

BETON AŞINMASININ İKİ FAZLI MALZEME OLARAK İNCELENMESİ

İ. T. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜNCE

“ DOKTOR ”

Ünvanının verilmesi için kabul edilen tezdır.

Yük. Müh. Turan ÖZTURAN

Tezin Fen Bilimleri Ens. Verildiği Tarih : 24 Ekim 1983

Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Mart 1984

Doktorayı Yöneten Öğretim Üyesi
Diğer Jüri Üyeleri

: Prof. Dr. Ferruh KOCATAŞKIN
: Prof. Dr. Süheyl AKMAN
: Prof. Dr. Mustafa AKKURT

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
İNŞAAT FAKÜLTESİ MATBAASI

1 9 8 4

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
İÇİNDEKİLER	i
TABLO LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
RESİM LİSTESİ	vii
SEMBOLLER	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xiii
 BÖLÜM I	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM II	
LİTERATÜR İNCELEMESİ	5
II.1. Sürtünme	5
II.1.1. Genel	5
II.1.2. Kuru Sürtünme Teorileri	6
II.1.3. Sürtünmeye Etkiyen Faktörler	8
II.1.4. Metal Olmayan Cisimlerin Sürtünmesi	9
II.1.5. Yuvarlanma Sürtünmesi	10
II.2. Aşınma	11
II.2.1. Genel	11
II.2.2. Aşınma Çeşitleri	12
II.2.2.1. Adezif Aşınma	12
II.2.2.2. Abrasif Aşınma	13
II.2.2.3. Korozif Aşınma	13
II.2.2.4. Yorulma Aşınması	14
II.2.2.5. Diğer Aşınma Türleri	14
II.2.3. Aşınmaya Etkiyen Faktörler	15
II.2.4. Aşınma Özeliğinin Ölçülmesi	15
II.2.5. Metal Olmayan Cisimlerde Aşınma	15
II.2.6. Aşınmada Malzeme Ömrü	16
II.3. Beton, Tabii Taşlar ve Çeşitli Döşeme Malzemelerinin Aşınması	17
II.3.1. Genel	17
II.3.2. Betonda Yüzeysel Aşınma	17
II.3.3. Betonun Aşınması Üzerine Yapılmış Çalışmalar	18
II.3.4. Betonda Aşınmaya Etkiyen Faktörler	20
II.3.4.1. Çimento Özelliklerinin ve Dozajın Etkisi	20

II.3.4.2. Agrega Özelliklerinin ve Granülometrinin Etkisi	20
II.3.4.3. Su/Çimento Oranının ve Basınç Mukavemetinin Etkisi	22
II.3.4.4. Beton Kürü ve Bakım Şartlarının Etkisi	23
II.3.4.5. Yüzey Bitirme İşlemlerinin Etkisi	23
II.3.4.6. Özel Yüzey Uygulamalarının Etkisi	24
II.3.4.7. Diğer Etkenler	25
II.3.5. Aşınmaya Dayanıklı Beton Üretimi	26
II.3.6. Betonda Aşınma Deneyleri ve Standartları	27
II.3.7. Tabii Taş ve Diğer Döşeme Malzemelerinde Aşınma Deneyleri	29
II.4. Kompozit Malzemeler	31
II.4.1. Genel	31
II.4.2. Danelerle Donatılmış Kompozitlerde Temel Bağlantılar	32
II.4.3. Kompozit Malzeme Kurallarının Betonun Bazı Özelliklerine Uygulanışı	34
II.5. Betonun Aşınmasıyla İlgili Çalışmaların Değerlendirilmesi ve Deneysel Araştırmanın Konusu	38

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR	40
III.1. Kullanılan Malzemeler	40
III.1.1. Çimento	40
III.1.2. Agregalar	40
III.2. Beton Karışımları	41
III.2.1. Karışım Esasları	41
III.2.2. Üretilen Serilerin Kodlanması	42
III.2.3. Elde Edilen Karışımların Bileşimleri	42
III.2.4. Beton Üretimi, Numune Şekil ve Boyutları, Yerleştirme ve Kür Şartları	43
III.3. Deney Aletleri, Yöntemleri ve Deney Sonuçları	44
III.3.1. Taze Beton Deneyleri	44
III.3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri	44

BÖLÜM IV

DENEYSEL SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ	46
IV.1. İri Agreg a Hacı m Oranının Artmas ının Betonun Abrazif Aş ınmasına Etkisi	46
IV.2. Harç Faz ı Ö zeliklerinin Kompozitin Aş ınmasına Etkileri	50
IV.2.1. Kum Cinsinin Betonun Aş ınmasına Etkisi	50
IV.2.2. Harç Faz ının Aş ınmasının Betonun Aş ınmasına Etkisi	51
IV.3. Agreg a Faz ı Ö zeliklerinin Kompozitin Aş ınmasına Etkileri	52
IV.3.1. İri Agreg a Cinsinin Betonun Aş ınmasına Etkisi	52
IV.3.2. İri Agreg a Faz ının Aş ınmasının Betonun Aş ınmasına Etkisi	53
IV.4. Su/Çimento Oranının Betonun Aş ınmasına Etkisi	54
IV.5. Aş ınmanın Ç eşı tli Beton Ö zelikleriyle İ lişkisi	56
IV.5.1. Aş ınma ile Birim Ağ ırlık Aras ındaki İ liş ki	56
IV.5.2. Aş ınma ile Bas ınç Mukavemeti Aras ındaki İ liş ki	56
IV.5.3. Aş ınma ile Eğ ilme-Ç ekme Mukavemeti Aras ındaki İ liş ki	58
IV.5.4. Aş ınma ile Dinamik Elastisite Modülü Aras ındaki İ liş ki	58
IV.5.5. Aş ınma ile Schmidt Sertlię i Aras ındaki İ liş ki	59
IV.6. Betonda Abrazif Aş ınmanın Zamanla Deę iş imi ve Aş ınma Ö mrü	60
IV.7. Aş ınma Deney Sonuç larından Pratikte Yararlanma Olanakları	62

BÖLÜM V

SONUÇLAR	65
EKLER	69
Resimler	70
Tablolar	74
Ş ekiller	91
LİTERATÜR LİSTESİ	117
TEZ YAZARININ Ö ZGEÇ Mİ Ş İ	124

TABLO LİSTESİ

Tablo	Sayfa
II.1- Çeşitli Aşınma Etkilerine Dayanıklı Beton Bileşimleri (Grün)	28
III.1- Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri	74
III.2- Agregaların Granülometrik, Fiziksel Özellikleri ve Petrografik Bileşimi	75
III.3- Su/Çimento Oranı 0,65 Olan Betonların Gerçek Bileşimleri	76
III.4- Su/Çimento Oranı 0,50 Olan Betonların Gerçek Bileşimleri	77
III.5- Su/Çimento Oranı 0,45 olan Betonların Gerçek Bileşimleri	78
III.6- Su/Çimento Oranı 0,35 olan Betonların Gerçek Bileşimleri	79
III.7- Taze Beton Özellikleri	80
III.8- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,65$)	81
III.9- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,50$)	82
III.10- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,45$)	84
III.11- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,35$)	85
III.12- Taşlar Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları	86
IV.1- Aşınma ile Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiyi Belirleyen Bağlantılar	87
IV.2- Araştırılan Harç ve Betonların Aşınma Devir Sayısı Olarak Ortalama Aşınma Ömürleri	88
IV.3- Müsaade Edilen Aşınma Sınır Değerleri (DIN 52108)	89
IV.4- Aşınmaya Dayanıklı Beton Karışımları İçin Pratik Reçeteler	90

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
II.1- Gerçek Değme Alanlarında Soğuk Kaynama	7
II.2- Bir Metal Yüzeyindeki Film Tabakalarının Şematik Gösterimi	8
II.3- Kompazitlerde Özelik-Konsantrasyon İlişkilerini Belirlemede Yararlanılan İç Yapı Modelleri	33
II.4- Betonun Kompazit Malzeme Olarak İncelenmesinde Kullanılan Diğer İç Yapı Modelleri	35
II.5- Betonun Kırılma Olayına Yaklaşımında Yararlanılan İç Yapı Modeli	37
IV.1- BK/0,65 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	91
IV.2- BK/0,50 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	91
IV.3- BK/0,45 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	92
IV.4- BK/0,35 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	92
IV.5- BÇ/0,50 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	93
IV.6- BÇ/0,35 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	93
IV.7- BG/0,50 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	94
IV.8- BG/0,35 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	94
IV.9- FK/0,50 Serisi Betonlarda $h-A_p$ İlişkisi	95
IV.10-İri Agreg a Fazı Hacım Oranı ile Yüzey Oranı Arasındaki Korelasyon	96
IV.11-Kum Cinsinin $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	97
IV.12-Harç Fazının Aşınmasının Betonun Aşınmasına Etkisi	98
IV.13-Aşınmanın h_m/h_p Oranıyl a Değişimi	99
IV.14-Harç Fazının Aşınmasının, E/C Oranı 0,50 olan Kalker Kırmataşlı Betonların ($V_p = 0,40$) Aşınmasına Etkisi	99
IV.15-E/C Oranı 0,50 olan Karışımlarda İri Agreg a Cinsinin $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	100
IV.16-E/C Oranı 0,35 olan Karışımlarda İri Agreg a Cinsinin $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	100
IV.17-İri Agreg a Fazının Aşınmasının, $V_p = 0,30$ olan Betonların Aşınmasına Etkisi	101
IV.18-BK Serisi Betonlarda E/C Oranının $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	101
IV.19-BÇ Serisi Betonlarda E/C Oranının $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	102

IV.20- BG Serisi Betonlarda E/C Oranının $h-A_p$ İlişkisine Etkisi	102
IV.21- Su/Çimento Oranının Aşınmaya Etkisi	103
IV.22- Aşınma ile Birim Ağırlık Arasındaki İlişki	104
IV.23- Aşınma ile 28 Günlük Eşdeğer Küp Mukavemeti Arasındaki İlişki	105
IV.24- Aşınmanın R/R_m Oranı ile Değişimi	106
IV.25- Aşınmanın R_m/R_p Oranı ile Değişimi	106
IV.26- Aşınma ile 28 Günlük Eğilme-Çekme Mukavemeti Arasındaki İlişki	107
IV.27- Aşınma ile Dinamik Elastisite Modülü Arasındaki İlişki	108
IV.28- Aşınmanın $E_d/(E_d)_m$ Oranı ile Değişimi	109
IV.29- Aşınmanın $E_d/(E_d)_p$ Oranı ile Değişimi	109
IV.30- Aşınmanın $(E_d)_m/(E_d)_p$ Oranı ile Değişimi	110
IV.31- Aşınma ile Schmidt Sertliği Arasındaki İlişki	110
IV.32- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BK/0,65)	111
IV.33- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BK/0,50)	111
IV.34- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BK/0,45)	112
IV.35- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BK/0,35)	112
IV.36- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BÇ/0,50)	113
IV.37- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BÇ/0,35)	113
IV.38- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BG/0,50)	114
IV.39- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (BG/0,35)	114
IV.40- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (FK/0,50)	115
IV.41- Aşınma Miktarının Aşınma Devir Sayısı ile Değişimi (Kalker ve Granit Taşı)	115
IV.42- Aşınma Hızının İri Agrega Yüzey Oranı ile Değişimi	116

RESİM LİSTESİ

Resim	Sayfa
1. 0,50 Su/Çimento Oranındaki Kalker Kırktaşlı Karışımların Kesitleri	70
2. 0,50 Su /Çimento Oranındaki Podima Çakıllı Karışımların Kesitleri	71
3. BÖHME (DIN 52108) Aletinde Aşınma Deneyi	72
4. Aşınma Derinliğinin Ölçülmesi	73

SEMBOLLER

A_0	: Gerçek değme alanı
P	: Birbirlerine değen yüzeylere etkiyen normal kuvvet
σ_A	: Değme halindeki metallerden daha yumuşak olanın plastik akma gerilmesi
F	: Sürtünme kuvveti
τ_m	: Değme halindeki metallerden daha yumuşak olanın kayma mukavemeti
μ	: Sürtünme katsayısı
μ_R	: Yuvarlanma sürtünme katsayısı
μ_k	: Kayma halindeki kinetik sürtünme katsayısı
V_s	: Kayma hızı
V_R	: Yuvarlanma hızı
D	: Yuvarlanan cismin yarıçapı
V	: Adezif aşınma hacmi
S	: Kayma mesafesi - 1 m^3 betondaki kum miktarı (kg)
H	: Değme halindeki metallerin yüzey sertliği
Z	: Adezif aşınmaya iştirak eden değme noktası oranı
q_a	: Nominal yüzey basıncı
K	: Metallerde abrazif aşınma katsayısı
BK	: Karabiga kumu ve kalker kırmataşı ile hazırlanan karışımlar
BÇ	: Karabigakumu ve Podima çakılı ile hazırlanan karışımlar
BG	: Karabiga kumu ve granit kırmataşı ile hazırlanan karışımlar
FK	: Fenerbahçe kumu ve kalker kırmataşı ile hazırlanan karışımlar

V_m	: Harç fazı hacım oranı
V_p	: İri agregâ fazı hacım oranı
A_m	: Harç fazı yüzey oranı
A_p	: İri agregâ fazı yüzey oranı
h	: Betonun abrazif aşınma derinliği
h_m	: Harç fazının abrazif aşınma derinliği
h_p	: İri agregâ fazının abrazif aşınma derinliği
l/h	: Betonun aşınma direnci
l/h_m	: Harç fazının aşınma direnci
l/h_p	: İri agregâ fazının aşınma direnci
E_d	: Betonun dinamik elastisite modülü
$(E_d)_m$	: Harç fazının dinamik elastisite modülü
$(E_d)_p$	: İri agregâ fazının dinamik elastisite modülü
R	: Betonun basınç mukavemeti
R_m	: Harç fazının basınç mukavemeti
R_p	: İri agregâ fazının basınç mukavemeti
Sc	: Schmidt sertliği
Δ	: Betonun kuru birim ağırlığı
T	: Betonun eğilme-çekme mukavemeti
h_{em}	: Müsaade edilen emmiyetli aşınma derinliği
λ	: Aşınma hızı (mm/devir)
$\bar{t}$	: Ortalama aşınma ömrü (devir sayısı olarak)
$t_{0,90}$	: % 90 güvenli aşınma ömrü
$\hat{t}$	: Aşınma ömür dağılımının standard sapması
C	: 1 m ³ betondaki çimento miktarı (kg) Zayıf konsantrasyonlu bir süspansiyonun viskozitesi
E	: 1 m ³ betondaki su miktarı (kg) Kompozit malzemenin elastisite modülü

ÖZET

Bu çalışmada, iki fazlı kompozit malzeme olarak düşünülen betonda fazların aşınma özelliklerinin ve hacim oranlarının değişiminin betonun aşınma direncine ve ömrüne olan etkileri incelenmiş, betonda aşınma özeliğinin kompozit malzeme kurallarıyla ifade edilebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca sertleşmiş betonun bazı özellikleriyle aşınma arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

Bu amaçla II.ci Bölümde yapılan yayın taramasından, birbirlerine değen katı cisimlerin bağıl hareketleri sırasında malzeme yüzeyinde oluşan sürtünme kuvvetlerinin aşınmaya neden oldukları anlaşılmaktadır. Bu sürtünme kuvvetleri cisimlerin hareketini zorlaştırarak ısı yükselmesi ile enerji kaybına neden olmakta ve sonuçta adezyon, abrazyon, korozyon ve yorulma olayları malzeme yüzeyini aşındırmaktadırlar. Sürtünme ve aşınma olaylarının mekanizması özellikle metallerde detaylı olarak incelenmiş; sürtünme ve aşınma olaylarını açıklamaya çalışan çeşitli teoriler geliştirilmiş ve malzemenin aşınmaya dayanıklılığının arttırılması araştırılırken, sürtünme kuvvetlerinin en düşük değere indirilebilmesi için yağlama gibi önlemler geliştirilmiştir.

Beton, tabii taş ve organik ve inorganik esaslı çeşitli zemin kaplama malzemelerinde ise durum biraz farklıdır. Bir yandan kaplama malzemesinin aşınma direnci arttırılmaya çalışılırken, diğer yandan yaya ve araç trafiğinin sağlıklı gelişebilmesi açısından sürtünmenin gerekli olduğu ve kayganlığın endüşük değere indirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

Bu konuda yapılan yayın taramasından beton döşeme ve yollarda adezyon ve abrazyon olaylarının, su yapılarında ise kavitasyon ve erozyon olaylarının aşınmaya neden olduğu anlaşılmaktadır. Çeşitli aşınma şartlarına maruz betonun aşınma direncinin arttırılabilmesi için, betonun sert ve sağlam agregalar kullanılarak iyi kalitede üretilmesi ve betona iyi bir bakım uygulanması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Ayrıca aşınmaya dayanıklı beton üretimi için çeşitli katkı ve özel yüzey uygulamaları önerilmekte ve servisteki betonların aşınma dirençlerinin arttırılması için bazı acil yöntemler geliştirilmektedir.

Son zamanlarda betonun kompozit malzeme olarak ele alınıp, elastik ve inelastik birçok özelliklerinin çeşitli iç yapı modelleri yardımıyla hesaplanabilmesi amacıyla çok sayıda araştırma yapılmış olmasına rağmen, yapılan yayın taramasından betonun aşınma özeliği ile ilgili böyle bir çalışmanın bulunmadığı görülmüştür. Daha önceki çalışmalarda betonun aşınma özeliği genellikle çeşitli aşınma şartlarının simüle edildiği deneysel yöntemlerle araştırılmış ve betonun çeşitli aşınma şartlarına dayanıklı hale getirilebilmesi için önlemler incelenmiştir.

Yayın taramasından elde olunan bilgilerin ışığında betonun aşınma özeliğini kompozit malzeme kurallarıyla araştırmak ve aşınma ile diğer beton özellikleri arasındaki ilişkileri belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma plânlanmıştır. III.cü Bölümde verilen deneysel çalışmalarda kompozit bileşenlerinin niteliklerinin bir seri içinde sabit kaldığı 9 değişik seri beton üretilmiştir. Farklı serilerde, harç ve iri agrega fazlarının aşınma özelliklerini değiştirebilmek için su/çimento oranı ile ince ve iri agrega nitelikleri değiştirilmiştir. Diğer taraftan harç ve iri agrega fazlarının niteliklerinin değişmediği bir seri içinde, iri agrega fazının hacim oranı 0 dan 0,40 'a kadar arttırılmış ve böylece 35 farklı bileşime sahip harç ve beton üretilmiştir. Harç ve iri agrega fazlarının belirginleşmesi için çalışma süresiz granülometrilik karışımlar üzerinde yapılmıştır. Her karışımdan hazırlanan 10x10x50 cm'lik prizma numuneler üzerinde rezonans frekansı, eğilme, basınç ve Schmidt sertliği deneyleri yapılmış, prizmalardan kesilen

numuneler üzerinde de BÖHME (DIN 52108) aletiyle aşınma deneyleri yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen diyagramların incelenmesinden, sertleşmiş betonun aşınma özeliğinin iri agrega hacim oranıyla değişimi ile aşınmanın sertleşmiş betonun bazı özellikleriyle değişimi IV.cü Bölümde irdelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirme V.ci Bölümde özetlenen şu bulguları ortaya çıkarmıştır: İri agrega fazının aşınan kesitteki yüzey oranı betonun aşınma özeliğinin fiziksel açıklamasında daha iyi değerlendirme olanağı sağlamakta ve betonda aşınma özeliği kompozit malzeme kurallarıyla ifade edilebilmektedir. Aşınmaya daha dayanıklı olan fazın miktarı arttıkça, kompozitin aşınmaya dayanıklılığı artmaktadır. Harç fazı niteliği sabit kalırken, aşınmaya dayanıklı iri agrega kullanılmasıyla kompozitin aşınma direnci önemli miktarda artmaktadır. Harç fazı sağlam betonlarda kalker kırmataşı miktarının artması aşınma direncini arttırmamaktadır. Betonun aşınmaya dayanıklılığı, birim ağırlık, eğilme ve basınç mukavemeti, dinamik elastisite modülü ve Schmidt sertliği ile aynı yönde artmaktadır. Betonun aşınmasına etkiyen faktörler, aşınma ömrünü de aynı yönde etkilemektedirler.

Böylece diğer bazı beton özelliklerinde olduğu gibi, betonun aşınma özeliğinin de kompozit malzeme kurallarıyla ifade edilebileceği ortaya çıkmıştır.

SUMMARY

Foot traffic and the skidding, scraping or sliding of objects on the floors and stairs of residential and industrial buildings, and of railway and subway stations result in wear of concrete surfaces. Concrete on roads, highways, bridges and the landing and parking facilities of airports is also subject to wear due to heavy trucking and cars, with and without chains. Concrete on hydraulic structures such as dams, spillways, bridge abutements and tunnels, on the other hand, is subject to wear due to the action of abrasive materials carried by waters flowing at low velocities as well as the cavitation erosion where a high hydraulic gradient is present.

So far it has not been possible to develop a single test method to measure the wear characteristics of flooring materials under all conditions, because of either the complexity of the wear mechanisms or the variety of causes of surface wear. Instead, the wearing characteristics of building materials such as stone and concrete are generally determined experimentally using an apparatus under standard wearing conditions and the effects of material properties and environmental conditions on wear are evaluated by comparisons. However, the writer has not encountered in literature, any investigation on wear of concrete, considering it as a composite material.

For this reason, the aim of this study has been chosen to approach the concrete as a two-phase composite material, hoping to be able to formulate in this way analytical expressions for the amount of wear of concrete in terms of the volume fractions and the wear of each of the two phases, namely the mortar and the aggregate. Also, relations between the wear and some other properties of concrete are investigated.

The literature survey presented in Part II is concerned with three topics: Firstly, the nature, laws and types of friction and wear of various materials as well as the theories attempting to explain the friction and wear mechanisms of metals are reviewed. From the summaries in this section, following important conclusions are drawn: Four main types of wear are distinguished for metals sliding on each other in the absence of a lubricating material between the contacting surfaces. Adhesive wear is the result of cold welding occurring at the asperities of the contacting surfaces, whereas the abrasive wear is the removal of solid material from a surface caused by plowing or gouging out by another body much harder than the abraded surface. Corrosive wear is the result of the combined action of a corrosive environment and mechanical forces acting on a surface. Surface fatigue wear is primarily associated with the rolling motion. The amount of adhesive and abrasive wear is directly proportional to the normal force acting on the contacting surfaces as well as to the sliding distance and inversely proportional to the hardness of the surfaces. The nature of friction and wear of nonmetals may be simulated to that of metals and the theories explaining the wear mechanisms of metals may be applied to a certain extent to materials other than metals.

Secondly, a detailed summary of researches on wear of concrete is presented. Previous investigations on the abrasion of concrete surfaces reveal that resistance of concrete surfaces to abrasion increases with the increase in cement content, compressive strength and the decrease in water-cement ratio. Concrete becomes more resistant to abrasion as the fine and coarse aggregate used are harder, better graded and more resistant to abrasion. Curing and surface finish are among the important factors which affect the abrasion of concrete surfaces. In some cases, special surface hardeners, liquid or dry-shake, are found to increase the resistance of concrete surfaces to abrasion.

