sweden.
- Okazawa, S., Umezawa, K. Ve Tanaka, Y., 2000.A New Polycarboxylate Based Polymer: Phsical Properties Of Concrete, Concrete 2000.
- Ouchi M., 1999. Self-Compacting Concrete – Development, Applications and Investigations, Nordic Concrete Research Committee Publications.
- Özkul, M.H., Doğan Ü.A., Çavdar, Z., Sağlam, A.R. ve Parlak, N., 1999. Properties Of Fresh And Hardened Concretes Prepared By New Generation Superplasticizers, Creating With Concrete Proc. Int. Conference, Dundee, U.K.,467-474.
- Özkul, M.N., 2002. Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen-Sıkışan Beton, Hazır Beton, 52, 64-71.
- Özturan, T., 1984. Beton Aşınmasının İki Fazlı Malzeme Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Özey, İ., 1992. Rijit Üstyapı ile Esnek Üstyapının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



- Persson, B., 2001. A Comparison Between Mechanical Properties Of Self-Compacting Concrete And The Corresponding Properties Of Normal Concrete, Cement and Concrete Research, 31, 193-198.
- Persson, B., 2003. Internal Frost Resistance And Salt Frost Scaling Of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 373-379.
- Poon, C.S. ve Ho, D.W.S., 2004. A Feasibility Study On The Utilization Of r-FA In SCC, Cement and Concrete Research, 34, 12, 2337-2339.
- Ramadhan, R.H. ve Abdulwahhab, 1997. H.I.A., Temperature Variation Of Flexible And Rigid Pavements In Eastern Saudi Arabia, Budding and Environmenf, 32, 4, 367-373.
- Rols, S., Ambroise, J. ve Pera, J., 1999. Effect Of Different Viscosity Agents On The Properties Of Self-Leveling Grout, Cement and Concrete Research, 29, 261-266.
- Sadegzadeh, M., Page, C.L. ve Kettle, R.J., 1987. Surface Microstructure and Abrasion Resistance of Concrete, Cement Concrete Research, 17, 4, 581-590.
- Siddique, R., 2003. Effect of Fine Aggregate Replacement With Class F Fly Ash on The Abrasion Resistance of Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 11, 1877-1881.
- Sonebi, M. ve Khayat, K. H., 2001. Testing Abrasion Resistance of High-Strength Concrete, Cement, Concrete & Aggregates, 23, 1.
- Sonebi, M., 2004. Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans, Cement and Concrete Research, 34, 7, 1199-1208.
- Su, N., Hsu, K.C. ve Chai H.W., 2001. A Simple Mix Design Method For Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research ,31, 1799-1807.
- Şimşek, O., 2004 Beton Bileşenleri ve Beton DeneYleri, TÇMB.
- Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. G., 1996. The Tensile Strain Capacity of Concrete, Magazine of Concrete Research, 48, 211-218.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A. D., Lydon, F. D. ve Barr, B. I. G., 1998. Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Model Approach, Cement and Concrete Composites, 20, 301-318.
- Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Mills, N., Barr, B. I. G. ve Lydon, F. D., 1999. Combined Effects of Silica Fume, Aggregate Type, and Size on Post Peak Response of Concrete in Bending, ACI Materials Journal, 96, 74-83.
- THBB Hazır Beton Dergisi, 2002. Bir Seçenek Daha Var Beton Yollar Özel Eki.

- Timoshenko, S., 1953. History of The strength of Materials, McGraw-Hill Book Company, New York.
- TS EN 197-1, 2002. Genel Çimento Bileşimi, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Mart, Ankara.
- TS EN 206-1, 2002. Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk TSE, Nisan, Ankara.
- TS EN 450, 2008. Uçucu Kül –Betonda Kullanılan – Tarifler, Özellikler, Kalite Kontrolü, Mart, Ankara.
- TS EN 934-2, 2002. Beton Katkıları – Tarifler, Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, TSE, Mart, Ankara.
- TS EN 1008, 2003. Beton Karma Suyu- Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun, Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Nisan, Ankara.
- TS EN 1097-6, 2002. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, Mart, Ankara.
- TS EN 1097-8, 2004. Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler –Bölüm 8: Taş Parlatma Değerinin Tayini, Nisan, Ankara.
- TS EN 1341, 2004. Cilalanmamış Kaymaya/Kızaklamaya Karşı Direnç Değerinin Ölçülmesi, Mart, Ankara, .
- TS EN 12390-2, 2002. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Kürlenmesi, Nisan, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2003. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Nisan, Ankara
- TS EN 12390-5, 2002. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, Nisan, Ankara
- TS EN 12390-6, 2002. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımının Tayini, Nisan, Ankara.
- TS 706 EN 12620, 2003. Beton Agregaları, Nisan, Ankara.
- Tunç, A., 2001. Yol Malzemeleri Ve Uygulamaları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul.
- URL-1., [www.thbb.org/Article.aspx?ID=3](http://www.thbb.org/Article.aspx?ID=3), 2007. Akkaya, Y., Taşdemir, M.A. “Beton Yollarda Kullanılan Malzemeler İle İlgili Genel Bir Değerlendirme”
- URL-2, [www.thbb.org/Article.aspx?ID=5](http://www.thbb.org/Article.aspx?ID=5), 2007. Öztaş, G. “Beton Yol Çatlaklarının İncelenmesi”

- Walraven, J., 1999. The Evolution of Concrete, Structural Concrete, Journal of fib, P1, 1.
- Walraven J., 2002. "Self-Compacting Concrete in the Netherlands", First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete.
- Welch, G. B., 1966. Tensile Strains in Unreinforced Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, 18, 9-18.
- Xie, Y., Liu, B., Yin, J.ve Zhou S., 2002. Optimum Mix Parameters Of High-Strength Self-Compacting Concrete With Ultrapulverized Fly Ash, Cement and Concrete Research .32, 477-480.
- Yang, J. ve Jiang G., 2003. Experimental Study On Properties Of Pervious Concrete Pavement Materials, Cement and Concrete Research, 33, 381-386.
- Zelić, J., 2005. Properties of Concrete Pavements Prepared With Ferrochromium Slag As Concrete Aggregate, Cement and Concrete Research, 35, 12, 2340-2349.
- Zhu, W., Bartos, P.J.M., 2003. Permeation Properties Of Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 921-926.

## ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Trabzon'da doğdu. Lise öğrenimini 1996 yılında Trabzon Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Öğrenimi sırasında onur alma başarısını da göstererek 2000 yılında mezun oldu. Mezun olduğu yıl bu bölümde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2000 yılı Aralık ayında Fen Bilimleri kadrosundan İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2003 yılı Ocak ayında Yüksek Lisansını tamamlayarak İnşaat Yüksek Mühendisi ünvanı aldı. Aynı yıl yine aynı bilim dalında doktora öğrenimine başladı. 2005 yılında Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinin vermiş olduğu "İz Bırakanlar Bursu"na hak kazandı. 2005 yılı Aralık ayında İller Bankası 17. Bölge Müdürlüğünde İnşaat Yüksek Mühendisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevi yapmakta ve yabancı dil olarak İngilizce bilmektedir.