Thirdly, literature on composite materials are reviewed briefly. Even though concretes are multiphase materials,

composite two-phase models for their mechanical behaviour have found general acceptance. Considering that concrete is an aggregate-cement paste composite, elastic constants, shrinkage and creep of concrete have been evaluated using relations derived from various two-phase models.

Part III presents the description of the tests and the test methods. In the experimental part of this study 9 different series of concrete mixes have been used. The qualities of the phases of the composite material have been changed from one series to the other. In each series, however, the volume fraction of the coarse aggregate phase was changed from 0 to 0.40 only. Thus, concretes with 35 different mix proportions were produced. In order to change the quality of the mortar phase, either the type of the fine aggregate or the water-cement ratio was varied. In order to change the nature of the aggregate phase, the type of the coarse aggregate was varied. Prismatic specimens of 10x10x50 cm in size were fabricated and tested nondestructively for surface hardness by rebound hammer test, and dynamic modulus of elasticity by the resonance test respectively. Then, the modulus of rupture and the compressive strength of concretes were determined by flexure tests and equivalent cube tests respectively. Finally, the abrasion tests were done on samples cut from the pieces of the prisms which had not been tested for compressive strength. The abrasion tests were made using the German standard (DIN 52108) method of test apparatus called BÖHME abrasion table, with the modification that the surface areas of the samples subjected to abrasion were 100 sq.cm., but not 50 sq.cm. as specified in the German test method. Therefore the vertical load applied to the sample on the abrasion table was increased from 30 kg. to 60 kg., and the amount of the abrasive material, renewed after every 22 turns of the abrasion table, was increased from 20 gr. to 40 gr. in order to account for the change in the surface area. The sample was rotated 90° at the end of every 22 turns of the table and the decrease in the height of the sample was measured at the end of every 88 turns. The loss in the specimen after a total of 440 turns of the abrasion table was taken as the depth of abrasion of the sample.

In Part IV discussions and evaluations of the test results are presented.

In the discussion of the abrasion test results, the variation of the depth of abrasion with the surface ratio (A_p) of the coarse aggregate was considered. However, the volume ratio and the surface ratio of the coarse aggregate have not been found to differ very much. Parallel and series phase distribution models as well as the relation of two-phase suspensions were considered for the variation of the depth of abrasion with the surface ratio of the coarse aggregate. It has been shown that an expression of the form of lower bound relations, offered for the modulus of elasticity of concrete, represented the variation of abrasion depth with coarse aggregate content best.

The abrasion resistance of the concrete has been defined as the reciprocal of the depth of abrasion. When the difference between the abrasion resistances of the two phases was large, the depth of abrasion of the composite has been found more sensitive to the changes in the coarse aggregate volume ratio. For concretes, containing gravel or granite coarse aggregate, with a water-cement ratio of 0.50, the abrasion resistance of the coarse aggregate was much higher than that of the mortar. The addition of these kinds of hard aggregates in to the mortar increased the abrasion resistance of the concrete. With the increase in the volume fraction of the hard coarse aggregate in the mix, the number of hard coarse grains on the surface subjected to abrasion has been thought to increase and hinder the abrasion of the mortar. As the quality of the mortar was improved by reducing the water-cement ratio from 0.50 to 0.35, the effect of the increase in the volume ratio of granite or gravel aggregates became less pronounced in increasing the abrasion resistance of the concrete.

On the other hand, for concretes with a water-cement ratio of 0.50 but containing crushed limestone aggregate, the abrasion resistances of the two phases were almost equal and the changes in the volume ratio of limestone coarse aggregate did not influence the depth of abrasion of the concrete. Increasing the water-cement ratio to 0.65 or

using an inferior sand in the mix resulted in a decrease in the abrasion resistance of the mortar. In these cases, an increase in the volume ratio of the limestone coarse aggregate decreased the abrasion loss of the concrete surface. Furthermore, as the water-cement ratio was reduced from 0.50 to 0.45 and 0.35 successively, the abrasion resistance of the mortar phase was improved, and hence the abrasion loss of the concrete increased with an increase in the volume ratio of the softer limestone coarse aggregate.

The type and quality of the fine and coarse aggregates used in the mix affected the abrasion resistance of the concrete. Good graded sand of granite origin improved the abrasion resistance. Also, the use of gravel coarse aggregate, composed mainly of quartz and quartzites, increased the abrasion resistance of the concrete much more than the crushed granite or limestone.

Water-cement ratio, on the other hand, had also a great effect on the abrasion resistance of the concrete. The lower the water-cement ratio of the mix, the higher the abrasion resistance. In this investigation, it has been found that there is a critical value of water-cement ratio of 0.475 below which the use of a higher volume ratio of limestone coarse aggregate in concretes containing a good graded hard sand did not improve the abrasion resistance of concrete.

It has been established in this study that abrasion resistance may also be related to various other properties of concrete. The abrasion depth decreased with the increase in unit weight, dynamic modulus of elasticity, rebound number, modulus of rupture and compressive strength of concrete. A linear relation between the rebound number and abrasion loss gave the highest correlation coefficient. The abrasion depth was found to be inversely proportional to some power of each of the properties cited above. The correlations between abrasion and each of these properties were also found to vary with the type of the coarse aggregate used. The correlations between the abrasion resistance and some other property of the concrete seemed to be high for concretes containing poor quality mortar or coarse aggregate. Improving the quality of the components of the composite lowered this correlation.

Factors which affect the abrasion resistance of concrete also seemed to affect the abrasion life of the concrete in the same way. Average abrasion life may be calculated by dividing the allowable depth of abrasion, chosen for specified conditions of wear, by the rate of abrasion of concrete surfaces tested at an abrasion apparatus simulating the same specified conditions of wear. On the other hand, it is also necessary to determine the abrasion life of a concrete surface with a certain confidence by evaluating statistically the results of a large number of abrasion tests.

Part IV contains conclusions for some practical evaluation of the test results. A few mix proportions for abrasion resistant concretes are also given.

Part V presents a summary of results and some proposals for future study. The most important finding in this investigation is the demonstration that abrasion of concrete may be evaluated by approaching the concrete as a two-phase composite material. The abrasion of the concrete is determined by the abrasions of the phases. The abrasion resistance of the concrete becomes higher, as the volume fraction of the phase more resistant to abrasion is increased.

The Appendix includes tables of results and evaluation diagrams.

BÖLÖM I

G İ R İ Ş

Makina elemanları ile beton döşeme, yol, havaalanı pistleri ve benzeri yapı elemanlarında, katı cisimlerin birbirlerine değmeleri nedeniyle yüzeysel etkileşimler oldukça önem kazanmaktadır. Sürtünme, adezyon ve aşınma gibi yüzeysel etkiler, çoğunlukla dikkat çekmeyecek derecede küçük oldukları halde, bazen büyük değerlere ulaşmakta ve önlem alınmadığı takdirde elemanın ömrünü önemli ölçüde azaltmaktadırlar.

Bu nedenle, sürtünme ve aşınma olayı çok eskiden beri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Katı cisimlerin yüzey durumu, yüzey ve hacim özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiş, sürtünme ve aşınma olaylarının nedenleri, etkenleri ve çeşitleri araştırılarak, bu olayların karakterini açıklamak amacıyla çeşitli teoriler önerilmiştir (12)* . Değme halindeki cisimlerin yüzeyleri aşınmaya dayanıklı hale getirilmeye çalışılırken, diğer taraftan sürtünme kuvvetlerini azaltmak için de çeşitli önlemler geliştirilmiştir.

İnşaat mühendisliği yapılarında kullanılan beton ve tabii taşların ve çeşitli zemin kaplama malzemelerinin yüzeyleri de yaya ve araç trafiğinin etkisiyle ve su yapılarında suyla sürüklenen parçacıkların veya kavitasyon olayının etkisiyle aşınıp yıpranmaktadırlar. Daha önceki çalışmalarda betonun çeşitli mekanik etkenler altındaki aşınma özeliğı genellikle belirli aşınma şartlarını temsil eden deney metodlarıyla incelenmiş ve betonda kullanılan malzemelerin, karışım kurallarının, ortam şartlarının ve bazı beton özelliklerinin betonun aşınma direncine olan etkileri araştırılmıştır (12,15,19).

*

Parantez içindeki rakkamlar literatür listesindeki numaraları göstermektedir.

Bu çalışmada ise beton döşeme ve yollarda yaya veya araç trafiği nedeniyle oluşan abrazyon aşınması araştırılmaktadır. Araştırmada esas olarak betonda abrazyon aşınmasına kompozit malzeme kurallarıyla yaklaşım amaçlanmıştır. Beton harç ve iri agreg a fazlarından oluşan bir kompozit malzeme gibi ele alınmış, fazların miktarları ve aşınma özellikleri değiştirilerek kompozit malzeme modellerinin betonun aşınma özeliğinin incelenmesinde geçerlilikleri araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca aşınma özeliğinin çeşitli beton özellikleriyle değişimi ve iri agreg a fazı oranının artışıının çeşitli beton özelliklerine etkileri de araştırılmıştır.

Yukarıda açıklanan düşüncelerin ışığında bu araştırma-yı yürütebilmek için üç ayrı konuda yayın taraması yapılmıştır. Bunlar çalışmanın II.Bölümünde görüleceği gibi sırasıyla "Sürtünme ve Aşınma Olaylarının Genel İncelenmesi", "Beton, Tabii Taşlar ve Çeşitli Zemin Kaplama Malzemelerinin Aşınma Özellikleri" ve "Kompozit Malzeme Kuralları" konularıdır.

II.ci Bölümde önce sürtünme ve aşınma olaylarının nedenleri , türleri, bu olaylara etkiyen faktörler ve ayrıca metallerdeki sürtünme ve aşınma mekanizmalarını açıklayan bazı teoriler özetlenmiştir. Daha sonra beton, tabii taş ve çeşitli zemin kaplama malzemelerinin aşınma özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar ve sonuçları ile aşınma deney metodları ve standartları ile ilgili bilgiler özetlenmiştir. Kompozit malzemeler konusunda ise genel kurallar özetlenmiş, basitleştirilmiş halde iki fazlı bir kompozit olarak düşünülen betonun bazı özelliklerini hesaplamada yararlanılan teorik modellerle ilgili bilgiler verilmiştir.

Yapılan yayın taramasından betonun aşınma özeliğinin çoğunlukla deneysel yöntemlerle incelendiği, betonda kullanılan agreg a, çimento ve katkı maddeleri gibi malzemelerin, betonun su/çimento oranının ve mekanik özelliklerinin, kür şartlarının ve yüzey düzeltme işlemlerinin aşınmaya olan etkilerinin detaylı bir şekilde incelendiği, ancak betonun aşınma özeliğinin kompozit malzeme kurallarıyla açıklanabilmesi amacıyla herhangi bir çalışma yapılmadığı kanısına varılmıştır. Bu nedenle "Betonda Abrazyon Aşınmasının Kom-

pozit Malzeme Kurallarıyla İncelenmesi" konusunda deneysel bir araştırma plânlanmıştır.

III.cü Bölümde sunulan deneysel çalışmada prizmatik numuneler üzerinde rezonans frekansı, eğilme ve basınç deneyleri ile prizmalardan kesilen numuneler üzerinde BÖHME (DIN 52108) aletiyle aşınma deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde iri agrega fazı hacim oranının artışının çeşitli beton özelliklerine ve özellikle betonun aşınmasına etkileri araştırılmış, iri ve ince agrega cinsinin ve su/çimento oranının değişiminin betonun aşınma direncine etkileri incelenmiştir.

IV.cü Bölümde deney sonuçları üzerinde yapılan değerlendirme ve irdeleme sonucu varılan ve V.ci Bölümde özetlenen sonuçlar ise şunlardır :

1) İri agrega fazının hacim oranı ile aşınan kesitteki yüzey oranının sayısal değerleri arasında pek fark yoktur; ancak bu ikincisi betonun aşınma özeliğinin fiziksel açıklamasında daha iyi değerlendirme olanağı sağlamaktadır.

2) Betonda aşınma özeliği kompozit malzeme kurallarıyla ifade edilebilmektedir ve betonun elastik özellikleri için önerilen seri fazlı model bağıntısı deney sonuçlarına gayet iyi uymaktadır.

3) Betonda aşınmaya daha dayanıklı olan fazın miktarı arttıkça, kompozitin aşınmaya dayanıklılığı artmaktadır.

4) Harç fazının aşınma direncindeki artışlar, kalker kırmataşlı betonların aşınma direncinde daha belirgin artışlar meydana getirmektedir.

5) Harç fazı niteliği sabit kalırken , aşınmaya dayanıklı sert iri agregalar kullanılmasıyla kompozitin aşınma direnci önemli oranda artmaktadır.

6) Bu çalışmada incelenen kalker kırmataşlı karışımlarda, $E/C < 0,475$ ve $h < h_p$ olduğunda, harca iri agrega katılmasının betonun aşınma özeliğinde iyileştirme yapmadığı görülmüştür.

7) Su/çimento oranının azaltılmasıyla, kompozitin aşınma direnci artmaktadır.

8) Kalker kırmataşlı betonlarda birim ağırlık, eğilme-çekme mukavemeti, basınç mukavemeti, dinamik elastisite modülü ve Schmidt sertliği gibi sertleşmiş beton özelliklerindeki artışlar, betonun aşınma direncinde artışa neden olmaktadır.

9) Betonun aşınmasına etkiyen faktörler aşınma ömrünü de aynı yönde etkilemektedirler.

10) İleri araştırmalarda, aynı konunun sürekli granülo-metrili betonlarda ve ayrıca farklı agrega ve çimento malzemelerinin kullanıldığı ve su/çimento oranının daha geniş sınırlarda değiştiği karışımlarda incelenmesi, betonun aşınma özeliği için önerilen kompozit malzeme bağıntısının V_p 'nin 0,40 dan büyük değerlerinde geçerliliğinin araştırılması ve aşınmayı azaltıcı katkı maddelerinin ve yüzey kaplamalarının etkinliğinin araştırılması ilginç olacaktır.

BÖLÖM II

LİTERATÖR İNCELEMESİ

Bu bölümde önce sürtünme ve aşınma olaylarının nedenleri, türleri, etkiyen faktörler ile sürtünme ve aşınma mekanizmalarını açıklamaya çalışan teoriler özetlenmektedir. Daha sonra betonda ve tabii taşlarla, bazı zemin kaplama malzemeleri üzerinde aşınma özeliğinin araştırılması amacıyla yapılmış çalışmalar ve sonuçları ile deney metodları ve standartlarla ilgili bilgiler verilmektedir. Sonuncu alt bölümde ise kompozit malzeme kurallarının genel bir özeti verilerek, basitleştirilmiş halde iki fazlı bir kompozit olarak düşünülen betonun çeşitli özelliklerini hesaplamada yararlanılan teorik modellerle ilgili bilgiler derlenmektedir.

II.1. Sürtünme

II.1.1. Genel

Sürtünme, birbirlerine değen katı cisimlerin temas yüzeylerinde harekete veya hareket olasılığına karşı oluşan direnç olarak tanımlanır. Cisimlerin hareketini zorlaştırarak ısı yükselmesi ile enerji kaybına ve aşınmaya neden olur.

Bağıl hareketin cinsine göre değme yüzeylerinde kayma, yuvarlanma veya kaymalı yuvarlanma sürtünmesi oluşabilmektedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı maddenin bulunması açısından ise sürtünme üç grupta incelenmektedir:

- a) Kuru sürtünme
- b) Yarı sıvı sürtünmesi
- c) Sıvı sürtünmesi

Yüzeyler arasında hiçbir yağlayıcı maddenin bulunmadığı durumlarda kuru sürtünme söz konusudur ve yüzeyler bir-

birleriyle doğrudan değme halindedirler. Değme yüzeylerinin kalın bir sıvı yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılması durumunda ise sıvı sürtünmesi vardır. Yağlayıcı maddenin viskozitesinin önemli olduğu bu durumda sürtünme ve aşınma yok denecek kadar azdır (1,2) . Ancak motorların çalışmaya başlama ve durma zamanlarında veya vibrasyonların etkisi ile yağlayıcı madde filminin bütünlüğünün kaybolduğu eş çalışan makina parçalarının genellikle yarı sıvı sürtünmesinin etkisinde oldukları belirtilmektedir (3).

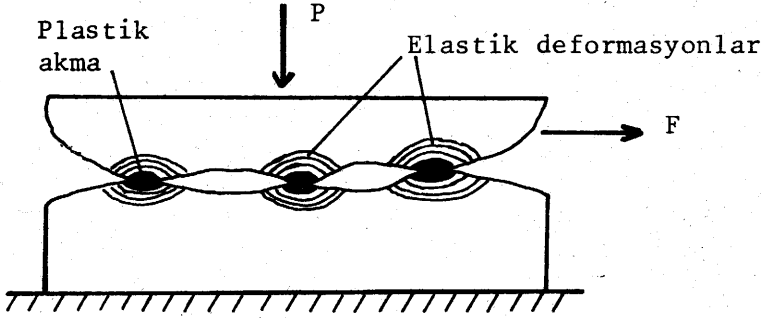
II.1.2. Kuru Sürtünme Teorileri

Amontons ve Coulomb, sürtünmeyi, cisimleri kayma yönüne dik doğrultuda yüzey pürüzlülükleri mertebesinde kaldırmak için gerekli kuvvet olarak tanımladılar ve sürtünme kuvvetinin normal yükle orantılı ve değme alanı ile kayma hızından bağımsız olduğu sonucuna vardılar (1). Tomlinson değme yüzeylerindeki moleküllerin karşılıklı etkileşiminin sürtünmeyi meydana getireceğini öne sürdü. Ancak, gerek büyük aşınma parçalarını izah edememesi, gerek de sürtünmenin sadece yüzeysel bir etki olmadığının anlaşılması dolayısıyla bu teori pek rağbet görmedi (1,4).

Bowden ve Tabor (1,5), metallerde yüzeylerin pürüzlü olması dolayısıyla gerçek değme alanının görünen alandan çok küçük olduğunu ve bu değme noktalarında oluşan yüksek yerel basınçların adezif bağlar meydana getireceğini öne sürdüler (Şekil II.1). Bu adezyon teorisine göre, sürtünmenin esasını yerel kaynak bağlarının makaslanması ve yerine yenilerinin meydana gelmesi oluşturmaktadır. Bazen de sert ve keskin pürüzlerin kazıma etkisi sürtünme direncini arttırmaktadır.

Bowden ve Tabor'a göre metallerdeki gerçek değme alanı

$$A_0 = \frac{P}{\sigma_A} \quad (II.1)$$



Şekil II.1- Gerçek Değme Alanlarında Soğuk Kaynama (1)

şeklinde ifade edilebilir. Burada P : yük, σ_A : yumuşak malzemenin plastik akma gerilmesidir. Yüzeylerin şekil ve boyutlarından bağımsız olan gerçek değme alanı yükü taşıyacak duruma gelinceye kadar değme noktaları plastik deformasyona uğrarlar. Bu arada oluşan kaynak bağların makaslanması için gereken kuvvet F ,

$$F = A_o \cdot \tau_m = \frac{P}{\sigma_A} \cdot \tau_m \quad (\text{II.2})$$

şeklinde hesaplanabilir. τ_m : Yumuşak malzemenin kayma mukavemetidir. Böylece sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{F}{P} = \frac{\tau_m}{\sigma_A} \quad (\text{II.3})$$

olur.

Gerçekte τ_m ve σ_A birbirlerinden bağımsız olmayıp, plastisite teorisine göre değme noktalarındaki plastik akma, normal ve teğetsel gerilmelerin birlikte etkileri sonucu oluşmaktadır. Çok temiz yüzeylerde, bu nedenle, teğetsel gerilmenin uygulanmasıyla sonuçta tüm geometrik alanda değme ve kilitlenme olmakta ve sürtünme çok yüksek ($\mu > 50$) değer-

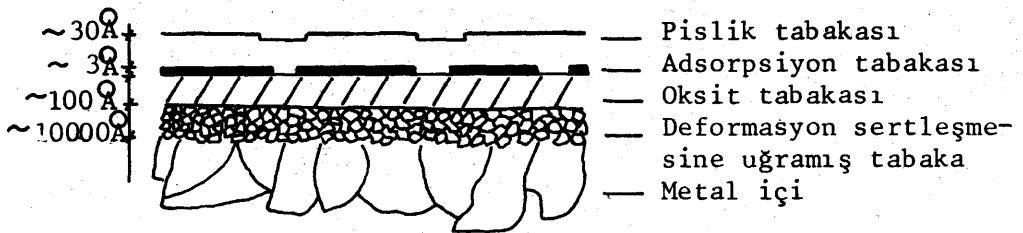
ler almaktadır. Eğer değme noktalarında bir yüzey filmi mevcut ise, bu, değme alanının sınırsız büyümesine engel olmakta ve sürtünme makul değerlere ($\mu \approx 1$) düşmektedir (5).

I.M.Fang tarafından öne sürülen plastik pürüzlenme teorisi ise adezyon teorisini tamamlayıcı nitelikte düşünülebilir (4). Değen yüzeyler plastik olarak pürüzlenmekte ve kilitlenmektedir. Bu durumda bağıl hareket sırasında kesilme değme noktalarından uzakta ve zayıf malzeme içinde bir kesitte olmaktadır.

II.1.3. Sürtünmeye Etkiyen Faktörler

Metallerde sürtünme katsayısı, yükten, değme alanından ve pratikte karşılaşılan kayma hızları için, hızdan bağımsızdır (6). Sürtünme nedeniyle değme noktalarında oluşan ısı yükselmesi yüzeylerin ve yağlamalı durumlarda yağlayıcının karakterlerini değiştirerek sürtünmeyi etkileyebilir (1,5,6).

Değme halindeki metallerin karşılıklı fiziksel ve kimyasal etkileşimi ve yüzey durumları da sürtünmeyi önemli derecede etkilemektedir. Kuru olarak tariflenen metal yüzeyleri aslında yüzey filmleri ile kaplıdır.



Şekil II.2- Bir metal yüzeyindeki film tabakalarının şematik gösterimi (6)

Şekil II.2'den görüldüğü gibi atmosfere açık bulunan metal yüzeyleri temiz değildir. Yüzeyde oluşan oksit tabakaları metalik değmeyi önlemekte ve sürtünme direncini azaltmaktadır. Ancak, yük altında bu tabaka parçalanıp, yerel

metalik değme oluşur; bunun sonucu olarak da sürtünme artar (1,3,5,6).

Değme yüzeylerinin sertliği genel olarak sürtünme direncini azaltır (6). Kayma sırasında plastik deformasyonlar sonucu değme noktalarında yüzey sertliği artmaktadır. Şekil değiştirme sertleşmesi hem kayma mukavemetinde, hem de akma gerilmesinde paralel artış yaratacağından sürtünme katsayısına çok az etki etmektedir (5).

II.1.4 Metal Olmayan Cisimlerin Sürtünmesi

Metal olmayan cisimlerde de sürtünme özelliği oldukça uniform olup, sürtünme katsayısı metallerdekilerle aynı mertebede bulunmaktadır. Bazı sapmalara rağmen Amontons kanunları geçerli kabul edilebilir.

Gevrek davranış gösteren elmas ve safir gibi çok sert, kristalli malzemelerde, yükün küçük değerlerinde, sürtünme katsayısı normal kuvvetin artmasıyla azalmaktadır. Yükün arttırılmasıyla değme noktalarında bir miktar plastik akma ve adezyon oluşmakta ve sürtünme normal yükle orantılı olabilmektedir (5,6). Elmasa çok düşük olan sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0,05-0,1$), yüzeyin temizlenmesiyle dört kat kadar artmakta ve ayrıca sürtünme özeliği yönlenmeye bağımlı olmaktadır.

Lamine malzemelerin sürtünmesi, kristal danelerinin serbest yüzeylerine etkiyen kuvvetlere bağlı olmaktadır (5). Grafit, tabakalara paralel kaymada düşük sürtünme katsayısı ($\mu \approx 0,1$) verirken, yüzeyin temiz olması halinde sürtünme artmaktadır. Molibden disülfitte ise yüzeyin temiz veya kirli olması etki yapmamakta ve sürtünme katsayısı hep düşük olmaktadır ($\mu \approx 0,2$). Yüzey enerjisinin yüksek olması mikada kuvvetli adezyon ve sürtünmeye neden olurken, uzun süreli atmosfer etkisinde sürtünme ondabirine düşmektedir.

Polimer malzemelerin visko-elastik karakterleri nedeniyle sürtünme katsayısı değme süresi ve kayma hızına bağımlı olmakta ve artan yük değerleriyle azalmaktadır. Ancak, düşük ve sabit kayma hızlarında polimerlerin sürtünme-

sini adezyon mekanizmasıyla bir oranda izah etmek mümkündür (5). Adezyonun önemsiz olduğu hallerde ise elastik histerisiz dolayısıyla oluşan kayıplar sürtünmeyi oluşturur. Yüksek hızlarda ise sürtünme kayma hızı ve sıcaklığa önemli derecede bağlı olmakta ve polimerin visko-elastik özelliklerini yansıtmaktadır. Genel olarak, plastiklerde adezyon ve sürtünme yüksek ($\mu \approx 0,3-0,5$) değerler alırken, politetrafloretillen (teflon) kimyasal ataleti nedeniyle çok düşük sürtünme katsayısına ($\mu \approx 0,04$) sahiptir (5,6). Ahşap ve kauçuk gibi visko-elastik malzemelerde ise elastik histerisiz kayıpları sürtünmenin büyük bir kısmını teşkil etmekte ve yuvarlanma sürtünmesinde sürtünme kuvveti yükün 1'den büyük bir kuvvetiyle orantılı olmaktadır (5).

II.1.5. Yuvarlanma Sürtünmesi

Elastik ve plastik deformasyonlar sonucu yuvarlanma hareketine karşı direnç oluşmaktadır. Yuvarlanma sürtünme katsayısı ile, kayma halinde kinetik sürtünme katsayısı arasında

$$\mu_R = \frac{V_s}{V_R} \mu_k \quad (II.4)$$

ilişkisi ileri sürülebilir (6). Orantılılık katsayısı kayma hızının yuvarlanma hızına oranıdır. Kaymanın olmadığı saf yuvarlanma sürtünmesinde sürtünme katsayısı hemen hemen 0 değerini alır. Ancak, pratikte mutlaka bir miktar kayma ($V_s \leq 0,05 V_R$) hareketi görülmekte ve rulmanlarda yağlama gerekli olmaktadır.

Plastik deformasyonların sona ermesinden sonra, sürtünme direnci oldukça azalmakta ve sadece değme bölgelerindeki elastik histerisiz kayıpları için enerji sarfedilmektedir. Bu durumda sürtünme kuvveti ile normal kuvvet ve yuvarlanan cismin çapı arasında aşağıdaki gibi bir ilişki verilmektedir (5).

$$F = k. \frac{P^n}{D^m} \quad (II.5)$$

Burada P: normal kuvvet, D: yuvarlanan cismin yarıçapı, n:1,7-1,85 ve m:1,5-1,7 değerlerini alan ampirik sabitler olup, k malzeme cinsine, yüzey pürüzlülüğüne bağlı bir katsayıdır.

II.2. Aşınma

II.2.1. Genel

Aşınma, sürtünen yüzeylerden istenmediği halde malzeme transferi ve kaybı olarak tanımlanabilir. Birbirlerine değen yüzeyler, bağlı hareketleri sırasında zamanla aşınarak harab olurlar. Makina veya yapı elemanlarının ömrüne tesir eden bu olay, karmaşık bir karaktere sahip olup, şimdiye kadar yapılan araştırmalar sonunda çeşitli faktörlerin aşınma ile ilişkilerini gösteren tek bir formülün elde edilmesi mümkün olmamıştır.

Aşınma özeliği metallerde etraflı bir şekilde incelemek bazı teoriler geliştirilirken, yatak malzemesi olarak bazı polimer malzemelerin de aşınma mekanizması izah edilmeye çalışılmıştır (5,7,8).

İnşaat mühendisliği yapılarında kullanılan tabii taş ve beton gibi malzemelerde ise aşınma özeliği genellikle belirli aşınma şartlarını temsil eden deney metodları ile incelenmiş ve daha çok, malzemenin çeşitli özelliklerinin, bazı ortam şartlarının aşınma özeliğini ne yönde etkilediği araştırılmıştır.

Ancak, genelde, metallerde çeşitli aşınma tipleri için geliştirilen teorilerin ve aşınmayı belirleyen kanunların bazı yaklaşıklıklarla taş yapıları cisimlerin aşınmasını açıklamada kullanılabileceğini söylemek pek yanlış olmayacaktır.

II.2.2. Aşınma Çeşitleri:

Birbirine değen yüzeylere uygulanan normal kuvvetin şiddetine bağlı olarak aşınma hafif ve şiddetli olarak ikiye ayrılabilir. Hafif aşınmada yüzey pürüzlülükleri zamanla azalır ve aşınma partikülleri küçük boyuttadır. Şiddetli aşınmada ise pürüzlülükler daha da büyüterek iri aşınma parçaları oluşur (5).

Genelde aşınma aşağıdaki dört ana grupta sınıflandırılmakta, ayrıca sürtme oksidasyonu, erozyon ve kavitasyon gibi aşınma çeşitleri de mevcut bulunmaktadır (6).

II.2.2.1 Adezif Aşınma:

Adezif aşınma teorisi sürtünmeyi izah eden adezyon teorisi ile yakından ilişkilidir. Cisimlerin yüzeylerinde varlıkları tamamen yok edilemeyen pürüzlülükler değme halinde geldiklerinde oluşan yüksek basınçlar bu noktalarda kaynamaya neden olurlar. Bağlı hareket sonucu ayrılma daha zayıf olan yüzeyin içinde oluşmakta ve böylece bir yüzeyden diğerine malzeme transfer edilmektedir. Bu olayın kayma esnasında sürekli tekrarlanması sonucu transfer edilen parçacıklar koparak malzeme kaybını oluşturmurlar (5).

Archard (9) adezyona uğrayan değme noktalarında yarı küresel aşınma parçacıklarının oluştuğunu varsayan bir model geliştirerek aşınan malzeme hacmini şu şekilde vermiştir.

$$V = Z \left(\frac{P \cdot S}{3 \cdot H} \right) \quad (II.6)$$

Aşınma hacmi V , uygulanan kuvvet P ve kayma mesafesi S ile doğru orantılı, yüzey sertliği H ile ters orantılıdır. Her değme noktasında, bağlı hareket sonucunda, bir yüzeyden diğerine malzeme transferi veya serbest aşınma parçacığı oluşmayabilir. (II.6) bağıntısındaki Z katsayısı aşınmaya iştirak eden değme noktası oranını belirtmektedir.

Suh tarafından geliştirilen delaminasyon teorisi, düşük hızlarda birbiri üzerinde kayan metallerde serbest aşın-

ma partiküllerinin oluşumu, boyut ve dağılımı konusunda daha yeterli bilgi vermektedir (7). Sürtünen yüzeylerde oluşan kayma gerilmeleri, yüzeydeki malzemenin plastik deformasyona uğramasına ve yüzey altında boşlukların ve çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Plastik deformasyonların artmasıyla mikroçatlaklar büyümekte ve serbest aşınma moleküllerinin oluşumuna neden olmaktadır.

II.2.2.2. Abrazif Aşınma

Sert bir cismin yumuşak bir cismi kazıma suretiyle tahrip etmesi bu tip aşınmayı oluşturur. Abrazif aşınma iki şekilde oluşabilir. Birincisinde, sürtünen yüzeylerden biri diğerine nazaran daha sert ise, sert pürüzlülükler yumuşak malzemeyi kazıyarak aşındırırlar. İkincisinde ise, sürtünen yüzeyler arasına dışarıdan giren veya adezif aşınma sonucu kopan sert abrazif parçacıklar her iki yüzeyi de kazıyarak aşınmaya neden olurlar.

Yüzey sertliğinin önemli bir faktör olduğu abrazif aşınmada, Khruschov ve Babichev saf metaller için

$$h = \kappa \frac{q_a \cdot S}{H} \quad (II.7)$$

şeklinde bir ifade vermişlerdir (8). Burada h aşınan tabaka derinliği, q_a nominal yüzey basıncı, S kayma mesafesi, H yüzey sertliği olup, κ aşınma katsayısıdır. Isıl işlem görmüş metallerde ise (II.7) bağıntısı değişik şekil alır.

II.2.2.3. Koroziyel Aşınma

Metallerin sürtünen yüzeyleri havadaki oksijen ile kimyasal reaksiyona girip korozyona uğrarlar. Bunların yüzeylerinde oksit tabakaları oluşur. Bu oluşan oksit tabakası sert ve gevrek ise, kaymanın etkisiyle parçalanıp dökülerek abrazyona neden olur. Temiz kalan yüzeyler tekrar korozyona uğrarlar. Bu olayın sürekli tekrarlanması koroziyel aşınmayı oluşturur. Diğer taraftan, oksit tabakasının yumu-

şak ve sünek olması halinde, bu yağlayıcı etki yapar ve kayma durumunda aşınma hızını yavaşlatır (6,7).

II.2.2.4. Yorulma Aşınması

Yuvarlanma hareketinin olduğu durumlarda, tekrarlı yüklemeler altında yüzeydeki malzemenin yorulması sonucu bu tip aşınma oluşur. Yüzeyin altında maksimum kayma gerilmesinin olduğu noktada yorulma nedeniyle çatlaklar meydana gelir. Tekrarlı yüklemelerde malzemenin sürekli mukavemet sınırı geçilirse, bu çatlaklar büyüyerek, yüzeyden pullanma şeklinde parçalar kopar ve yüzeyde çukurcuklar oluşur. Bazı hallerde çatlakların yüzeyden başladığı ve yağlayıcı maddenin çukur teşekkülünde önemli rol oynadığı ileri sürülmektedir (6).

Bilhassa demiryol raylarında ve karayollarında karşılaşılan kaymalı yuvarlanma halinde, birbirine değen cisimlerin yüzeylerinde ondülasyonlar oluşabilmektedir. Onaran (10) bazı çelik ve alüminyum alaşımlarının kaymalı yuvarlanma halinde sürtünme ve aşınmasını incelemiş; kayma oranının aşınma hızını ve ondülasyon oluşumunu etkileyen önemli bir faktör olduğunu gözlemiştir.

II.2.2.5. Diğer Aşınma Türleri

Adezif ve korozyon aşınmanın aynı anda bulunduğu ve küçük teğetsel titreşimlerin mevcut olduğu durumlarda sürtme oksidasyonu denilen aşınma oluşur. Bu durumda daha sonra abrazyon aşınma da görülebilir (6).

Sert ve keskin katı parçacıkların yüzeye çarparak abrazyon aşınmaya benzer etki göstermesi sonucunda, malzemenin bilhassa matris fazında kayıplara yolaçan erozyon aşınması meydana gelir. Suyu sürüklenen katı parçacıklar da yüzeyde buna benzer etki yaparlar.

Ayrıca hareketli sularda oluşan kavitasyon olayı da aşınmaya neden olabilmektedir (7). Henry yasasına göre bir sıvıda erimiş gazın ağırlığı, erimemiş gazın sıvı üzerine

yaptığı basınçla artmaktadır. Bu nedenle tabii sular da daima bir miktar hava bulunmaktadır. Hareketli su kütlesinin herhangi bir noktasındaki mutlak basınç atmosfer basıncından aşağıya düşünce, sudaki erimiş havanın bir kısmı serbest kalır. Bu hava habbecikleri yüksek basınçlı bölgeye ulaşınca tekrar suda erirler. Bu boşluklara sıvının hücum etmesiyle oluşan çarpışmalar bazen çok yüksek yerel basınçlara neden olabilirler. Bu olayın yüksek frekansla tekrarlanması su ile temasta bulunan katı cismin tekrarlı basınç ve çekme gerilmelerine maruz kalmasına ve yüzeyden parçaların kopmasına neden olmaktadır.

II.2.3. Aşınmaya Etkiyen Faktörler

Başlangıçta tesbit edilebilen hız, yük, malzemenin bileşimi ve özellikleri, değme yüzeyleri arasındaki mevcut maddeler (yağlar, abrazif tozlar, vs.) ile yüzeylerin kimyasal ve fiziksel etkileşimi aşınma sonuçlarını geniş biçimde etkilerler. Kısmen dışarıdan değiştirilebilen, kısmen de deney sırasında ortaya çıkan sıcaklık, değme yüzeylerinin sertliği, yüzeyler arasındaki sıvı filminin ve çevrenin kimyasal etkileri de aşınmayı etkileyen diğer faktörlerdir.

II.2.4. Aşınma Özeliğinin Ölçülmesi

Aşınma etkisine maruz kalan malzeme çiftlerinde aşınma miktarı, sürtünen parçaların ağırlık veya boyutlarındaki kayıpların ölçülmesi ile veya yüzeyin optik olarak incelenmesi ile hesaplanabilir. Son zamanlarda kullanılan radyoaktif metod metallerde aşınma özeliğinin ölçülmesinde oldukça hassas sonuçlar vermektedir (6).

II.2.5. Metal Olmayan Cisimlerde Aşınma

Metal olmayan malzemeler geniş bir değişkenlik göstermelerine rağmen, aşınma mekanizmaları bazı istisnai durumlar dışında yaklaşıklıkla metallerdeki aşınma kanunları ile izah edilebilmektedir (5).

Adezif ve abrazif aşınma türleri sert elastik, kris-

talli cisimlerde görülmekte, aşınma hızı kayma hızına önemli ölçüde bağlı olmaktadır. Genellikle yüzey tabakalarının kazınması veya mekanik kırılması aşınmaya neden olmakla birlikte, bilhassa elmasta, yüzeyin yüksek sıcaklıklarda karbonizasyonu sonucu abrazyon aşınması oluşur (5).

Polimerlerin aşınması genellikle metallerdeki benzerlikte ve adezyon teorisi ile izah edilmektedir. Ancak, bazı durumlarda kazıma etkisi önemli yer tutmaktadır. Yüksek hız ve sıcaklıklarda yüzeyin erimesi görülürken, termoset plastiklerde termo-oksidasyon olayı görülmektedir (7). Genellikle metaller için verilen (II.6) tipi bağıntılar polimerlerin aşınmasını karakterize etmekte geçerli kabul edilir.

Taş yapıllı cisimlerde ve betonda, genellikle yüzeyde kazıma etkisiyle abrazyon aşınması, tekrarlı yükleme veya darbe durumlarında ise, bilhassa çekme/basınç mukavemetleri oranı 0,3'den küçük olan malzemelerde, yüzeyde gevrek kırılma dolayısı ile aşınma oluşmaktadır (6). Erozyon ve kavitasyon aşınması da, bilhassa hidrolik beton elemanlarda, önemli boyutlara varmaktadır. Betonların aşınması üzerine yapılmış araştırmaların özeti aşağıda bölüm II.3'de ayrıca verilecektir.

II.2.6 Aşınmada Malzeme Ömrü

Aşınma malzeme yüzeyinde zamanla tahribatta bulunarak, elemanın faydalı ömrünü azaltmaktadır. Sonuçta, ya elemanın değiştirilmesi gerekmekte, ya da büyük tamir masrafları ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı aşınmada önemli olan problemlerden biri de, elemanın fonksiyonlarını belirli bir sınırın altına düşürmeyecek şekilde müsaade edilebilecek aşınma miktarının belirlenmesi ve buna karşılık gelen ömrün tayin edilmesidir.

Buckingham kaymalı yuvarlanma halinde malzeme ömrü için

$$t \cdot P^3 = c \quad (II.8)$$

şeklinde bir bağıntı vermiştir (4). Burada t malzeme ömrü,

P yük, c malzeme sabitidir. Akkurt(11) aşınmanın istatistiksel karakterini göz önüne alarak, belirli bir güvenlik derecesi için malzeme ömrünün ne şekilde hesaplanabileceğini göstermiştir.

II.3. Beton, Tabii Taşlar ve Çeşitli Döşeme Malzemelerinin Aşınması

II.3.1. Genel

Aşınma genellikle yavaş seyreden bir yıpranma olayı olduğu halde, zemin kaplamalarının ömrüne etkiyen önemli faktörlerden birisidir. Kaplamanın üzerinde oluşan sürtünme kuvvetleri yüzeyden parçalar kopararak aşınmaya neden olurken, kum, toz, vb. yabancı maddeler bu olayda şiddeti arttıran etken olurlar. Gerek aşınma olayının karmaşıklığı, gerekse yüzeysel aşınmayı oluşturan mekanik etkenlerin çok çeşitli olması nedeniyle, her türlü şartlarda zemin kaplamalarının aşınmasını ölçebilecek tek bir deney metodu geliştirilememiştir (12, 13, 14).

Bu durumda, kaplama malzemesinin cinsini, kullanım amacını, maruz kalacağı aşınma şartlarını göz önüne alarak uygulamadaki durumu en iyi temsil edebilecek deney metodunu seçmek en sağlıklı sonuçları verecektir. Aşağıda bu aşınma şartlarını ele alalım :

II.3.2 Betonda Yüzeysel Aşınma

Prior (12) betonun aşınmasını dört grupta toplamıştır.

- 1-) Beton döşemelerde yaya veya hafif araç trafiği, cisimlerin kayma, kazıma, frenleme olayından oluşan aşınma,
- 2-) Beton yollarda hafif veya ağır araçların zincirsiz veya zincirli lastiklerinin yarattığı aşınma,
- 3-) Baraj, dolu savak, su tüneli, köprü ayağı gibi su yapılarının betonlarında su ile taşınan aşındırıcı parçacıkların yarattığı aşınma,

- 4-) Baraj, dolu savak, su tüneli ve diğer su taşıyıcı sistemlerde, sudaki kavitasyon olayının oluşturduğu aşınma.

Çeşitli beton yapılarda aşınmanın yukardaki gibi sınıflanması, Bölüm II.2 de metaller için genel olarak tariflenen aşınma türlerine uymaktadır.

Sert cisimler beton yüzeyini kazıyarak abrazif aşınmaya neden oldukları gibi, beton yüzeylerinde bulunan kum, toz ve yüzeyden kopmuş sert parçacıklar abrazif etkiyi arttırmaktadırlar. Havalı lastik tekerlekler vakum etkisiyle adezyon (yapışma) sonucu çimento hamuru ile aderansı zayıf olan daneleri yüzeyden koparmakta, bir çeşit adezyon aşınmasına neden olmaktadır. Diğer taraftan ağır araçların tekerleklerinin yuvarlanma hareketi, beton döşemelerde yorulma aşınmasına neden olabilmektedir. Su yapılarında, su ile taşınan sert parçacıklar abrazif aşınmaya, kavitasyon olayı da darbe ve yorulma etkisiyle beton yüzeyinden parçalar kopmasına neden olabilmektedir.

II.3.3. Betonun Aşınması Üzerine Yapılmış Çalışmalar

Bina ve endüstri yapılarının döşemelerinde, metro ve tren istasyonlarında, geçit ve merdivenlerde, yollarda, hava alanı pist ve apronlarında ve çeşitli su yapılarında kullanılan betonların aşınma özellikleri bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir.

a'Court (15) sürtünen yüzeyler arasında aşındırıcı olarak silisli kum bulunması halinde beton kalitesinin aşınma direncine etkisini araştırmıştır. Sawyer (16) yuvarlanma ve kayma sürtünmesinin yaratacağı aşınmayı simüle eden standart Alman (Ebener) aşınma aletini kullanarak çimento cinsinin, dozajın, su/çimento oranının ve bakım şartlarının beton yüzeyinin aşınmasına etkilerini incelemiştir. Plassmann (17) ve Fentress (18) de araştırmalarında aynı aşınma yöntemini kullanmışlardır. Plassmann sert beton yüzeylerinin aşınmasını incelerken, Fentress değişik yüzey bitirme yöntemlerinin ve özel yüzey kaplama malzemelerinin etkinliğini araştırmıştır. Smith (19) üç değişik aşınma deney yöntemini kullanarak agrega kalitesinin betonun aşınmasına etkisini araş-

tırmıştır. Witte ve Backstrom (20) kum püskürtme yöntemiyle hava sürüklenmiş betonlarda aşınma özelliğini incelerken, Burnett ve Spindler (21) aynı yöntemle kür kaplama malzemelerinin uygulanma zamanının betonda yüzeysel aşınmaya etkisini araştırmışlardır.

Li (22) ve Eckert (23) fabrika döşemelerinde, yol ve hava alanı pistlerinde betonun şiddetli aşınma şartlarına dayanıklılığı üzerine malzeme, üretim ve kür yöntemleri ile işçilik gibi faktörlerin etkilerini tartışmışlardır. Grün (14) yol ve hava alanı pistlerinin plânlanmasında beton kaplamasının kalınlığı ile ilgili bazı öneriler getirmiştir. ACI araştırma komitelerinin raporlarında (24,25) döşeme ve yol betonlarının aşınmaya dayanıklılığı etraflıca araştırılmış, beton köprü ve yollarda kayganlığa karşı direncin artırılması için yüzeyin pürüzlendirilmesi ve aşınmanın azaltılması gereği vurgulanmıştır. Dahir (26) aşındırıcı dişli tekerlekler kullanarak yaptığı deneylerde, plastik halde yağmur etkisine maruz kalmış betonların aşınma dirençlerini incelemiştir.

ACI araştırma komitesinin raporunda (27), su yapılarındaki betonların kavitasyon ve abrazyon aşınması incelenmiş, aşınmaya dayanıklı beton üretimi için öneriler verilmiştir. Price ve Wallace (28) betonların kavitasyon aşınmasına dayanıklılığını incelemişler ve deneylerinde çeşitli koruyucu kaplama malzemelerinin etkinliklerini araştırmışlardır. Liu (29) suda sürüklenen aşındırıcı parçacıkların betonun aşınmasına olan etkisini, geliştirdiği deney yöntemiyle incelemiş, beton kalitesinin ve çeşitli yüzey kaplamalarının etkinliğini araştırmıştır. Houghton, Borge ve Paxton (30) büyük boyutta döşeme numuneleri üzerinde, Detroit Barajının deney olanaklarını kullanarak yaptıkları deneylerde, konvansiyonel, ince tellerle donatılı ve polimer emprenye edilmiş betonların kavitasyon aşınmasına dayanıklılıklarını araştırmışlardır.

II.3.4. Betonda Aşınmaya Etkiyen Faktörler

II.3.4.1. Çimento Özelliklerinin ve Dozajın Etkisi

Çimento türü ve çimento dozajının aşınmaya etkisi bakımından yapılmış araştırmalar norm mukavemeti yüksek olan çimentoların aşınma dirençlerinin de yüksek olduğunu göstermiştir (31). Postacıoğlu (32) 100'e yakın çimento numunesi üzerinde yaptığı deneylerde çimentonun inceliğinin ve basınç mukavemetinin artmasıyla harç numunelerinin aşınma miktarlarının azaldığını; priz süreleri ve Le Chatelier iğnelerinin açılma miktarıyla aşınma arasında bir korelasyon olmadığını gözlemiştir. Sawyer (16) betonda çimento miktarının artmasıyla aşınmanın azaldığını söylemektedir. Ancak, dozajın yüksek değerlere çıkmasıyla aşınmadaki azalma önemini kaybetmektedir (31,33). Aydemir (33) aşınma bakımından betonda optimum çimento miktarının 400 kg/m^3 olduğunu söylemektedir.

Polimer çimentosu ve polimer uçucu kül ile yapılan betonda, kayganlık biraz artmasına rağmen aşınmaya dayanıklılık önemli ölçüde artmaktadır (25). Çimentoya % 30 oranında uçucu kül ikamesi de asit ortamda betonda korozyon aşınmasına dayanıklılığı bir miktar arttırmaktadır (27).

II.3.4.2. Agreganın Özelliklerinin ve Granülometrinin Etkisi

İnce ve iri agreganın cinsi, petrografik özellikleri, dane şekli ve boyutu ile betonda kullanılan agrega karışımının granülometrisi aşınmayı etkileyen en önemli faktörlerin başında gelmektedir.

Sertlik, agregaların aşınmaya karşı direncini göstermektedir. Doğal taşların Dorry aletinde elde edilen sertlik değerleri, bu taşlardan elde edilen agregalarla yapılan betonların aşınmasının göstergesi olabilmektedir (34). Deval ve Los Angeles yöntemleriyle doğrudan agregalar üzerinde aşınma deneyleri yapılabilmektedir. Smith (19) ve Liu (29)'nun deneyleri iri agreganın sertliği ile betonun aşınması arasında kuvvetli bir korelasyon bulunduğunu, diğer taraftan agregaların Los Angeles aşınma değerleriyle, bu agregalardan

yapılan betonların aşınması arasında herhangi bir ilişki olmadığını göstermiştir. Yine, agregaların sodyum sülfat eriyiği içinde çözünme miktarıyla betonun aşınması arasında ilişki görülmemiştir (19).

Betonun aşınmaya dayanıklılığının yüksek olması için, ince agreganın temiz ve sert silisli kum veya ince kırmataşdan, iri agreganın ise bazalt, sert diyabaz, granit, kuvars ve çert gibi sert taşlardan elde edilmiş olması gerekir. Liu (29) kalker kırmataşlı betonların, iri agregası çert olan betonlara kıyasla iki misli fazla aşındığını gözlemiştir. Smith (19) de deneylerinde benzer sonuçlar bulmuş, ancak agregaların kırılma karakteristiklerinin ve uygulanan aşınma deney yönteminin sonuçları etkileyebileceğini söylemiştir. Smith'e göre, kum püskürtme yöntemiyle yapılan aşınma deneylerinde, yumuşak kalker agregası darbe etkisini söndürüp daha az aşınırken, sert agregalar yarılıp, yontulmakta ve daha fazla aşınmaktadırlar. Düşük mukavemetli betonlarda daha sert agrega kullanmak aşınmayı önemli derecede azaltırken, yüksek mukavemetli betonlarda bu etki belirginliğini yitirmektedir (25). Kavitasyon aşınmasında ise, iri agrega ile harç arasındaki aderans agreganın sertliğinden daha önemli olmaktadır (27).

Demir kırpıntıları, çelik tozu, karborandum gibi metal agregalar betonda aşınmaya dayanıklılığı önemli ölçüde arttırmaktadır (27,35). Scripture, Benedict ve Bryant (36) yumuşak demir kırpıntılar ile yapılan betonun sert ve gevrek agregalarla yapılan betona oranla dört kat fazla aşınma direncine sahip olduğunu söylemektedirler.

Betonda iyi bir granülometrik bileşim aşınmanın azalmasına neden olmaktadır. a'Court (15) iyi ve kötü granülometrilili harç ve betonlarla yaptığı deneylerde, granülometrinin etkisinin harç numunelerinin aşınmasında daha belirgin olduğunu söylemektedir. Smith (19) agrega karışımındaki kum oranının artmasıyla aşınmanın da arttığını gözlemiştir. Diğer taraftan kumdaki ince daneler miktarının biraz artırılması, terleme sonucu yüzeyde zayıf tabaka oluşmasını önlemek açısından tavsiye edilmektedir (37). Kayganlığı önlemek açısından köşeli ve toplu şekilli agregalar, yuvarlak daneli olanlara tercih edilmektedir.

Çoğu hafif agregalar sert volkanik minerallerden oluşmasına rağmen, çok boşluklu yapıları nedeniyle yük ve darbe etkisine dayanıklılıkları azdır. Bu nedenle hafif agregalarla yapılan hafif betonların şiddetli aşınma şartlarına dayanıklılıkları azdır. Ancak, hafif aşınma şartlarında, bazı önlemler de alarak, hafif agregalı beton döşemeler kullanılabilir (38).

II.3.4.3. Su/Çimento Oranının ve Basınç Mukavemetinin Etkisi

Aşınma direncinin yüksek olması açısından, beton mümkün olan en kuru kıvamda üretilmelidir (22). Diğer taraftan çok kuru betonlarda yüzeyin düzeltilmesi işlemleri zorlaşmakta ve bu konuda hatalı operasyonlar yüzeyde su/çimento oranı yüksek, aşınmaya dayanıksız bir tabaka oluşmasına neden olabilmektedir (16). Ancak şu bir gerçektir ki, su/çimento oranının azalmasıyla, betonun aşınması azalmaktadır. Liu (29) kalker kırmataşlı betonlarda yaptığı deneylerde, su/çimento oranının 0,72 den 0,40 a düşürülmesiyle, aşınma direncinin % 43 arttığını gözlemiştir. Witte ve Backstrom (20) hava sürüklenmiş betonlarda yaptıkları deneylerde, su/çimento oranı ile su, çimento ve hava miktarı ne olursa olsun, betonda aşınmaya dayanıklılığın (su+hava boşluğu) / çimento oranıyla ters orantılı olduğunu söylemektedirler.

Basınç mukavemeti betonun aşınmaya dayanıklılığını kontrol eden en önemli faktörlerdendir. Basınç mukavemeti arttıkça aşınma direnci de artmaktadır (20,25,29,31,33,37). Ancak, Prior (12) a göre basınç mukavemetinin 45 N/mm^2 değerinden sonra bu artış durmaktadır. Betonun basınç mukavemeti ile aşınma direnci arasında kesin ve belirleyici bir bağıntı bulunmamakla birlikte, basınç mukavemeti 30 N/mm^2 veya eğilme-çekme mukavemeti 4 N/mm^2 olan betonların aşınmaya da iyi direnç göstereceği kabul edilmektedir (31). Sawyer (16) basınç mukavemeti ile aşınma arasındaki ilişkinin eğrisel olduğunu, ancak mukavemetin aşınmanın doğrudan bir ölçüsü olmaktan ziyade, değişiminin göstergesi olabileceğini söylemektedir. a'Court (15) tozlanma denilen yüzeydeki çimento hamurunun aşınması ile betonun basınç mukavemeti arasında bir ilişki bulunmadığını ileri sürmektedir.

Aydemir (33) basınç mukavemeti ile aşınma arasında

$$Y = \frac{140 - R}{2 R} + 0,2 \quad (II.9)$$

şeklinde bir ilişki bulmuştur. Burada Y ağırlıkça aşınma yüzdelerini ve R de kg/cm^2 cinsinden basınç mukavemetlerini göstermektedir.

II.3.4.4. Beton Kürü ve Bakım Şartlarının Etkisi

Sawyer (16) rutubetli bakım süresinin artmasıyla aşınma miktarının azaldığını ve iyi bir kürün, bilhassa düşük dozajlı betonlarda, daha önem kazandığını söylemektedir. Li (22) ye göre yeterli kür sayesinde çimentonun hidratasyonu efektif bir şekilde gelişmekte ve dolayısıyla mukavemet, aşınma direnci ve dayanıklılık artmaktadır. Burnett ve Spindler (21) priz tamamlanıncaya kadar yüzeyden buharlaşmanın aşınma açısından yararlı olduğunu, ancak rutubetli bakımın veya kür örtüsü uygulanmasının geciktirilmesi halinde aşınma direncinin azalacağını ileri sürmektedirler. 7 gün rutubetli bakım görmüş beton yüzeyinin aşınma direnci 3 gün rutubetli bakım görmüş beton yüzeyinin aşınma direncinin iki katıdır ve daha uzun süreli rutubetli bakım daha da iyi sonuçlar vermektedir (25). Soğuk havada beton dökümünde, bacasız ısıtıcılardan çıkan karbon dioksit gazı taze beton yüzeyinde prematür karbonatlaşmaya neden olmakta ve yüzey sertliğinin ve aşınma direncinin azalmasına neden olmaktadır (39).

II.3.4.5. Yüzey Bitirme İşlemlerinin Etkisi

Üretilen beton yüzeylerinin kalitesi, yüzey bitirme işlemlerinin zamanlaması ve işçilik derecesi tarafından belirlenmektedir. Yerine dökülen betonun sıkıştırılıp, mastarlanması sonra kaba ve ince perdahın uygun zamanlarda ve uygun şekilde yapılması şarttır. Bu konuda uyulması gereken en önemli kural, yüzeyde terleme suyu varken herhangi bir bitirme işlemi yapılmamasıdır. Terleme suyunun

giderilmesi için beton yüzeyine toz çimento serpmek ve düzeltme işlemleri sırasında yüzeyi ıslatmak da son derece sakıncalıdır. Bu kurallara uyulmaması durumunda, yüzeyde su/çimento oranı yüksek, zayıf ve aşınma direnci çok az olan, hatta kolaylıkla esas betondan ayrılabilen bir tabaka oluşması kaçınılmazdır. Fentress (18) bu kuralları kasten ihmal ederek ürettiği hatalı yüzeylerin aşınmalarının normal bir betona oranla çok fazla olduğunu göstermiştir. Beton yerine yerleştirilip, mastarlandıktan sonra makinayla düzeltme-sıkıştırma işlemi yapılır. Betonun terlemesi bitinceye kadar beklenir. Bu arada, bu süreyi kısaltmak ve döşeme yüzeyinin mukavemetini ve aşınma direncini arttırmak için vakum uygulaması yapılabilir (37). Daha sonra sırayla kaba ve ince perdah yapılır. Tahta veya magnezyum malalarla yapılan kaba perdah sonucu beton yüzeyi pürüzlüdür. Yeager (40) hava sürüklenmiş ve hafif betonda tahta yerine magnezyum mala kullanılmasını tavsiye etmektedir. Çelik mala ile tesviye yüzey pürüzlülüğünü yok edip düzgün ve sert bir yüzey elde etmeyi amaçlamaktadır. Fentress (18) tahta mala ile tesviye edilen yüzeylerin daha pürüzlü olduğunu ve aşınma dirençlerinin, çelik mala ile düzeltilmiş yüzeylere oranla daha düşük olduğunu söylemektedir. Yine Fentress, çelik mala ile tesviyenin aralıklarla bir kaç defa tekrarlanması-
nın aşınmaya dayanıklılığın artmasında olumlu katkı yaptığını göstermiştir. Diğer taraftan erken yaşlarda (2-7 gün) döşeme yüzeyi taşlanarak zayıf olabilecek en üst 1-2 mm kaldırılıp, aşınma direncinin arttırılabileceği belirtilmiştir (22,37).

II.3.4.6. Özel Yüzey Uygulamalarının Etkisi

Şiddetli aşınma şartlarına maruz beton döşemelerde, betonun terlemesi sona erdikten sonra yüzeye Portland çimentosu ile sert mineral veya metalik agregaların belirli oranlarda önceden hazırlanmış kuru karışımları üreticinin önerdiği şekilde serilip, gerekli yüzey işlemleri yapılmaktadır (37, 40). Ancak, kalsiyum klorür içeren betonlarda metalik agregalı kuru karışımlar kullanılmamalıdır. Suya doyurulmuş sert agregaların Tip I Portland çimentosu ile karışımının yüzeye özel yöntemler ile uygulanması da yine aşınmaya dayanıklı döşeme yapımı için kullanılabilmekte-

dir (40). Fentress (18) deneylerinde, kumlu kuru karışımların uygulandığı yüzeylerle, bir kaç defa çelik mala ile tesviye edilmiş yüzeylerin aşınmaya dayanıklılıklarının aynı olduğunu, metalik agregalı kuru karışımların daha yüksek aşınma dirençleri verdiğini görmüştür.

Yüzeydeki boşlukları doldurarak geçirimsizlik sağlayan ve tozlanmayı önleyen veya mekanik aşınma etkisini engelleyen veya azaltan yüzey kaplamaları da oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. Sentetik reçineler, bitümlü harç ve kaplamalar yüzeydeki boşlukları tıkararak aşınmaya dayanıklılığın artmasına etken olabilmektedirler (22). Liu (29) altı değişik yüzey uygulamasının etkinliğini araştırmış ve hepsinin konvansiyonel betona oranla daha az aşındıklarını görmüştür. Liu, poliüreten kaplamanın aşındırıcı bilyelerin darbe etkisini yastıkladığını ve en az aşınmaya maruz kaldığını, reçine ve akrilik harçların biraz daha fazla, demir agregalı yüzeylerin ise en fazla aşındığını gözlemiştir. Price ve Wallace (28) de deneylerinde kauçuk esaslı kaplamaların kavitasyon aşınmasına direnci önemli miktarda arttırdığını görmüşlerdir.

Diğer taraftan tozlanma veya hafif aşınma etkisine maruz kalmış servisdeki beton döşemeler ile kötü imal edilmiş betonların yüzeylerine sıvı sertleştiriciler uygulanarak aşınma dirençlerinin arttırılması sağlanabilmektedir (41). Yalnız, yukarıdaki ikinci durumda betonun en az 28 günlük olması gerekmektedir (25,37). Magnezyum veya çinko fluosilikatları ile sodyum silikat gibi kimyasal solüsyonlar, sıvı yüzey sertleştiricileri olarak kullanılmaktadırlar. Bunlar boşluklara nüfuz ederek kristalleşir ve yüzeyi geçirimsiz ve sert yaparlar. Bu konuda unutulmaması gereken en önemli nokta, bu yöntemin acil çare olduğu ve iyi yapılmış bir betonun aşınma direncini pek arttırmayacağıdır (25, 37,41).

II.3.4.7. Diğer Etkenler

Beton basınç mukavemeti beton yaşı ile arttığı gibi, aşınma direnci de beton yaşı ile artmaktadır. Genellikle genç betonlar daha fazla aşınmaktadırlar (31). Betonun ru-

tubeti de aşınmaya etki yapmaktadır. Sawyer (16) rutubetli durumda deneye tâbi tuttuğu numunelerin, rutubetli kürden sonra kurutulmuş numunelere oranla daha fazla aşındığını söylemektedir. Graf, Albercht ve Schafler (31) yaş betonların kuru betonlara kıyasla 1,4-2,7 kat fazla aşındığını söylemektedirler. Rodway (42)'e göre yüzeyde hava miktarının gereğinden fazla arttırılması aşınmaya dayanıklılığı azaltacaktır. Betonda hava miktarının % 3'den fazla olmaması istenmektedir (37). Witte ve Backstrom (20) hava sürüklenmiş betonda yaptıkları aşınma deneylerinde basınç mukavemetleri aynı olan hava sürüklenmiş ve normal betonların aşınma dirençlerinin pek farklı olmadığını söylemektedirler. Yeager (40) betonun aşınmaya dayanıklı olması için taze halde çökmesinin 10 cm'den fazla olmaması gerektiğini söylemektedir. Fentress (18) çökmesi 7,6 ile 10,1 cm arasında değişen betonlarda yaptığı deneylerde, çökmenin artışının aşınmaya etki etmediğini gözlemiştir.

II.3.5. Aşınmaya Dayanıklı Beton Üretimi

Yukarda özetlenen ve betonda aşınma direncini etkileyen tüm faktörler göz önünde tutularak aşınmaya dayanıklı beton üretimi için genel anlamda şu önerilerde bulunulmaktadır (25) :

1. *Yeterli mukavemet seviyesi:* Beton basınç mukavemeti 30 N/mm^2 değerinden aşağı düşmemelidir. Bunun için,
 - a) Maksimum su/çimento oranı 0,50 olmalıdır.
 - b) Agreganın iyi bir granülometrik bileşimi olmalı, maksimum dane çapı 25 mm olmalıdır.
 - c) Taze betonun çökmesi en fazla 7,5 cm olmalıdır.
 - d) Gerekli en düşük hava miktarı sağlanmalıdır.
2. *İki katlı döşeme uygulaması:* Şiddetli aşınma ortamında üst kaplama tabakası için minimum 35 N/mm^2 mukavemetli ve en büyük dane çapı 12 mm olan iyi bir beton kullanılmalıdır.
3. *Özel agregalar:* Sert ve sağlam iri agregalar kullanılmalıdır.

4. *Uygun yüzey düzeltme yöntemleri:* Yüzeydeki terleme suyu giderilmeden mala ile düzeltme yapılmamalıdır.
5. *Yüzeye vakum uygulanması:* Beton sertleştikten hemen sonra yüzeye vakum uygulayıp betondaki fazla su giderilmelidir.
6. *Özel kaplama uygulamaları:* Şiddetli aşınma durumlarında uygulanmalıdır.
7. *Uygun ve yeterli kür:* Rutubetli kür, yüzey düzeltme işlemleri bittikten hemen sonra başlamalı ve en az 7 gün sürmelidir. Su püskürtmek ve ıslak çuval ile örtmek gibi yöntemlerin yanında, kür malzemeleri de kullanılabilir.

Beton üretiminde uyulması gereken bu gibi kuralların yanı sıra beton yüzeyinde aşınmaya neden olan mekanik etkilerin de mümkün olduğu kadar giderilmesi önerilmektedir. Bilhassa su yapılarında projelendirme ve üretim sırasında alınacak bazı önlemlerle uniform bir akım sağlanıp, kaviteasyon etkileri azaltılabilir (27). Ticari veya endüstri yapılarının döşemelerinde derzlerin yapımında dikkat gösterilerek, tekerlekli arabaların darbe etkisi önlenabilir (37).

Aydemir (33) deneylerinden elde ettiği sonuçları değerlendirek aşınma mukavemeti iyi olan bir beton karışımının 400 dozlu, kum ve çakıl karışım oranları sırasıyla 0,4 ve 0,6, maksimum dane çapı 38 mm ve taze halde çökmesi 4 cm olması gerektiğini ileri sürmüştür. Grün (14) ise değişik aşınma şartlarına dayanıklı betonların bileşimleri hakkında daha detaylı önerilerde bulunmuştur. Tablo II.1'de Grün'ün önerdiği bazı bileşimler verilmektedir.

II.3.6. Betonda Aşınma Deneyleri ve Standartlar

Sawyer (16)'e göre herhangi bir aşınma deney metodu aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

- a) Deney numuneleri pratiktekilere benzer etkilere maruz kalmalıdır.

Tablo II.1- Çeşitli Aşınma Etkilerine Dayanıklı Beton Bileşimleri (Grün)

Beton Cinsi	Agregalar ve Granülometri	Bağlayıcı	Katkılar	Özel Uygulama
B 300 Sert Beton Yol İnşaatı İçin	Kuvars Unu 0-0,2 mm Z7 Sert Cüruf 0,2-3 mm Z12 Sert Cüruf 3-7 mm Z15 Sert Cüruf 7-30 mm Z12 Kuvars Kumu 0,2-1mm Z6 Kuvars Kumu 1-3 mm Z8 İnce Çakıl 3-7 mm Z8 Çakıl 7-50 mm Z12 Limonit 30-70 mm Z20	PÇ Z275 (280 kg/m ³) Su = 170 lt/m ³	-Akışkanlaştırıcı -Geciktirici -Dispersiyon Maddesi	-Sıkıştırma İşleminin Tekrarlanması -Folienle Örtmek -Siliko Fluat ile Fluatlama
Mezbaha, Büyük Mutfaklar ve Otomobil Yollarında Sert Beton	Kuvars Kumu 0-5 mm Z45 Silisyum Karpit 0-0,2 mm Z5 Silisyum Karpit 0,2-1 mm Z15 Silisyum Karpit 1-3 mm Z35	PÇ Z275 (800 kg/m ³) Su = 420 lt/m ³	-Yağ ile Temasta Genleşen Kil Tozu (120 kg/m ³) -Akışkanlaştırıcı -Su Tecrit Mad. -Jelleştirici Mad.	-Betonda Arzu Edilen Rengi Sağlamak Üzere 3-30 kg/m ³ Pigment
Hızlı Akan Su Etkisine Dayanıklı B 300 Beton	Kuvars Unu 0-0,2 mm Z6 Kuvars Kumu 0,2-1 mm Z18 Sert Cüruf 1-3 mm Z20 Sert Cüruf 3-7 mm Z16 İnce Bazalt Çakılı 7-15 mm Z20 Çakıl 15-30 mm Z20	YFÇ Z375 (330 kg/m ³) Su = 175 lt/m ³	-Akışkanlaştırıcı -Geciktirici -Tecrit Mad. -Dispersiyon Mad.	-

- b) Deneydeki aşınma her türlü betonda aşınma meydana getirecek şiddette olmalıdır.
- c) Deney yöntemi beton yüzeyindeki değişimlere hassas olmalıdır.
- d) Deney numunelerinin üretimi, saklanması ve test edilmesi kolay olmalıdır.
- e) Deney süresi ve maliyeti yüksek olmamalıdır.
- f) Deney sonuçları tekrarlanabilir olmalıdır.

Bu amaçla Avrupa ve Amerika kıtasında beton yüzeylerin aşınmaya dayanıklılıklarını test etmek amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Almanya'da en çok kullanılan Böhme deney aleti DIN 52108 normuyla betonun aşınması için kabul edilmiştir (13). Aynı yöntem TS 213 normuyla Türk standartlarına da girmiştir (43). Ebener tarafından geliştirilen deney aleti DIN 51951 standardı ile betonun aşınma deneylerinde kullanılmaktadır (16). Schuman ve Tucker doğrudan döşemeler üzerinde de deney yapmaya olanak sağlayan aletlerinde dönen disklerin yüzeye sürtünmesi ile aşınma etkisini yaratmışlar, daha sonra ise disklerin yerine dişli tekerlekler kullanılarak aynı alette değişiklik yapılmıştır (12). Yol betonlarından alınan numuneler üzerinde deney yapmaya olanak veren alet 24 adet kesici dişli tekerleğin aşındırıcı etkisini kullanmakta olup Amerika Birleşik Devletleri'nde (Corps of Engineers, procedure CRD-C52-54) geliştirilmiştir (26). Kum püskürtme yoluyla betonu aşındıran deney aleti ASTM C 418-64 T standardıyla betonda aşınma deneylerinde kullanılmaktadır (12).

II.3.7. Tabii Taş ve Diğer Döşeme Malzemelerinde Aşınma Deneyleri

Yol ve zemin kaplama malzemesi olarak kullanılan tabii taşların aşınması çok eskiden beri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu konuda ilk çalışmayı 1844 yılında Münih'te, Johann Bauschinger adlı araştırmacı o zamanlar yol kaplaması olarak kullanılan parke taşları üzerinde yapmıştır (12). Bauschinger'in deney yönteminde dönen çelik tabla üzerine bastırılan numuneler ara yüzeydeki silisli kumun etkisi ile aşınmakta olup, alet Dorry aşınma aletinin benzeridir. Daha

sonraları taşlar üzerinde Deval, Los Angeles ve Talbot-Jones tanburları ile yapılan aşınma deneyleri geliştirilmiştir. Deval aşınma aletinin benzeri Fransa'da taşların aşınmasını incelemelerde kullanılmaktadır. Böhme deney aleti tabii taşların aşınmasında da kullanılmaktadır. Yüzer (44) Türkiye yapı taşlarından bazılarını incelerken aşınma dirençlerini Böhme deney aleti ile araştırmıştır.

Zemin kaplaması olarak kullanılan ahşabın aşınma direnci kum püskürtme yöntemiyle (DIN C 3009), Sachsenberg'in 1929 yılında ve Kollmann'ın geliştirdiği aletlerle araştırılmaktadır. TS 659'da ahşap, linolyum ve bir takım organik esaslı zemin kaplama malzemelerinin aşınması hakkında gerekli bilgiler verilmektedir (45). Önerilen aletlerin başında Böhme diski ile yaya trafiğinin aşındırmasını simüle eden Stuttgart aşınma aleti gelmektedir. Ancak, ahşap gibi yumuşak malzemelerde aşındırıcı toz malzemenin içine batıp, onun aşınma direncini arttırabileceği için Böhme aleti yumuşak malzemelerin aşınma deneylerinde muntazam sonuçlar vermemektedir (13). Amerika Birleşik Devletleri'nde geliştirilen Taber aşınma deney aleti kullanılarak ahşap, linolyum, plastik maddeler, kösele, kauçuk, kâğıt, kumaş ve hatta bazı metallerin aşınmaya dayanıklılıklarını incelemek mümkündür (46).

Gavan (47) zemin kaplaması olarak kullanılan esnek malzemelerin aşınma dirençlerinin Armstrong aşınma aletiyle ölçülebileceğini göstermiştir. Bu deneyde, alüminyum taşıyıcı şerit üzerine yapıştırılmış numuneler ters yönde ve farklı hızla dönen şerit şeklinde zımpara kâğıdıyla belirli bir basınç altında sürtünmekte ve aşınmaktadırlar. Yine Gavan (48) halı ve linolyum türü döşeme kaplama malzemelerinin aşınma deneylerinin Taber veya Armstrong aletiyle yapılabileceğini, Schiefer'in geliştirdiği aletin tekstil ürünlerinde muntazam sonuçlar verdiğini söylemektedir. Bernett (49) ASTM C 627-70 standardındaki Robinson deney aletini kullanarak seramik döşeme malzemelerinin davranışını incelemiştir. Bernett gevrek zemin kaplamalarında iyi yapışma ve köşe direnci ile düzgün yerleştirmenin önemli olduğunu ileri sürmektedir. Roberts, Crouse ve Pizer (50) askeri uçaklarda kullanılan metali koruyucu organik kaplamaların aşınmaya dayanıklılığını araştırmışlardır. Yazarlar numuneler üzerine basınçla alüminyum

hidrat aşınma tozu püskürterek kaplamanın birim kalınlığının aşınması için geçen zamanı aşınma direnci olarak saptamışlardır.

II.4. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemelerin çeşitli özellikleri, fazların özellikleri ve hacim oranları cinsinden ifade edilebilmektedir. Beton da kompozit malzeme olarak ele alıp, çeşitli beton özelliklerini kompozit malzeme kurallarıyla belirlemeye yönelik çalışmalara literatürde oldukça fazla rastlanmaktadır. Bu araştırmaya başlarken betonda aşınma özeliğinin de kompozit malzeme kurallarıyla incelenebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle bu alt bölümde, kompozit malzemeler ve betonun çeşitli özelliklerine kompozit malzeme kurallarıyla yaklaşım konusunda yapılan yayın taramasının genel bir özeti verilmektedir.

II.4.1. Genel

Mevcut ve ayrı iki veya daha çok malzemeyi fiziksel olarak karıştırmak yolu ile elde edilen ve başlangıçtaki malzemelerden farklı ve daha iyi özelliklere sahip olan sisteme kompozit malzeme denilmektedir. Günümüzde aralarında betonun da bulunduğu kompozit malzemeleri üç ana grupta toplamak ve bileşim-özelik ilişkilerini özel kurallarla açıklamak mümkündür:

- a) Agregabağlayıcı kompozitleri
- b) Liflerle donatılı kompozitler
- c) Lamine kompozitler

Matris adı verilen sürekli faz içindeki dağınık fazın dane boyutuna, hacim yüzdesine ve dane şekline göre de kompozitler, dispersiyonla güçlendirilmiş, danelerle donatılmış ve liflerle donatılmış malzemeler olarak üç gruba ayrılmaktadırlar.

II.4.2. Danelerle Donatılmış Kompozitlerde Temel Bağıntılar

Kompozit malzemenin homogen ve izotrop bir matris fazı ile, bunun içinde dağılılı ikinci bir homogen ve izotrop fazın parçacıklarından oluştuğu kabul edilmektedir. Dağılılı faz konsantrasyonunun kompozitin her noktasında aynı değerde kaldığı ve dağınık faz ile matris fazı arasındaki arayüzde tam yapışma bulunduğu kabulü ile kompozit özelliklerini fazların özellikleri ve hacim konsantrasyonları cinsinden hesaplamak mümkündür. Einstein zayıf konsantrasyonlu bir süspansiyonun viskozitesini

$$C_c = C_m (1 + k \cdot V_p) \quad (II.10)$$

denklemini ile ifade etmiştir (51). Burada C_m matrisin, C_c kompozitin viskozitesini, V_p dağınık fazın hacim konsantrasyonunu ifade eder. k ise matris ve dağınık fazın E-modüllerine, dane boyut ve şekline bağlı boyutsuz bir katsayıdır. Dağınık faz konsantrasyonunun artması halinde, danelerin etkileşimini göz önüne alan

$$C_c = C_m (1 + k \cdot V_p + k_1 \cdot V_p^2 + k_2 \cdot V_p^3 + \dots) \quad (II.11)$$

şeklinde daha yüksek mertebeden ampirik bağıntılar kullanılmıştır.

Kompozit özelliklerini hesaplamada diğer bir yöntem de bazı basit iç yapı modellerini kullanmaktır (51). Bu amaçla uygulanan iç yapı modelleri Şekil II.3'de görülmektedir. Şekil II.3 a'da görülen paralel fazlı veya eş şekil değiştirmeli model için

$$K_c = V_m K_m + V_p K_p \quad (II.12)$$

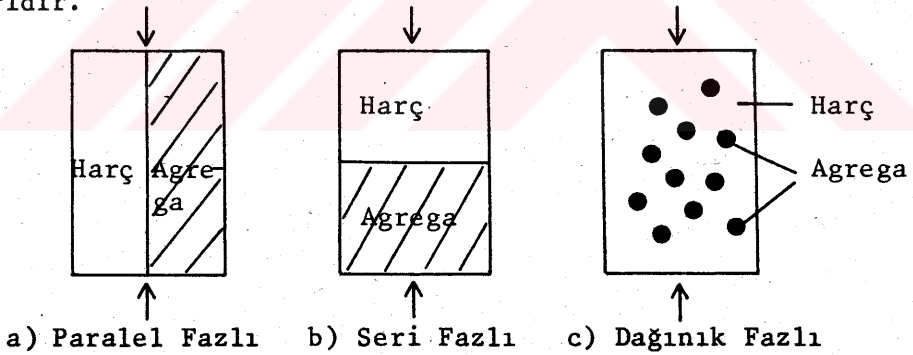
bağıntısı yazılabilir. Şekil II.3 b'de görülen seri fazlı veya eş gerilmeli model için de

$$\frac{1}{K_c} = \frac{V_m}{K_m} + \frac{V_p}{K_p} \quad (\text{II.13})$$

bağıntısı geçerlidir. Şekil II.3 c'de gösterilen dağınık fazlı model için ise Maxwell tarafından

$$K_c = K_m \frac{1 + 2V_p \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2} \right)}{1 - V_p \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha + 2} \right)}, \quad \alpha = \frac{K_p}{K_m} \quad (\text{II.14})$$

denklemini çıkartılmıştır. Bu üç bağıntıda da K_c , K_m , K_p sırasıyla kompozitin, matrisin ve dağılı fazın özellikleri, V_m ve V_p ise matris ve dağılı fazın hacim konsantrasyonlarıdır.



Şekil II.3-Kompozitlerde Özellik-Konsantrasyon İlişkilerini Belirlemede Yararlanılan İç Yapı Modelleri (51)

Diğer taraftan (II.12) ve (II.13) denklemleri sırasıyla,

$$K_c = K_m (1 + k V_p) , \quad k = \frac{K_p}{K_m} - 1 \quad (II.15)$$

$$K_c = K_m (1 + k V_p) , \quad k = \frac{K_p - K_m}{(1 - V_p) K_p + K_m V_p} \quad (II.16)$$

şeklinde yazıldığında gerçekte birinci modelin süspansiyon teorisine iyi uyduğu, ikinci modelin ise iyi uymadığı görülür. Çünkü k sabitinin değeri V_p hacim konsantrasyonuna bağlıdır.

II.4.3. Kompozit Malzeme Kurallarının Betonun Bazı Özelliklerine Uygulanışı

Beton, heterogen ve çok fazlı bir malzeme olmasına rağmen, genellikle agreganın en büyük dane çapının boyutuna göre,

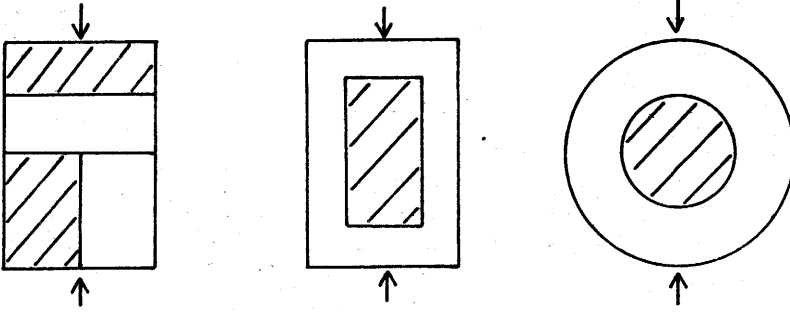
$$\text{Beton} = \text{Kaba Agregası} + \text{Harç}$$

veya

$$\text{Harç} = \text{İnce Agregası} + \text{Çimento Hamuru}$$

şeklinde iki fazlı bir kompozit olarak incelenmektedir. Bu amaçla Şekil II.3'de görülen modellerin yanı sıra daha başka geliştirilmiş iç yapı modelleri de kullanılmaktadır (Şekil II.4).

Hansen'e göre agreganın rijidliği, normal betonda olduğu gibi, harcın rijidliğinden fazla ise beton seri fazlı veya diğer bir deyişle ideal yumuşak malzeme gibi, eğer tersi bir durum -hafif agregalı betonlardaki gibi- mevcut ise beton paralel fazlı veya ideal sert malzeme olarak davranacaktır (51). Böylece Hansen'in betonun elastisite modülü



a) Hirsch Modeli b) Counto Modeli c) Hashin Modeli

Şekil II.4- Betonun kompozit malzeme olarak incelenmesinde kullanılan diğer iç yapı modelleri

için verdiği (II.17) denklemi bir üst sınır, (II.18) denklemi ise alt sınır teşkil etmektedir.

$$E = E_m V_m + E_p V_p \quad (\text{II.17})$$

$$\frac{1}{E} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_p}{E_p} \quad (\text{II.18})$$

Hansen normal betonu çok fazlı bir malzeme olarak düşünerek betonun elastisite modülünü, bileşenlerin E-modülleri ve hacim oranları cinsinden, aşağıdaki gibi vermiştir (52).

$$\frac{1}{E} = \frac{V_3 V_1}{V_5 E_5} + \frac{V_1 V_4}{E_4} + \frac{V_2}{E_2} \quad (\text{II.19})$$

Burada 1,2,3,4,5 endisleri ile sırasıyla çimento hamuru, agrega, jel+kılcal boşluklar, hidrate olmamış çimento ve çimento jeli ifade edilmektedir.

Hirsch (53) agrega-harç fazlarındaki gerilme dağılımlarından hareket ederek yeni bir model ileri sürdü. Dougill (54) bu yeni modelin seri ve paralel fazlı modellerin birleşimi olduğunu ve denkleminin (II.20)deki gibi düzenlene-

bileceğini gösterdi.

$$\frac{1}{E} = 0,5 \left(\frac{1}{\frac{V_m E_m}{V_m E_m + V_p E_p}} \right) + 0,5 \left(\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_p}{E_p} \right) \quad (\text{II.20})$$

Ancak, $E_p = 0$ olduğunda E 'nin de 0 olması bu denklemin aksayan yanıdır ve Counto Şekil II.4 b'deki modeli önererek (II.21) bağıntısını ileri sürmüştür (51)

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \sqrt{V_p}}{E_m} + \frac{1}{\left(\frac{1 - \sqrt{V_p}}{\sqrt{V_p}} \right) E_m + E_p} \quad (\text{II.21})$$

Hashin (55) Şekil II.4 c'de görülen küresel model ile Poisson oranının etkisini de incelemiştir. $v_c = v_m = v_p = 0,2$ alındığında Hashin denklemi

$$E = \left(\frac{V_m E_m + (1+V_p) E_p}{(1+V_p) E_m + V_m E_p} \right) \cdot E_m \quad (\text{II.22})$$

şeklını almaktadır.

Beton elastisite modülü (II.15) ve (II.16) da verilen süspansiyon teorisi tipinde ifadelerle de hesaplanabilir. Betonun Poisson oranı için de

$$v_c = v_m (1 - v_p)^n \quad (\text{II.23})$$

şeklinde bir bağıntı ileri sürülmüştür (51). Burada $n \approx 0,42$ ve $v_m \approx 0,22$ mertebesindedir.

Betonda viskozite modülünün (II.19) tipi bir denklemle ifade edilebileceği Hansen tarafından ileri sürülmüştür (52). Betonun visko-elastik davranışına Burger modeli ile yakla-

şılırsa, sünme şekil değiştirmesi için kompozit malzeme kurallarına uygun

$$\epsilon_{\text{sünme}} = \epsilon_{\text{sünme}_1} \cdot (1-v_2) \quad (\text{II.24})$$

bağıntısı çıkarılır. Burada 1 çimento hamuru, 2 agrega fazlarını göstermektedir. Neville deneysel yoldan

$$\epsilon_{\text{sünme}} = \epsilon_{\text{sünme}_1} \cdot (1-v_2)^n \quad (\text{II.25})$$

bağıntısını bulmuştur (51). Buradaki n katsayısı 1,7-2,1 arasındadır. Benzer şekilde rötire şekil değiştirmesi için de Pickett(II.26)bağıntısını vermiştir (51)

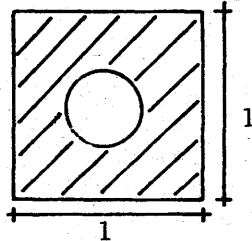
$$\epsilon_{\text{rötire}} = \epsilon_{\text{rötire}_1} \cdot (1-v_2)^n \quad (\text{II.26})$$

Burada silisli agrega için $n = 1,7$ değerini almaktadır. Süreksizlik sınırındaki şekil değiştirme için de Kaplan deneysel olarak

$$\epsilon_{\text{süreksizlik}} = \epsilon_{\text{süreksizlik}_1} \cdot (1-v_2)^n \quad (\text{II.27})$$

bağıntısını bulmuştur (51). Burada $n = 0,8 - 1,4$ arasındadır.

Betonun mekanik mukavemetine iç yapı modelleriyle yaklaşımda, basit model olarak Şekil II.5'de görülen Hansen'in içinde küresel boşluk bulunan küp şeklindeki modelinden söz edilebilir (56).



Şekil II.5- Betonun kırılma olayına yaklaşımda yararlanılan iç yapı modeli

Burada, boşluk hacim oranı v ve dolu kısmın mukavemeti R_d cinsinden basınç mukavemeti için

$$R = (1 - 1,2 v^{2/3}) \cdot R_d \quad (II.28)$$

sonucuna varılır. Wischer'in çimento hamurları üzerindeki deneyleri buna benzer

$$R = 31\ 000 (1 - v)^{2,7} \quad (II.29)$$

ampirik bağıntısını vermiştir (51).

II.5. Betonun Aşınmasıyla İlgili Çalışmaların Değerlendirilmesi ve Deneysel Araştırmanın Konusu

Bina döşemelerinde, yol ve havaalanı pistlerinde ve su yapılarındaki beton yüzeysel sürtünme kuvvetlerinin etkisiyle aşınmaktadırlar. Aşınma olayı beton elemanların kullanışsız hale gelmesine neden olduğu gibi, bazen de kesitlerin iyice küçülmesi sonucu statik açıdan da tehlikeli durumun ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

Betonda öncelikle yüzeydeki ince harç tabakası aşınmakta olup, bu tabakanın tamamen aşınmasıyla iri agregaya çıkmaktadır. Bu aşamadan sonra artık iri agregadananeleleriyle onları saran harçtan oluşan bir yüzeyin aşınması söz konusudur. İri agregaya ve harcın ayrı ayrı aşınma dirençleri ve betonu oluşturan bu iki bileşenin sürtünme kuvvetlerine maruz kalan yüzey oranları betonun aşınmasına etken olmaktadır.

Betonun aşınması genellikle belirli aşınma şartlarının simüle edildiği deney yöntemleriyle araştırılmaktadır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, çimento cinsi ve dozajı, agregaya cinsi, granülometrisi ve agreganın aşınmaya dayanıklılığı, betonun su/çimento oranı ve kür şartları ile yüzey düzeltme işlemlerinin ve özel yüzey kaplama malzemelerinin

beton aşınmasını ne şekilde etkilediği incelenmiştir. Ancak betonun çok fazlı yapısını göz önüne alarak, kompozit malzeme kurallarının ve iç yapı modellerinin beton aşınmasına uygulandığına dair yayınlarda henüz bir kayda rastlanmamıştır.

Bu çalışmada böyle bir yaklaşım amaçlanmıştır. Beton iki fazlı bir kompozit malzeme olarak ele alınıp, betonun aşınmasının harç ve iri agreg a fazlarının aşınmaları ve bu bileşenlerin hacim oranları cinsinden ifade edilmesine çalışılacaktır. Su/çimento oranı ve kum cinsi değiştirilerek harç fazının, iri agreganın cinsi değiştirilerek de iri agreg a fazının aşınma dirençlerinin değiştirilmesi amaçlanmıştır. Fazların aşınma dirençleri ve iri agreg a fazı hacim oranı değiştirilerek, betonun aşınmasındaki değişimler incelenenecektir.

Bu arada betonun su/çimento oranının ve kullanılan ince ve iri agreg a cinsinin aşınmaya olan etkileri incelenecek, betonun birim ağırlığı, basınç mukavemeti, eğilme-çekme mukavemeti, dinamik elastisite modülü ve Schmidt sertliği ile aşınma arasındaki ilişkiler araştırılacaktır. Aşınmanın zamanla değişimi incelenerek, betonun aşınma ömrüne su/çimento oranı, agreg a cinsi ve iri agreg a hacim oranı gibi faktörlerin etkileri araştırılacaktır.

Ayrıca iri agreg a hacim oranının değişiminin, betonun taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerine olan etkileri üzerinde de kısaca durulacaktır.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, çalışmanın deneysel kısmında kullanılan çimento ve agrega malzemeleri tanıtıldıktan sonra üretilen harç ve beton karışımları, deney numunelerinin şekil ve boyutları ile muhafaza şartları hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra deney aletleri ve deney yöntemleri açıklanacak ve deney sonuçları toplu halde verilecektir.

III.1. Kullanılan Malzemeler

III.1.1. Çimento

Bu araştırmada üretilen harç ve betonlarda Yunus (Anadolu) çimento fabrikasının ürettiği katkılı portland çimentosu kullanılmıştır. TS 24'e göre yapılan fiziksel ve mekanik deneylerle, Nuh Çimento fabrikasında yaptırılan kimyasal analiz sonuçları Tablo III.1'de verilmiştir.

III.1.2. Agregalar

Bu çalışmada, özellikleri ve petrografik bileşimleri farklı iki cins ince agrega ile üç cins iri agrega kullanıldı. İnce agrega olarak en büyük dane çapı 7 mm olan Karabiga kumu ile Fenerbahçe kumu, iri agrega olarak da 15-30 mm'lik elekler arasında kalan kalker ve granit kırmataşları ile Podima çakılı kullanılmıştır. Kullanılan agregaların İ.T.Ü. Maçka İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında ve Maden Fakültesi Mühendislik Jeolojisi Laboratuvarında yapılan deneyler sonucu elde edilen granülometrik ve fiziksel özellikleri ile petrografik bileşimleri Tablo III.2'de görülmektedir.

III.2. Beton Karışımları

III.2.1. Karışım Esasları

Bölüm I'de belirtildiği gibi bu çalışmada betonda iri agrega ve harç fazlarının hacim oranları değiştikçe, betonun yüzeysel aşınmasının ve bu arada diğer bazı özelliklerinin ne şekilde değiştiğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Konunun araştırılmasında harç ve iri agrega fazlarını daha belirgin olarak ayırabilmek için çalışmada süreksiz granülometrilili betonlar kullanılmıştır. Üretilen her seride harç fazının niteliği sabit tutulurken, iri agrega fazı hacim oranı sıfırdan itibaren arttırılmıştır. Üretilen betonların eldeki imkanlarla kalıplar içine iyice yerleştirilmesi, iri agrega fazı hacim oranının 0,40 değerinden sonra mümkün olamamıştır.

Harç fazının çimento, kum, su ve hava boşluğundan meydana geldiği kabul edilmiş ve iri agrega için ayrıca su eklenmemiştir. Her seride önce harç fazının bileşimi hesaplanmış ve üretilmiştir. Serinin diğer karışımlarında, kullanılacak iri agrega ağırlığı bu fazın 1 m³ betonda kaplayacağı hacim ile agrega özgül ağırlığı çarpılarak bulunurken, çimento, kum ve su miktarları başlangıçta hesaplanan harç bileşimindeki malzeme miktarlarının bu karışımdaki harç fazı hacim oranı ile çarpılması ile hesaplanmıştır.

Araştırmada kullanılan beton serileri şu şekilde özetlenebilir :

- a) Karabiga kumu ile üretilen, 0,35, 0,45, 0,50, 0,65 su/çimento oranlarında harç fazlarından 4 karışım.
- b) Karabiga kumu ve kalker kırmataşı ile üretilen betonlardan, 0,35 su/çimento oranında 2, 0,45 su/çimento oranında 5, 0,50 su/çimento oranında 5, ve 0,65 su/çimento oranında 5 karışım.
- c) Karabiga kumu ve Podima çakılıyla üretilen betonlardan, 0,35 su/çimento oranında 2, ve 0,50 su/çimento oranında 5 karışım.

- d) Karabiga kumu ve granit kırmataşı ile üretilen betonlardan, 0,35 su/çimento oranında 2, ve 0,50 su/çimento oranında 2 karışım.
- e) Fenerbahçe kumu ile üretilen 0,50 su/çimento oranında harç fazından 1 karışım.
- f) Fenerbahçe kumu ve kalker kırmataşı ile üretilen betonlardan 0,50 su/çimento oranında 2 karışım.

Böylece toplam 35 ayrı bileşime sahip harç ve beton karışımı üretilmiştir.

Su/çimento oranı 0,35 olan serilerin üretiminde harç ve betonların normal bir işlenebilmeye sahip olmasını sağlamak amacı ile Sikament süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Çimento ağırlığının % 1,5'u oranında kullanılan Sikament karışım suyuna katılmıştır.

III.2.2. Üretilen Serilerin Kodlanması

Üretilen betonların kodlanmasında şu yöntem uygulanmıştır. Önce karışımda kullanılan ince ve iri agreganın cinsi belirtilmiştir. Burada B ile Karabiga kumu, F ile Fenerbahçe kumu, K ile kalker kırmataşı, G ile granit kırmataşı ve Ç ile Podima çakılı gösterilmiştir. Daha sonra karışımın su/çimento oranı verilmiştir. Üçüncü olarak verilen rakam da karışımdaki iri agrega fazı hacim yüzdesini göstermektedir. Örneğin, Karabiga kumu ve kalker kırmataşı ile 0,50 su/çimento oranında ve % 30 iri agrega fazı içeren beton karışımı BK/0,50/30 olarak, bu seriye ait harç fazı karışımı da BK/0,50/0 olarak kodlandırılmıştır.

III.2.3. Elde Edilen Karışımların Bileşimleri

Bölüm III.2.1'de belirtilen harç ve beton karışımlarının bileşimleri Tablo III.3, III.4, III.5 ve III.6'da verilmiştir. Karışımlarda amaçlanan iri agrega fazı hacim oranları elde edilmiştir. Ancak harç fazı bileşimlerinde bir miktar değişme olmuştur. Karışımların harç fazlarının gerçek

miktarları hesaplanırken iri agregaların su emmeleri göz önüne alınmış ve hava boşluğunun tümünün harç fazında kaldığı kabul edilmiştir. Resim 1 ve 2 de 0,50 su/çimento oranında üretilen kalker kırmataşlı ve çakıllı betonların kesitleri görülmektedir.

III.2.4. Beton Üretimi, Numune Şekil ve Boyutları, Yerleştirme ve Kür Şartları

Bütün harç ve betonlar düşey eksenli, zorlamalı karıştırılmalı 50 litrelik betonyer ile karıştırılarak üretilmiştir. Önce karışımın katı maddeleri 1 dakika süreyle kuru olarak karıştırılmış, daha sonra karma suyu eklenerek 3 dakika daha karıştırılmıştır. Taze betonda kıvam ve birim ağırlık tayini yapıldıktan sonra 1 dakikalık karıştırma daha yapılmıştır.

Üretilen bütün harç ve beton numuneleri prizma şeklinde olup, boyutları 10x10x50 cm.dir. Su/çimento oranı 0,45, 0,50 , ve 0,65 olan kırmataşlı ve 0,50 su/çimento oranındaki çakıllı esas deney serilerinde her karışımdan üçer prizma üretilmiştir. 0,50 su/çimento oranında Fenerbahçe kumu ile ve yine 0,50 su/çimento oranında granit kırmataş ile üretilen ek deney serilerinde her karışımdan ikişer prizma üretilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinden de yararlanıldığı 0,35 su/çimento oranlı serilerde her karışımdan birer prizma numune üretilmiştir. Numuneler iki tabaka halinde şişlenerek doldurulmuş, daha sonra standart çimento deneylerinde kullanılan sarsma aletinde sıkıştırma yapılmıştır. Sarsma aletinde düşme sayısı, su/çimento oranı azaldıkça ve aynı seride iri agrega fazı hacim oranı arttıkça kademeli olarak arttırılmıştır.

Kalıplar doldurulduktan sonra numuneler 24 saat süreyle su havuzlarının bulunduğu odada tutulmuştur. Numuneler kalıplardan çıkarıldıktan sonra 7.ci güne kadar $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ deki su içinde tutulmuşlardır. Sudan çıkarılan numuneler 28.ci güne kadar rutubeti $\% 65 \pm \% 5$ ve sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan bir odada saklanmışlardır.

III.3. Deney Aletleri, Yöntemleri ve Deney Sonuçları

III.3.1. Taze Beton Deneyleri

Taze harç ve betonlarda birim ağırlık ve kıvam deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlığın saptanmasında 8 lt. lik ölçü kabı kullanılmıştır. İşlenebilme özeliği çökme (Abrams) konisi ve DIN 1048 sarsma tablası (Flow-table) ile ölçülmüştür. Üretilen harç ve betonların taze birim ağırlıkları, çökme ve yayılma miktarları Tablo III.7'de verilmektedir.

III.3.2. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Sertleşmiş beton deneyleri 28 günlük numuneler üzerinde yapılmıştır. Prizma şeklindeki numunelerin önce DAWE SCT4/TYPE 1821 A elektrodinamik malzeme deney aleti ile rezonans frekansları saptanmıştır. Bu deneyde iki ucu serbest olacak şekilde orta noktasından mesnetlenen numuneye boyuna titreşimler uygulanmaktadır. Değişken frekanslı bir osilatör vasıtasıyla üretilen titreşim bir amplifikatörde güçlendirilmekte ve elektromanyetik titreştirici uçla numuneye iletilmektedir. Numunenin diğer ucundan piezoelektrik kristal alıcı ile algılanan titreşim sinyal amplifikatörüne bağlı genlik göstergesinden gözlenmektedir. Maksimum genliği veren titreşim frekansı dijital bir frekansmetrede okunmakta ve bu değer numunenin rezonans frekansı olmaktadır. Bu rezonans frekansından itibaren numunenin dinamik elastisite modülü hesaplanmaktadır.

Daha sonra aynı prizma numuneleri üzerinde eğilme mukavemetleri tayin edilmiştir. Eğilme deneyleri 20 ton kapasiteli universal deney aleti ile yapılmıştır. 40 cm. aralıklı iki noktada serbest mesnetlenen numunelere açıklığın orta noktasından çizgisel yük uygulanmaktadır. Eğilme deneyinde ikiye ayrılan parçalardan biri 10x10 cm.lik plakalar arasında 200 ton kapasiteli basınç presinde kırılarak küp basınç mukavemeti bulunurken diğer parçanın düzgün yan yüzlerinde Schmidt beton çekici okumaları alınmıştır.

Prizmaların diğer parçalarından taş testeresi ile kesilen numuneler üzerinde aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneylerinde DIN 52108 standardındaki BÖHME aşınma aleti kullanılmıştır (Resim 3). Aşınma deneylerinde kullanılan numuneler 10x10x7 cm. boyutlarındadır. 0,35 su/çimento oranlı serilerde ise 10x10x10 cm. boyutlarında numuneler kullanılmıştır. Tüm deneylerde numunelerin aşındırılan alanı 10x10 cm. boyutlarındadır. DIN 52108 standardında ise aşınma alanının 50 cm² olduğu belirtilmiştir. Aşınma alanının iki kat artması nedeniyle deneylerde numuneye uygulanan düşey kuvvet 30 kg'dan 60 kg'a ve her aşınma periyodunda kullanılan aşındırıcı toz miktarı 20 gr'dan 40 gr'a çıkarılmıştır.

Deneyde önce 105 °C de kurutulmuş numunelerin birim ağırlıkları saptanmıştır. Sonra numunenin aşındırılacak kesitinin resmi şeffaf milimetrik kağıt üzerine çıkarılmıştır. İri agrega danelerinin üzerine düşen kareler sayılarak, kesitteki iri agrega yüzey alanı hesaplanmıştır. Bu değer toplam kesit alanına oranlanmasıyla numunenin aşındırılan kesitindeki iri agrega yüzey oranı (A_p) hesaplanmıştır. Daha sonra her numuneye toplam 440 devir aşınma uygulanmıştır. Her 22 devir sonunda numune düşey eksen etrafında 90° döndürülmüş ve aşındırıcı toz yenilenmiştir. Her 88 devir sonunda da numunenin yüksekliğindeki azalma 1/100 mm lik bir komparatörle ölçülmüştür (Resim 4). Bu şekilde toplam 91 numune üzerinde aşınma deneyi yapılmıştır. Sertleşmiş beton deney sonuçları Tablo III.8 , III.9 , III.10 ve III.11'de toplu olarak görülmektedir.

Bu arada kırmataş agregaların elde edildiği kalker ve granit taşlarından kesilen numuneler üzerinde de aynı deney yöntemiyle DIN 52108'e göre aşınma deneyleri yapılmıştır. Tablo III.12'de bu taşlar üzerinde yapılan deney sonuçları görülmektedir.

BÖLÜM IV

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Bu bölümde, çalışmanın deneysel sonuçları, literatür özetindeki çalışmaların ve kompozit malzeme kurallarının ışığında sertleşmiş betonun aşınma özeliği yönünden irdelenip, değerlendirilmiş ve bazı sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

IV.1. İri Agreg a Hacım Oranının Artmasının Betonun Abr azif Aşınmasına Etkisi

Şekil IV.1 - IV.9'da, araştırmamızdaki deney serilerinde aşınma derinliğinin aşınan yüzeydeki iri agreg a yüzey oranı ile değişimi görülmektedir.

Herhangi bir seride aynı iri agreg a hacım oranına sahip karışımlarda aşınma miktarının dağılma gösterdiği gözlenmiştir. Bazı durumlarda az olan bu dağılma, genellikle iri agreg a hacım oranının artmasıyla daha fazla olmaktadır. Halbuki aşınma deneylerinde numunelerin rutubet durumları, deney şartları ve harç ve iri agreg a fazlarının niteelikleri seri içinde büyük oranda sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Diğer taraftan deneylerde prizmalardan kesilen aşınma numunelerinin kesilmiş yüzeyleri aşındırılmaktadır. Hava boşluklarının tümünün harç fazı içinde kaldığını varsayarsak, aşınan kesitteki iri agreg a ve harç fazı yüzey alanlarının toplamı aşınan alana eşittir. Yani, A_m , harç fazı yüzey oranını, A_p ise iri agreg a fazı yüzey oranını gösterirse

$$A_m + A_p = 1 \quad (IV.1)$$

olmaktadır. Betonun heterogen yapısı, yerleştirme şartları ve harç fazının özellikleri göz önüne alındığında, A_p 'nin V_p 'ye bağlı olarak istatistiksel dağılım göstereceği muhakkaktır. Şekil IV.10'da karışımlardaki iri agreg a hacım oranıyla (V_p), aşınan kesitteki ölçülen iri agreg a yüzey ora-

nının (A_p) değişimi görülmektedir. A_p ile V_p arasındaki ilişki % 90 güven derecesi ile

$$A_p = V_p \pm 0,072 \quad (IV.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Aşınan kesitteki iri agregaya yüzey oranı, karışımdaki iri agregaya hacim oranını gayet iyi temsil etmektedir.

İşte bu nedenle, aynı V_p değerine sahip karışımlarda aşınma miktarının dağılmasının büyük oranda aşınan kesitteki iri agregaya yüzey oranının değişmesinden ileri geldiği ve ölçülen A_p değişkeninin kullanılmasının aşınma derinliğinin betondaki iri agregaya miktarıyla değişimini daha iyi yansıta-acağı düşünülmüştür.

Şekil IV.1-IV.9'da yatay eksenle iri agregaya yüzey oranının 0'dan 1'e kadar tüm değerleri alınmıştır. Gerçekte ise beton içinde iri agregaya miktarını arttırmanın bir sınırı olmalıdır ki bu da iri agreganın kompasitesidir. Deneylerimizde ise yerleştirme imkânlarının yetersizliği nedeniyle iri agregaya hacim oranının 0,40 değerinin üzerine çıkılamamıştır.

Ancak betonu iki fazlı bir kompozit malzeme gibi inceleyen modellerde, birim hacim elemanının sadece harç ve sadece iri agreganın elde edildiği taştan oluşan iki ekstrem durumu arasında değişimi incelenmektedir. Buna diğer bir neden de beton özelliklerinin harç ve taşın özellikleri cinsinden formüle edilebilmesi isteğidir.

Araştırmamızdaki tüm serilerde kompozitin aşınma derinliğinin, aşınan yüzeydeki iri agregaya oranıyla değişimini temsil etmek üzere paralel ve seri fazlı kompozit modeller ve süspansiyon teorisi tipindeki bağıntılar denenmiş ve sonuçta seri fazlı kompozit modellerin özelliklerinin hesaplanması için önerilen tipteki

$$\frac{1}{h} = \frac{A_m}{h_m} + \frac{A_p}{h_p} \quad (IV.3)$$

bağıntısının tüm serilerde deney sonuçlarına en iyi uyduğu görülmüştür. Bu formülasyonda h , karışımın (kompozitin) aşınma miktarı, h_m ve h_p sırasıyla harç ve iri agrega fazlarının aşınması, A_m ve A_p ise sırasıyla harç ve iri agrega fazlarının aşınan kesitteki yüzey oranlarını göstermektedir. Fazların aşınan kesitteki yüzey oranları yerine kompozit içindeki hacim oranları kullanılarak (IV.3) bağıntısı

$$\frac{1}{h} = \frac{V_m}{h_m} + \frac{V_p}{h_p} \quad (\text{IV.3a})$$

şeklinde de yazılabilir. Kompozitin aşınmasını (IV.3a) denkleminle hesaplamak daha önce belirttiğimiz nedenlerle büyük bir hata getirmeyecektir. Kaldı ki verilen bir beton karışımında kolayca hesaplanan değer iri agrega hacim oranı olduğundan (IV.3a) bağıntısı daha pratik bir anlam taşımaktadır.

(IV.3) bağıntısı, A_m yerine $(1-A_p)$ değeri konup, eşitliğin sol tarafında aşınma derinliği, h , kalacak şekilde düzenlenirse, aşağıdaki şekli almaktadır.

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_m} + \left(\frac{1}{h_p} - \frac{1}{h_m}\right) A_p} \quad (\text{IV.4})$$

Burada $1/h_m$ ve $1/h_p$ sırasıyla salt harç ve salt taşın aşınma miktarlarının tersi veya aşınma dirençleri olmaktadır.

Şekil IV.1-IV.9'da ki h aşınma derinlikleri, aşınan kesitteki iri agrega oranı (A_p) cinsinden (IV.4) tipindeki bağıntılarla verilmiştir. Sürekli çizgiyle % 50 olasılıklı bağıntı, kesikli çizgilerle ise % 90 güvenli alt ve üst sınır bağıntıları gösterilmiştir. (IV.4) bağıntısı aşınmanın iri agrega yüzey oranı ile değişimini gayet iyi temsil ederken, herhangi bir (A_p) değerinde kompozitin aşınmasının % 90 güvenle hangi değerler arasında olabileceğini kestirmek mümkündür.

Şekil IV.1 -IV.9'un incelenmesinden görüleceği üzere taşın aşınması ile harcın aşınması arasındaki fark büyük iken, kompozitin aşınması iri agrega miktarındaki değişimlere daha duyarlı olmaktadır. Bu farkın azalmasıyla bu duyarlılık azalmakta olup, aşınma derinliği ile iri agrega miktarı arasındaki ilişki zayıflamaktadır. Bu ilişkinin derecesi (IV.4) bağıntısında $(1/h_p - 1/h_m)$ katsayısının büyüklüğü ile belirlenmektedir. Zayıf harçlı karışımlarda aşınmaya dayanıklı iri agrega kullanılmasıyla, veya tersi durumda, bu katsayının mutlak değeri büyümekte ve kompozitin aşınması iri agrega miktarındaki değişimlerden daha çok etkilenmektedir. Harç ve iri agrega fazlarının aşınma dirençleri birbirlerine yakın değerler aldığında, $(1/h_p - 1/h_m)$ değeri sıfıra yaklaşmakta ve kompozitin aşınmasını harç fazının aşınma direnci belirlemektedir.

Şekil IV.5 ve IV.7 deki BÇ/0,50 ve BG/0,50 serisi karışımlarda iri agrega fazının aşınma direnci harç fazına oranla çok daha büyüktür. Bu serilerde harca katılan az miktardaki sert ve aşınmaya dayanıklı iri agrega daneleri beton yüzeyinin aşınma direncini önemli miktarda arttırmakta ve kompozitin aşınması hızla azalmaktadır. Karışımdaki iri agrega miktarının artmasıyla, aşınan yüzeydeki sert iri agrega daneleri süreklilik kazanmakta ve çevreledikleri harç bölgelerinin aşınmasını da iyice engellemektedirler. A_p 'nin yaklaşık 0,50 değerinden sonra kompozitin aşınması hemen hemen taşın aşınmasına eşit değerler almaktadır.

Şekil IV.6 ve IV.8 daki harç fazı kuvvetli BÇ/0,35 ve BG/0,35 serilerinde, aşınmaya dayanıklı iri agrega miktarının artışının, kompozitin aşınma direncinin arttırılmasında daha etkisiz kaldığı söylenebilir. Sonuç olarak Podima çakılı ve granit kırmataşı gibi aşınmaya dayanıklı agregaların kullanıldığı betonlarda, harç aşınma direncinin arttırılmasıyla hiperbolik (IV.4) bağıntısının eğrilığının azaldığı ve fazların aşınma dirençlerinin eşit olacağı durumda (IV.4) bağıntısının yatay bir doğru olacağı görülmektedir. Bu durumda beton aşınma açısından tek fazlı bir malzeme gibi davranacaktır. Harç fazının aşınma direncinin daha da arttırılmasıyla, bu sefer yüzeydeki iri agrega daneleri harca oranla daha fazla aşınacakları için, iri agrega miktarının artmasıyla kompozitin aşınmasının artması da muhtemeldir.

Nitekim BK serisi betonlarda bu durum gözlenmektedir. Şekil IV.2 deki BK/0,50 serisi betonlarda fazların aşınma dirençleri hemen hemen eşit değerdedir ve kompozitin aşınması iri agrega fazının miktarındaki değişimlerden hemen hiç etkilenmemektedir. Şekil IV.1 ve IV.9 daki BK/0,65 ve FK/0,50 serilerinde ise harç fazının aşınma direnci kalker taşına oranla daha az olmakta ve iri agrega miktarının artışıyla kompozitin aşınması azalmaktadır. Diğer taraftan, Şekil IV.3 ve IV.4 deki BK/0,45 ve BK/0,35 serilerinde, yani harç fazı kuvvetli betonlarda, harca oranla daha çok aşınan kalker kırmataşının karışıma katılması kompozitin aşınmaya dayanıklılığını azaltmaktadır. Harç fazının aşınma direncinin daha çok olduğu bu serilerde harca katılan kalker kırmataşının aşınması bir bakıma iri agrega danelelerini çevreleyen sağlam harç tarafından engellenmektedir. Bu nedenle A_p 'nin küçük değerlerinde zayıf iri agreganın aşınmayı arttırıcı etkisi daha az hissedilirken, A_p 'nin artışıyla yüzeydeki kalker kırmataşı daneleleri süreklilik kazanmakta ve sonuç olarak daha çok aşınan iri agrega daneleleri de çevreledikleri harç bölgelerinin daha çok aşınmasına neden olmaktadır. Daha önce yapılan bir çalışmada da kalker kırmataşı hacim oranının artışıyla betonda aşınmanın arttığı gözlenmiştir (57).

IV.2. Harç Fazı Özelliklerinin Kompozitin Aşınmasına Etkileri

IV.2.1. Kum Cinsinin Betonun Aşınmasına Etkisi

Literatürdeki bazı araştırmalarda ince agreganın niteliğinin aşınmayı önemli derecede etkilediği belirtilmektedir (15,19). Şekil IV.11'de kum cinsinin değişmesinin 0,50 su/çimento oranına sahip kalker kırmataşlı karışımlarda $h-A_p$ ilişkisine etkisi görülmektedir. BK/0,50 serisinde aşınma miktarı, A_p ile çok az değişirken, FK/0,50 serisinde A_p 'nin artan değerleriyle aşınma azalmaktadır. BK/0,50 ve FK/0,50 serilerinde kullanılan kumlar hem granülometri ve dane şekli, hem de minerolojik yapıları bakımından oldukça farklıdır. İyi granülometrilili ve granit kökenli sağlam Karabiga kumu, büyük oranda kavrık ($CaCO_3$) içeren ince dane-

li Fenerbahçe kumuna kıyasla harç fazının daha sağlam olmasına ve betonun aşınma direncinin artmasına neden olmaktadır. Fenerbahçe kumu yerine Karabiga kumu kullanılmasıyla harç fazının aşınmasında % 34, $V_p = 0,40$ olan betonun aşınmasında ise % 25 azalma olmaktadır.

IV.2.2. Harç Fazının Aşınmasının Betonun Aşınmasına Etkisi

Su/çimento oranının azaltılması ile harç fazının aşınma direncini arttırmak mümkün olmaktadır (Şekil IV.21). Diğer taraftan sabit su/çimento oranında harç fazının aşınma direnci kullanılan ince agrega cinsiyle de değişmektedir. a'Court (15) ince granülometrilik kumla hazırladığı numunelerde 4 saatlik aşınma süresi sonunda ağırlık kaybı (gr) olarak ölçülen aşınmanın iyi granülometrilik harçlara oranla yaklaşık 10 kat arttığını gözlemiştir.

Şekil IV.12'de harç fazının aşınmasının betonun aşınmasına olan etkisi görülmektedir. Genel olarak harç fazının aşınması azaldıkça betonun aşınması da azalmaktadır. Ancak, çeşitli oranlarda kırmataş içeren karışımlar, h_m 2,60 mm den büyük değerler aldığı anda, harç fazından daha az aşınırken, bu değerlerin altında, betonlar harca kıyasla daha fazla aşınmaktadır. Bu değer yaklaşık olarak kalker taşıda elde edilen ortalama aşınma değeridir.

Şekil IV.12'de kompozit malzeme olarak betonun aşınmasını fazların aşınma miktarları ve hacim oranları cinsinden tahmin edebilmek amacıyla önerilen (IV.4) bağıntısı da 0,30 hacim oranında kalker kırmataşı ($h_p = 2,62$ mm) içeren karışımlar için çizilmiştir. Ampirik bağıntının verdiği eğrinin deney sonuçlarına iyi uyduğu, ancak daha önemlisi kalker kırmataşının betonun aşınmaya dayanıklılığının arttırılmasında etken olacağı kritik noktayı gayet iyi belirlediği söylenebilir.

Sonuç olarak harcın aşınma direnci taşınkinden büyük olduğunda, harca iri agrega katılmasının aşınma açısından pek faydalı olmayacağı söylenebilir (Şekil IV.13). h_m/h_p nin 1'den büyük değerlerinde harç fazı, aksi durumda ise beton daha fazla aşınmaktadır. Diğer taraftan harca podima

çakılı ve granit kırmataşı gibi sert agregalar katıldığında elde edilen karışımların aşınmaları harca oranla daha az olmaktadır. Harç fazının aşınmasındaki azalmalar az miktarda sert agregaya içeren karışımlarda beton aşınmasını azaltırken, iri agregaya hacim oranı 0,30'un üzerine çıktığında pek fazla etki yapmamaktadır.

Sabit su/çimento oranında, kumun kalitesi iyileştirilerek harç fazının aşınma direncinin arttırılmasıyla betonun aşınması azalmaktadır (Şekil IV.14). İnce agregaya olarak Fernbahçe ve Karabiga kumlarının kullanıldığı karışımlarda ($E/C = 0,50$) harca kalker iri agregası katılması aşınmayı azaltmaktadır. Ancak Şekil IV.14'den, daha sağlam kum kullanılarak (örneğin; podima kumu) hazırlanacak karışımlarda, harcın aşınmasının daha da azalacağı ve bu durumda harca kalker iri agregası katılmasıyla elde edilecek karışımların harca kıyasla daha fazla aşınacağı söylenebilir.

IV.3. Agregaya Fazı Özelliklerinin Kompozitin Aşınmasına Etkileri

IV.3.1. İri Agregaya Cinsinin Betonun Aşınmasına Etkisi

Şekil IV.15 de 0,50 su/çimento oranındaki, Şekil IV.16 da ise 0,35 su/çimento oranındaki serilerde iri agregaya cinsinin değişmesinin aşınma-iri agregaya yüzey oranı ilişkisine olan etkisi görülmektedir. Aynı su/çimento oranına sahip karışımlarda aşınmaya dayanıklı sert iri agregaya kullanılmasıyla tüm V_p değerlerinde aşınma azalmaktadır. Ancak, aşınmadaki bu azalma düşük su/çimento oranına sahip karışımlarda daha az hissedilmektedir. İri agregaya hacim oranı 0,3 olan karışımlar esas alınırse kalker kırmataşı yerine granit kırmataşı ve podima çakılı kullanıldığında, 0,50 su/çimento oranında aşınma miktarı sırasıyla % 56 ve % 66 azalırken, 0,35 su/çimento oranında % 16 ve % 42 azalmaktadır.

Smith (19) de iri agregaya olarak kalker yerine granit ve kuvars kullanılmasının aşınma miktarını önemli ölçüde azaltacağını ancak bu azalmanın basınç mukavemeti 35 N/mm^2 den büyük olan betonlarda daha az hissedildiğini ileri sürmektedir. Liu (29) deneylerinde iri agregaya olarak kalker yerine

çert kullandığında, 72 saat sonundaki aşınmanın % 50 oranında azaldığını gözlemiştir. Bir başka çalışmada da kum cinsi sabit kalırken, kalker kırmataşı yerine podima çakılı kullanılmasıyla aşınmanın üçte birine düştüğü görülmüştür (58).

İri agreg a cinsi aşınma miktarının iri agreg a yüzey oranıyla değişim hızına da etki etmektedir. İri agreg a yüzey oranındaki birim yüzde artış sonucu aşınma miktarında oluşan değişim olarak tanımlanabilen bu değişim hızı 0,50 su/çimento oranındaki serilerde, kalker kırmataşı kullanıldığında sabit kalmakta, granit kırmataşı ve podima çakılı kullanıldığında ise, $h-A_p$ değişim hızı her iki cins agreg a için benzer olmakta ve A_p 'nin küçük değerlerinde büyük olan değişim hızı A_p 'nin artan değerleriyle azalmaktadır. Diğer taraftan BK/0,35 serisinde aşınma miktarı iri agreg a yüzey oranıyla aynı yönde artarken, BG/0,35 ve BÇ/0,35 serilerinde aşınma A_p 'nin artışıyla azalmaktadır. Ancak, bu azalma BG/0,35 serisinde çok az hissedilmektedir.

IV.3.2. İri Agreg a Fazının Aşınmasının Betonun Aşınmasına Etkisi

Sert, sağlam ve aşınmaya dayanıklı iri agreg a kullanılmasıyla betonun aşınmaya dayanıklılığının arttığı daha önceki çalışmalarda da gözlenmiştir (15,19,22,23,29,31,37). Ancak, betonun basınç mukavemeti arttıkça, sert ve aşınmaya dayanıklı iri agreg alardan betonun aşınma direncini arttırıcı etkisinin daha az hissedildiği ileri sürülmektedir (25).

Şekil IV.17'de iki değişik su/çimento oranındaki serilerde iri agreg a fazının aşınmasının beton aşınmasına olan etkisi gösterilmiştir. İri agreg a fazının aşınmasının azalmasıyla betonun aşınması da azalmaktadır. Ancak, su/çimento oranı 0,35 olan daha yüksek mukavemetli betonlarda iri agreg a fazının aşınma direncindeki artışın betona daha az yansıdığı görülmektedir. Aynı Şekil üzerinde (IV.4) bağıntısının verdiği eğri gösterilmiştir. (IV.4) bağıntısı harç fazı aynı kalan betonlarda, dağılı fazın aşınma özelliklerinin değişmesinin beton aşınmasına etkisini gayet iyi temsil etmektedir.

IV.4. Su/Çimento Oranının Betonun Aşınmasına Etkisi

Su/çimento oranının betonun aşınmasına olan etkisi bir çok araştırmacı tarafından incelenmiştir (15,16,19,29,33). Smith (19), su/çimento oranı 0,3 ile 0,7 arasında değişen betonlarda yaptığı deneylerde, kullanılan agrega cinsine bağlı olmaksızın, aşınmanın su/çimento oranıyla lineer olarak arttığını söylemektedir. Bu çalışmada da aşınma derinliğinin su/çimento oranıyla aynı yönde arttığı gözlenmiştir. Ancak aşınmanın su/çimento oranıyla değişimi karışımın içerdiği iri agrega miktarından ve cinsinden etkilenmektedir.

Şekil IV.18, IV.19 ve IV.20 de sırasıyla kalker kırmataşlı, podima çakıllı ve granit kırmataşlı karışımlarda su/çimento oranının $h-A_p$ ilişkisine etkisi görülmektedir. Şekil IV.21'de ise harç fazının ve çeşitli oranlarda iri agrega içeren kalker kırmataşlı, podima çakıllı ve granit kırmataşlı karışımların aşınmasının su/çimento oranıyla değişimleri görülmektedir. Şekil IV.21'de aşınma-su/çimento oranı ilişkisini gösteren eğriler harç fazı karışımları ve BK serisinde $V_p = 0,30$ karışımları ile, BÇ ve BG serilerinde, $V_p = 0,15$ ve $0,30$ karışımları için deney noktalarını birleştirerek geçirilmiştir.

Kalker kırmataşlı serilerde tüm V_p değerlerinde aşınma miktarı su/çimento oranıyla belirgin bir şekilde artmaktadır. Ancak Şekil IV.18 den, su/çimento oranı belirli bir değerin altında kalan karışımlarda aşınmanın A_p ile arttığı, bu değerin üstünde su/çimento oranına sahip karışımlarda ise aşınmanın A_p 'nin artışıyla azaldığı gözlenmektedir. Su/çimento oranının bu kritik değeri 0,45 ile 0,50 arasında bulunmaktadır. Bu durum Şekil IV.21 incelendiğinde daha belirginleşmekte ve su/çimento oranının bu kritik değerinin, deneylerimizde kullanılan BK serisi betonlar için 0,475 değerine eşit olduğu ortaya çıkmaktadır. Su/çimento oranının bu değerinde harç fazının aşınması kalker taşının aşınmasına eşit olmaktadır. Su/çimento oranı 0,475'in altında olan karışımlarda, sadece aşınma açısından bakıldığında, harca kalker iri agregası katılmasının pek bir faydası olmadığı söylenebilir.

Karışımın su/çimento oranı aşınmanın iri agrega yüzey oranıyla değişim hızına da etkimektedir. Şekil IV.18'den bu değişim hızının (mm/%1 A_p) BK/0,35 ve BK/0,45 serilerinde pozitif, BK/0,50 ve BK/0,65 serilerinde negatif değerler aldığı, ancak bir seri içinde hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir.

Şekil IV.19, IV.20 ve IV.21 den görüldüğü gibi aşınmaya dayanıklı podima çakılı ve granit kırmataşı gibi agregalarla üretilen serilerde, kompozitin aşınmasının su/çimento oranıyla değişimi benzer olmaktadır. Araştırmamızda kullanılan su/çimento oranlarında, BÇ ve BG serilerinde aşınma miktarı iri agrega miktarının artışıyla azalmaktadır. Ancak harca kıyasla aşınma miktarındaki bu azalma, düşük su/çimento oranlarında daha az hissedilmektedir. Diğer bir deyişle, az miktarda ($V_p = 0,15$) iri agrega içeren karışımlarda, aşınma miktarı su/çimento oranındaki değişimlerden daha çok etkilenirken, iri agrega miktarının daha yüksek değerlerinde, su/çimento oranındaki değişimler kompozitin aşınmasını daha az etkilemektedirler. (Şekil IV.21).

Su/çimento oranındaki değişimin harç fazının aşınmasına olan etkisi yumuşak iri agregalı serilerde betonun ($V_p = 0,30-0,40$) aşınmasına da yansırken (Şekil IV.18), sert iri agregalı karışımlarda bu durum görülmemektedir. Bu nedenle, aşınma direnci yüksek iri agreganın kullanıldığı kompozitlerde agrega kontrollü, aşınmaya dayanıksız iri agreganın kullanıldığı kompozitlerde ise matris kontrollü aşınmadan söz etmek mümkündür.

Diğer taraftan Şekil IV.21'deki eğrilerin gidişine bakılırsa, su/çimento oranının 0,35'den itibaren daha da azaltılmasıyla, BÇ ve BG serilerinde de kritik bir su/çimento oranının bulunması ve BK serilerinde gözlenen durumun oluşması muhtemeldir.

IV.5. Aşınmanın Çeşitli Beton Özellikleriyle İlişkisi

Araştırmamızda üretilen harç ve betonların aşınma özelliklerinin yanı sıra bazı fiziksel ve mekanik özellikleri de saptanmış ve betonun abrazyon aşınması ile bu özellikler arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bu ilişkilerin üssel bir bağıntı ile ifade edilebileceği görülmüş olup aşınma ile incelenen özellikler arasındaki ilişkiyi belirleyen bağıntılar ve korelasyon katsayıları topluca Tablo IV.1'de verilmektedir.

IV.5.1. Aşınma ile Birim Ağırlık Arasındaki İlişki

Abrazyon aşınmasının sertleşmiş betonun birim ağırlığı ile değişimi Şekil IV.22'de gösterilmiştir. Burada birim ağırlıklar, etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulmuş aşınma numuneleri üzerinde aşınma deneylerinden hemen önce ölçülmüş değerlerdir.

Şekil IV.22'den görüldüğü gibi hem kalker kırmataşlı hem de Podima çakıllı karışımlarda, birim ağırlığın artışıyla aşınma derinliği azalmaktadır. Ancak dikkati çeken husus FK serisi karışımlardaki deney sonuçlarının, BK serisi için önerilen bağıntıya uyduğu fakat BÇ serisi deney sonuçlarının farklı bir eğri etrafında dağıldığıdır. Aynı cins iri agregada kullanılan karışımlar için aşınma ile birim ağırlık arasında korelasyon aramak daha doğru olmaktadır. Podima çakıllı karışımlarda h ile Δ arasında bir bağıntı araştırılmamış, Şekil IV.22'de BÇ serisi deney sonuçları arasından geçirilen eğri genel gidişi görebilmek amacıyla tahmini olarak çizilmiştir.

IV.5.2. Aşınma ile Basınç Mukavemeti Arasındaki İlişki

Basınç mukavemetinin artmasıyla aşınmanın azaldığı birçok araştırmada belirtilmiştir (20,25,29,31,33,37). Smith (19), Denver laboratuvarlarında yapılan araştırmalarda basınç mukavemetleri eşit olan betonlarda agregası cinsinin değişmesiyle farklı aşınma değerlerinin elde edildiğini, ancak kendi çalışmasında aşınma ile basınç mukavemeti arasındaki korelasyonun agregası cinsi ve fiziksel özelliklerinden etkilenmediğini

söylemektedir. Prior (12) ve Aydemir (33) ise basınç mukavemetindeki artışın bir değerinden sonra aşınmanın daha fazla azalmadığını söylemektedirler.

Şekil IV.23 de aşınmanın basınç mukavemetiyle değişimi görülmektedir. Kalker kırmataşlı serilerde aşınma basınç mukavemetiyle azalmaktadır. Aşınmadaki bu azalma basınç mukavemetinin 35 N/mm^2 den büyük değerlerinde daha yavaş olmaktadır. Podima çakıllı ve granit kırmataşı gibi aşınmaya dayanıklı agregalar içeren karışımlarda ise aşınma değerleri basınç mukavemetindeki artıştan pek etkilenmemektedirler.

Kalker kırmataşlı serilerde aşınma ile basınç mukavemeti arasındaki korelasyon % 95 güvenli kritik değerden büyük olurken, Podima çakıllı ve granit kırmataşlı serilerde korelasyon katsayısı % 95 güvenli kritik değerin oldukça altında kalmaktadır (Bkz. Tablo IV.1). Bu sonuçlardan aşınma ile basınç mukavemeti arasındaki korelasyonun derecesinin iri agregalar cinsine bağlı olduğunu söylemek mümkündür. Diğer bir deyişle, kolay aşınan türde iri agreganın kullanıldığı betonlarda $h = f(R)$ bağıntısı daha uygun gözük-mektedir.

Şekil IV.24'de aşınmanın, kompozit basınç mukavemeti / matris basınç mukavemeti oranı (R/R_m) ile değişimi görülmektedir. Kalker kırmataşlı karışımlarda, harç fazı niteliğinin değişmediği bir seri içinde, basınç mukavemeti iri agregalar hacim oranıyla artmaktadır. Bu nedenle $h-(R/R_m)$ ilişkisi Şekil IV.18'deki $h-A_p$ ilişkisiyle paralellik göstermektedir. Podima çakıllı karışımlarda ise iri agregalar miktarının artmasıyla basınç mukavemeti önce azalmakta sonra artmaktadır (Tablo III.9). Podima çakıllı karışımlarda (R/R_m) oranının, yaklaşık 0,95 değerinden itibaren artışında, karışımdaki iri agregalar miktarı da artıyorsa aşınma azalmakta aksi halde artmaktadır. Diğer taraftan, aynı R/R_m değerinde, sağlam iri agregalar kullanılarak kompozitin aşınma direncinde oluşturulan iyileşme, iri agregalar cinsi sabit tutulurken matris fazının iyileştirilmesiyle elde edilen aşınma direncindeki artıştan daha önemli olmaktadır.

Şekil IV.25'de ise matris mukavemeti / dağılılı faz muka-

vemeti oranının (R_m/R_p) aşınmaya etkisi görülmektedir. Kalker kırmataşı için $R_p = 65 \text{ N/mm}^2$, Podima çakılı (kuvars taşı) için de $R_p = 100 \text{ N/mm}^2$ alınmıştır. Kompozitin aşınması (R_m/R_p) oranındaki artışla azalmaktadır, ancak bu azalma 0,30 hacim oranında Podima çakılı içeren karışımlarda çok az olmaktadır. Gerçekte iri agrega fazının niteliği değişmeyen kompozitlerde harç fazının mukavemeti su/çimento oranı ile değişmektedir. Bu nedenle Şekil IV.25 deki $h-(R_m/R_p)$ eğrileri, Şekil IV.21 deki $h-(E/C)$ eğrilerinin aynadaki aksi olmaktadır.

IV.5.3. Aşınma ile Eğilme-Çekme Mukavemeti Arasındaki İlişki

Aşınmanın eğilme-çekme mukavemetiyle olan ilişkisi Şekil IV.26'da görülmektedir. Aşınma miktarı eğilme-çekme mukavemeti ile, $h-R$ ilişkisine benzer şekilde değişmektedir. Kalker kırmataşlı serilerde deney sonuçlarına en uygun eğrinin denklemi ve korelasyon katsayısı Tablo IV.1'de görülmektedir. Aynı su/çimento oranında Podima çakılı karışımlarda eğilme-çekme mukavemetleri daha düşük değerler almasına rağmen aşınma miktarları kalker kırmataşlılara oranla çok düşük olmaktadır. Ancak Podima çakılı karışımlarda deney sonuçları daha fazla dağılmaktadır.

Tablo IV.1'deki $h = f(R)$ ve $h = f(T)$ bağıntılarının korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında, aşınma ile basınç mukavemeti arasındaki ilişkinin daha kuvvetli olduğu görülmektedir.

IV.5.4. Aşınma ile Dinamik-Elastisite Modülü Arasındaki İlişki

Şekil IV.27 de rezonans frekansı yöntemiyle prizmatik numuneler üzerinde ölçülen dinamik elastisite modülüyle betonun aşınması arasındaki ilişki görülmektedir. Dinamik elastisite modülünün artışıyla betonun aşınması azalmaktadır. Araştırmamızda kullanılan kalker kırmataşlı karışımlarda, E_d 'nin yaklaşık 40000 N/mm^2 değerinden sonra kompozitin elastisite modülündeki artışla, aşınmadaki azalma hızı oldukça yavaşlamaktadır.

Şekil IV.28'de kompozit elastisite modülü/sürekli faz elastisite modülü oranının $(E_d/(E_d)_m)$, Şekil IV.29'da ise kompozit elastisite modülü/dağılılı faz elastisite modülü oranının $(E_d/(E_d)_p)$ aşınmayla olan ilişkisi incelenmiştir. Sabit su/çimento oranlı serilerde $(E_d/(E_d)_m)$ ve $(E_d/(E_d)_p)$ oranlarındaki artışlar karışımdaki iri agrega hacim oranının artışıyla elde edilmektedir. Bu nedenle $h-V_p$ eğrilerinin değişim karakteri $h-E_d/(E_d)_m$ ve $h-E_d/(E_d)_p$ eğrilerinde de gözlenmektedir.

Kompozit içindeki fazların rijitliklerinin birbirlerine kıyasla değişiminin aşınmayla ilişkisi ise Şekil IV.30'da gösterilmiştir. BK serisi karışımlarda matris fazı elastisite modülü/dağılılı faz elastisite modülü oranının artışıyla aşınma azalmaktadır. $(E_d)_m/(E_d)_p$ oranının yaklaşık 0,32 değerinden sonra 0,30 hacim oranında kalker kırmataşı içeren karışımlar harç fazına kıyasla daha fazla aşınmaktadırlar.

IV.5.5. Aşınma ile Schmidt Sertliği Arasındaki İlişki

Bölüm II.1 ve II.2'de sürtünme ve aşınma teorileri hakkında literatürdeki bilgiler özetlenirken, değme halindeki malzemelerin yüzey sertliğinin artmasının sürtünme ve aşınmayı azaltacağı belirtilmiştir. Bölüm II.3'de de aşınmaya dayanıklılığın arttırılması için beton yüzeyinin boşluksuz, sağlam ve sert olması gerektiği ve bunu sağlamak için uygulamada çeşitli yöntemlerin kullanıldığı belirtilmiştir. Taş yapılı cisimlerin ve betonun yüzey sertliğini çeşitli yöntemlerle ölçmek mümkündür. Schmidt skelerometresiyle alınan ölçümler beton ve taşlarda sertliğin ölçüsü olarak kabul edilmekte ve malzemenin basınç mukavemetinin göstergesi sayılmaktadır.

Çalışmamızda da, üretilen prizma numunelerinin kalıplı düzgün yüzeylerinde Schmidt çekiciyle okumalar yapılmıştır. Numunelerdeki Schmidt çekici okumaları karışımdaki iri agrega hacim oranıyla değişim göstermektedir. Şekil IV.31'de aşınmanın Schmidt çekiç okumalarıyla değişimi görülmektedir. Kalker kırmataşlı serilerde Schmidt sertliği ile aşınma arasında iyi bir korelasyon olduğu gözlenmiş ve sertlik ile aşınma arasında doğrusal bir ilişki bulunduğu görülmüştür (Tablo IV.1).

Kalker kırmataşlı serilerde aşınma değerleri Schmidt sertliğinin artışıyla azalmaktadır. Podima çakıllı ve granit kırmataşlı karışımlarda ise aşınma ile Schmidt sertliği arasındaki ilişki kalker kırmataşlı karışımlar için verilen lineer bağıntıya uymamaktadır. Bu karışımlarda aşınma derinliği Schmidt sertliğindeki artıştan pek fazla etkilenmemektedir. Ancak, Schmidt sertliğindeki artışla aşınmanın granit kırmataşlı karışımlarda bir miktar azaldığı, podima çakıllı karışımlarda ise bir miktar arttığı görülmektedir. Podima çakıllı ve granit kırmataşlı karışımlarda deney sayısının az olması nedeniyle bir genelleme yapmak mümkün olmamaktadır.

IV.6. Betonda Abrazif Aşınmanın Zamanla Değişimi ve Aşınma Ömrü

Bölüm II de verilen (II.6) ve (II.7) tipi bağıntılarda, metallerde adezif ve abrazif aşınmanın kayma (aşınma) mesafesi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Şekil IV.32-IV.40'da, üretilen tüm serilerde aşınmanın, aşınma devir sayısı (aşınma mesafesi) ile değişimleri görülmektedir. Şekil IV.41'de granit ve kalker taşlarında aşınma devir sayısı ilişkisi görülmektedir. Harç ve taşlarda olduğu gibi çeşitli oranlarda iri agregaya içeren karışımlarda da aşınma miktarı aşınma devir sayısı ile lineer olarak artmaktadır. Bu doğruların eğimi aşınma hızını (λ) vermektedir. TS 213 ve DIN 52108 normlarında Böhme deney aletiyle aşınma deneylerinin 440 devir sürdürülmesi belirtilmiştir. Bu yaklaşık 609 metre aşınma mesafesine karşı gelmektedir. Daha önce yapılan bir çalışmada (59) Böhme deney aletinde aşınma deneyi 1232 devir (aşınma mesafesi 1704 m) sürdürülmüş ve aşınmanın devir sayısı ile lineer olarak artmaya devam ettiği görülmüştür.

Şekil IV.42'de aşınma hızının iri agregaya hacim oranıyla değişimi görülmektedir. Bu eğriler aşınma miktarının iri agregaya hacim oranıyla değişimlerini belirleyen eğrilerle paralellik göstermektedir. Aynı iri agregaya hacim oranına sahip karışımlarda aşınma hızı arttıkça, aşınma miktarı da artmaktadır.

Aşınma ile aşınma devir sayısı (veya aşınma mesafesi) arasında doğrusal bir ilişki bulunduğuna göre, aşınma hızı

$$\lambda = \frac{\text{aşınma derinliği}}{\text{aşınma devir sayısı}} = \frac{h}{t} \quad (\text{IV.5})$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu durumda belirli bir h_{em} (emniyetli aşınma derinliği) için malzemenin aşınma devir sayısı cinsinden ömrü

$$t \text{ (devir sayısı)} = \frac{h_{em}}{\lambda} \quad (\text{IV.6})$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Aşınmanın gelişigüzel bir olay olduğu ve belirli bir h_{em} değeri için bir ömür dağılımı tekabül ettiği, bu ömür dağılımının ise normal dağılım olduğu ileri sürülmektedir (11). Bu durumda (IV.6) bağıntısı ile hesaplanan malzemenin ömrü ortalama ömür, $\bar{t}$, olarak kabul edilebilir.

Ortalama aşınma ömrünü hesaplayabilmek için, müsaade edilen aşınma derinliği (h_{em}) ve malzemenin belirli şartlar altındaki aşınma hızı (λ) bilinmesi gereklidir. Bu ikincisini deney yaparak saptamak mümkün ise de, h_{em} değerinin tespitinde belirsizlikler vardır. Yalnızca aşınma direncinin bilinmesi malzemenin aşınma ömrünün hesaplanmasında yetersiz kalacağı, diğer taraftan bu aşınma miktarının kaplama malzemesinin kalınlığına oranlandığında malzemenin ömrü hakkında belirli bir oranda fikir sağlamanın mümkün olacağı, ancak her türlü şartlarda 10 mm'lik aşınmanın müsaade edilebilecek azami sınır olduğu ileri sürülmektedir (13).

Diğer taraftan malzemenin ortalama ömrü yerine, dağılım parametrelerini de hesaba katan bir ömür, belirli bir güvenlik derecesi ile verilebilir. Bunun için ortalama aşınma ömrünün yanısıra ömür dağılımının standart sapmasının hesaplanması gerekir. Bu durumda % 90 güvenli aşınma ömrü

$$t_{0,90} = \bar{t} - 1,28 \hat{\sigma} \quad (\text{IV.7})$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada $\hat{\sigma}$ dağılımın standart

sapmasıdır. Ancak, dağılım parametrelerini de göz önüne alan % 90 güvenli bir ömür hesaplanabilmesi için, çok sayıda aynı cins numune üzerinde aşınma deneyleri yapmak gerekmektedir.

Tablo IV.2 de, deneylerimizde kullanılan tüm serilerde $h_{em} = 7$ mm kabulüyle, (IV.6) bağıntısından hesaplanan ortalama aşınma ömürleriyle, BK/0,50 ve BK/0,35 serilerine oranlanmış değerler verilmektedir. Araştırmamızda kullanılan serilerdeki her karışımdan üçer adet numune üzerinde aşınma deneyi yapılmış olması, istatistiksel bir değerlendirme yapmaya imkan vermemiştir.

Ortalama aşınma ömrü iri agrega miktarının artmasıyla BK/0,35 ve BK/0,45 serilerinde azalmakta, diğer tüm serilerde ise artmaktadır. BK serisi karışımlarda su/çimento oranının azalmasıyla ortalama aşınma ömrü artmaktadır. Aynı su/çimento oranında daha sert iri agrega kullanılmasıyla ortalama aşınma ömrü önemli miktarda artış gösterirken, kalker kırmataşlı serilerde, kötü nitelikli kum kullanılmasıyla ortalama aşınma ömrü azalmaktadır.

IV.7. Aşınma Deney Sonuçlarından Pratikte Yararlanma Olanakları

a'Court aşınma deney sonuçlarıyla, pratikte karşılaşılan durumlar arasında bilimsel ve kantitatif bir korelasyon bulmanın imkansız olduğunu söylemektedir (60). Gerçekten de pratikte karşılaşılan aşınma şartlarını simüle ederek laboratuarda yapılan deneylerin sonuçları, numune boyutları, çeşitli dış etkiler ve kısa sürede sonuç alma gibi birçok kısıtlamalar nedeniyle uygulama alanı için ancak kalitatif birer gösterge olabilmektedirler. Bunu bir ölçüde giderebilmek için doğrudan yapı elemanı üzerinde aşınma deneyi yapmaya olanak veren aletler kullanmak veya yerinden alınan numuneler üzerinde laboratuarda deneyler yapmak veya uygulamada halen kullanılmakta olan döşeme kaplamaları üzerinde sürekli ölçümler yapmak gibi yöntemler önerilebilir.

Bu açıdan bakıldığında bu araştırmada elde edilen sonuçlar uygulamada betonun aşınma özeliği konusunda yönlendirici

olabilecektir. Aşınmaya dayanıklı beton üretimi söz konusu olduğunda göz önüne alınması gereken en önemli husus, betonun bir kompozit malzeme gibi düşünülmesi gerektiğidir. Bilhassa tozlanma denilen beton yüzeyindeki zayıf çimento hamuru tabakasının aşınmasından sonra, betonda aşınmayı kontrol eden iki faz söz konusu olmaktadır. Harç fazı çimento, kum ve sudan oluşmakta ve iyi kalite çimento ve kum kullanılmasıyla veya su/çimento oranının azaltılmasıyla aşınmaya dayanıklılığı arttırılabilmektedir. Harç fazı içinde dağılı olan iri agrega fazının aşınmaya dayanıklılığı ise sert ve sağlam agregalar kullanılarak arttırılabilir. Kompozit olarak betonun aşınma özeliğini bu iki fazın birbirlerine kıyasla aşınma dirençleri ve bunların beton içindeki hacim oranları belirlemektedir. Aşınmaya dayanıklılığı daha fazla olan fazın miktarı arttıkça beton da aşınmaya daha çok dayanıklı olmakta ve aşınma ömrü daha uzun olabilmektedir.

Yol kaplaması veya zemin kaplaması olarak kullanılan çeşitli beton türlerinde DIN 52108 standardına göre müsaade edilen aşınma değerleri Tablo IV.3'de verilmektedir.

Araştırmamızdaki aşınma deney sonuçları Tablo IV.3'ün ışığında değerlendirildiğinde, şu önerilerde bulunmak mümkündür.

Çeşitli endüstri yapılarında ve ağır trafiğe maruz yollarda kullanılacak sert beton kaplamalarında:

1- Mutlaka granit veya kuvarslı iri agrega ile sert ve sağlam silisli kum kullanılmalıdır,

2- Betondaki iri agrega hacim oranı 0,35 den az olmamalıdır,

3- Su/çimento oranı 0,50 nin üstüne çıkmamalıdır.

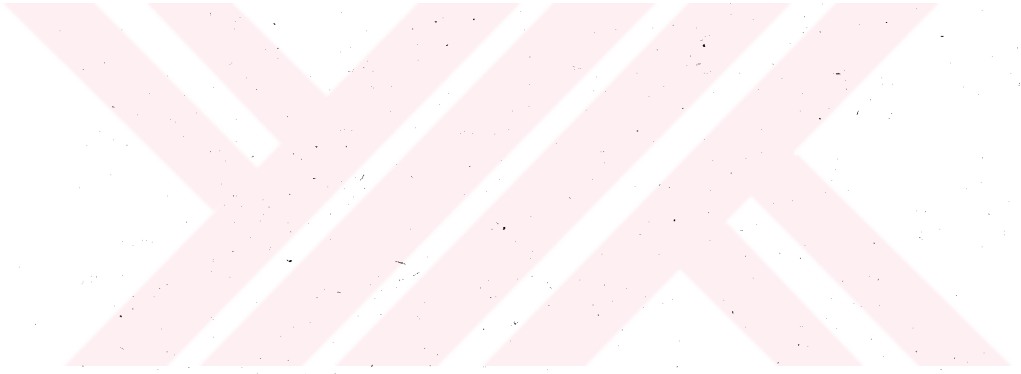
Beton şose kaplamalarında kullanılacak betonda:

1- İri agrega olarak kalker kırmataşı kullanıldığında, tercihan silisli sert kum kullanılmalı ve su çimento oranı

0,50 nin üstüne çıkmamalıdır,

2- Kullanılan ince agreg a deniz kumu gibi kolay aşınan türden olduğunda, su/çimento oranının mutlaka 0,50 nin altında tutulması gereklidir.

Diğer taraftan araştırmamızdaki aşınma deney sonuçları ve yukarıdaki öneriler ışığında aşınmaya dayanıklı beton üretimi için verilebilecek bazı pratik beton karışım reçeteleri Tablo IV.4 de görölmektedir.



BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu araştırmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

a) Harca katılan iri agreganın hacim oranı yerine, aşınan kesitteki yüzey oranının gözönüne alınması aşınma özeliğinin fiziksel açıklanması bakımından daha iyi değerlendirme olanağı sağlamaktadır. Ancak her iki parametrenin sayısal değerleri hemen hemen eşittir.

b) Betonda aşınma özeliği kompozit malzeme kurallarıyla ifade edilebilmektedir ve

$$\frac{1}{h} = \frac{A_m}{h_m} + \frac{A_p}{h_p}$$

şeklindeki bağıntı deney sonuçlarına gayet iyi uymaktadır. Burada h , h_m ve h_p sırasıyla kompozitin, sürekli ve dağılı fazın aşınmalarını, A_m ve A_p de sırasıyla sürekli ve dağılı fazın aşınan kesitteki yüzey oranlarını göstermektedir.

c) Betonda aşınma özeliğini fazların aşınma dirençleri belirlemektedir. Aşınmaya daha dayanıklı olan fazın miktarı arttıkça betonun aşınmaya dayanıklılığı artmaktadır.

d) Harç fazının aşınması azaldıkça, iri agregası yumuşak (kalker) olan betonların aşınması önemli oranda azalırken, aşınması düşük, sert iri agregalı (kuvars, granit) betonların aşınması harç fazının aşınmasındaki değişimlerden daha az etkilenmektedir.

e) Su/çimento oranı 0,50 olan serilerde aşınan yüzeydeki iri agrega oranı arttıkça, kalker kırmataşlı karışımlarda aşınma miktarı çok az değişirken, Podima çakıllı ve granit kırmataşlı karışımlarda aşınma önemli ölçüde azalmaktadır.

f) Harç fazı niteliği sabit kalırken, kalker yerine granit ve kuvars gibi sert iri agregalar kullanılmasıyla aşınma miktarı önemli oranda azalmaktadır. İri agregalar olarak Podima çakılının kullanıldığı betonlar en az aşınmaktadır. Diğer taraftan iri agregalar cinsi aynı kalırken kötü nitelikli kum kullanılmasıyla aşınma miktarı artmaktadır.

g) Bu araştırmada incelenen kalker kırmataşlı karışımlarda, $E/C < 0,475$, $h_m/h_p < 1$, $(E_d)_m/(E_d)_p > 0,32$ ve $R_m/R_p > 0,36$ olduğunda, harca iri agregalar katılmasının betonun aşınma özeliğinde iyileştirme yapmadığı görülmüştür.

h) Su/çimento oranı betonun aşınmasını etkileyen önemli faktörlerdendir. Su/çimento oranının azaltılmasıyla harç fazının aşınma direncinde artış olmakta ve sonuçta kompozitin aşınmaya dayanıklılığı artmaktadır.

1) Betonun abrazyon aşınması ile, birim ağırlık, basınç mukavemeti, eğilme-çekme mukavemeti, dinamik elastisite modülü ve Schmidt sertliği gibi beton özellikleri arasında ilişki bulunmaktadır. Ancak, aşınma ile bu özellikler arasındaki korelasyon kullanılan iri agregalar cinsine de bağlı olmaktadır. Dikkati çeken bir husus da, harç fazı veya agregalar fazı mükemmel olmayan betonlarda aşınma ile incelenen özellik arasında bir bağıntının bulunduğu, ancak kompozit bileşenleri iyileşince bağıntının zayıfladığıdır.

j) Betonun aşınmasına etki eden faktörler, aşınma ömrünü de aynı yönde etkilemektedirler

k) Aşınmaya dayanıklı beton karışımları için pratik reçetelerin verilmesi mümkündür.

Bu sonuçların ışığında ilerde şu araştırmaların yapılması önerilebilir:

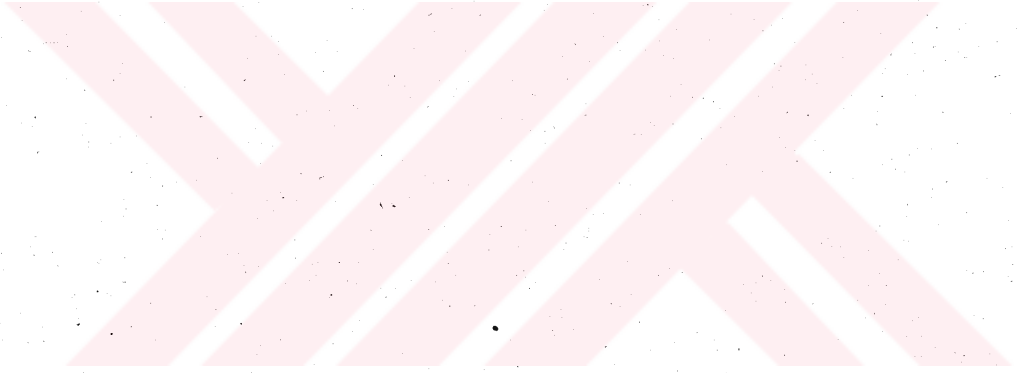
1- Aynı konunun sürekli granülometrilili betonlarda araştırılması,

2- Yukarıda g) şıkında verilen sonuçların genelleştirilebilmesi için aşınma deneylerinin farklı iri ve ince agre-

galar kullanarak, çeşitli kalitedeki çimentolar ile su/çimento oranının daha geniş sınırlarda değiştiği karışımlarda yapılması,

3- Kompozit malzemelerin aşınma özeliği için bu araştırmada önerilen bağıntının, V_p 'nin 0,40 dan büyük değerlerinde deney sonuçlarına uygunluğunun araştırılması,

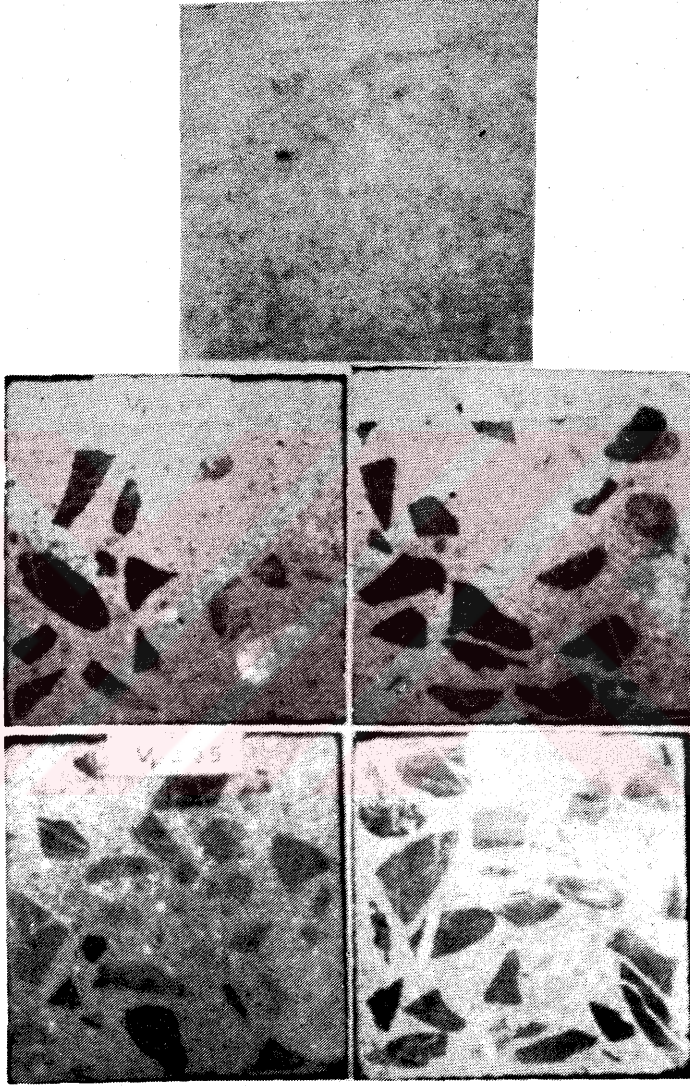
4- Aşınmayı azaltıcı ilave maddelerin, katkıların, yüzey kaplamalarının etkinliklerinin araştırılması.



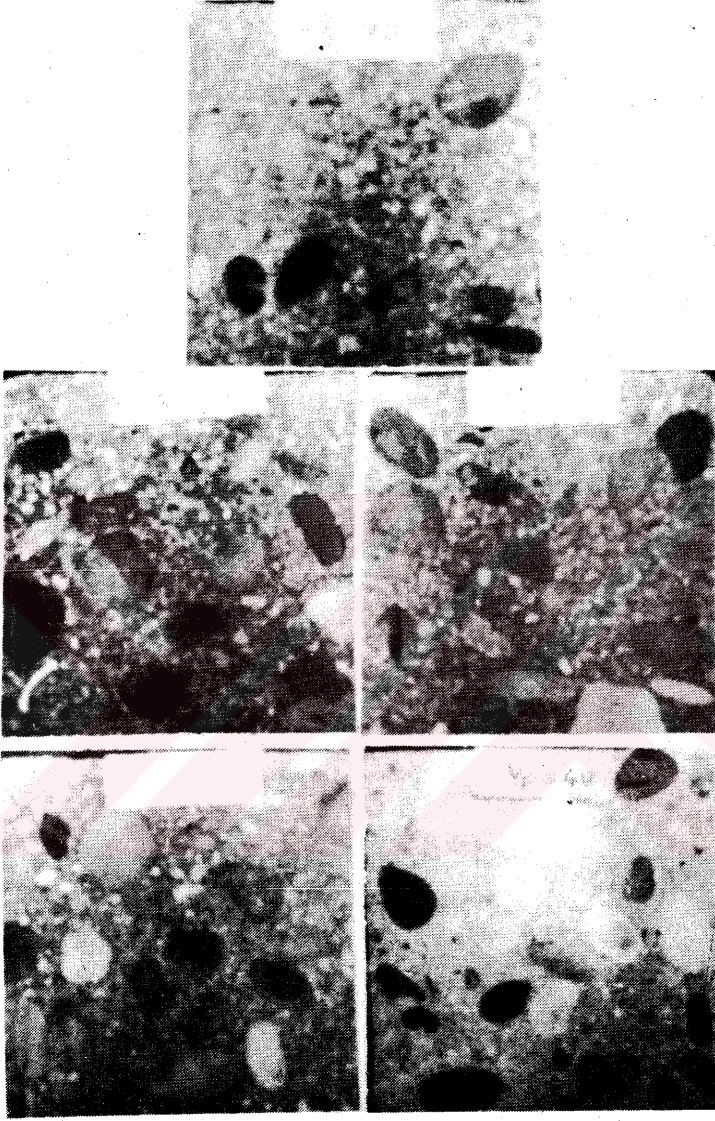




E K L E R



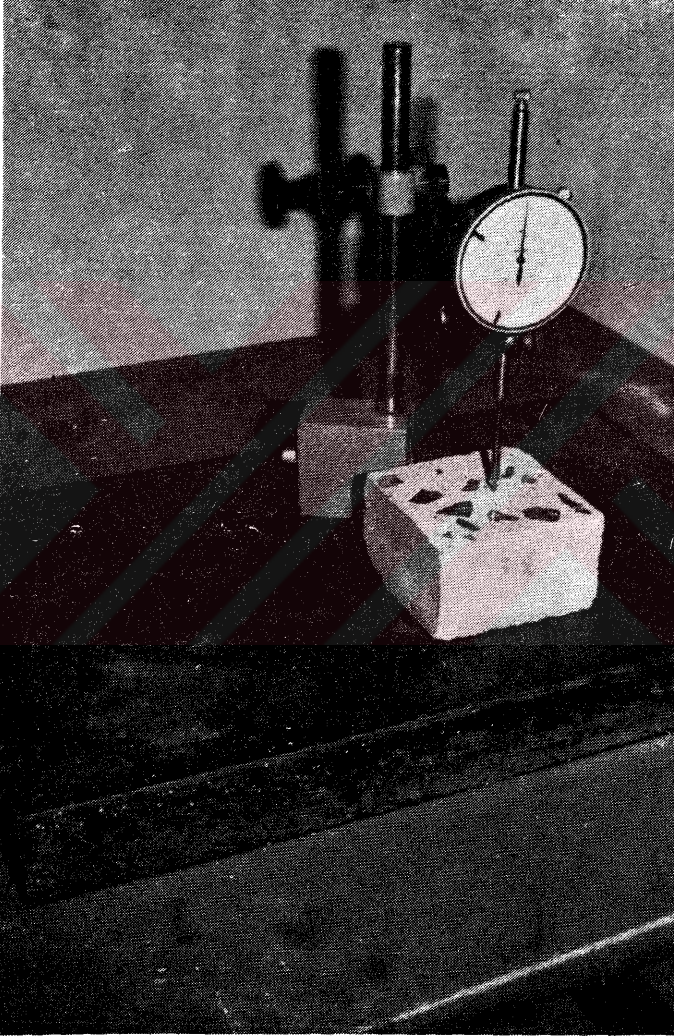
Resim 1. 0,50 Su/Çimento Oranındaki Kalker Kırmataşlı Karışımların Kesitleri



Resim 2. 0,50 Su/Çimento Oranındaki Podima Çakıllı Karışımların Kesitleri



Resim 3. BÖHME (DIN 52108) Aletinde Aşınma Deneyi



Resim 4. Aşınma Derinliğinin Ölçülmesi

Tablo III.1- Çimentonun Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

FİZİKSEL ÖZELİKLER	KİMYASAL ÖZELİKLER
Blaine özgül yüzeyi (cm ² /gr) : 4003	SiO ₂ (çözünen) (%) : 17,50
90 µluk elekte kalan (%) : 6,0	SiO ₂ (çözünmeyen) (%) : 17,95
200 µ luk elekte kalan (%) : 0,5	Al ₂ O ₃ (%) : 5,50
Özgül ağırlık (gr/cm ³) : 3,07	Fe ₂ O ₃ (%) : 2,60
Normal kıvam suyu (%) : 34	CaO (%) : 47,25
Le Châtelier iğnelerinin açılması (toplam) (mm) : 0	MgO (%) : 1,25
Priz başlangıcı (saat-dak): 4-22	SÖ ₃ (%) : 2,79
Priz sonu (saat-dak) : 6-53	Kızdırma kaybı (%) : 4,82
	Tayin edilemeyen (%) : 0,34
	Serbest kireç (%) : 0,26
	Hidrolik Modül (%) : 1,83
	Silis Modülü (%) : 2,16
	Alümin Modülü (%) : 2,11
MEKANİK ÖZELİKLER	
Basınç mukavemeti (N/mm ²)	$\frac{7 \text{ gün}}{18,2} \quad \frac{28 \text{ gün}}{29,3}$
Eğilme Mukavemeti (N/mm ²)	4,2 6,3

Tablo III.2- Agregaların Granülometrik, Fiziksel Özellikleri ve Petrografik Bileşimi

Agrega Cinsi	Karabiga Kumu	Fenerbahçe Kumu	Kalker Kırmataşı	Granit Kırmataşı	Podima Çakılı
Granülometrik Bileşim (Elekten Geçen Yüzde)	0,2mm	5	2	0	0
	1 mm	20	77	0	0
	3 mm	62	97	0	0
	7 mm	100	100	0	0
	15 mm	100	100	0	0
	30mm	100	100	100	100
İncelik Modülü	2,13	1,24	5,0	5,0	5,0
Gevşek Birim Ağırlık (kg/lt)	1,436	1,360	1,404	1,305	-
Özgül Ağırlık (kg/lt)	2,60	2,54	2,73	2,67	2,65
Petrografik Bileşim	-Kuars+kuvarsit % 31 -Feldspat+kuvars % 32 -Feldspat % 30 -Kavkı (CaCO ₃) % 6 -Opal % 0,3 -Bazalt % 0,3	-Kuars % 35-40 -Kavkı (CaCO ₃) % 45-50 -Diğerleri % 10-15	-Kalker ve Kalsit % 85 -Andezit % 10 -Silt taşı % 5	-Kuars % 40-50 -Feldspat % 30-40 -Biyotit ve opaklar % 10-20	-Kuars % 50-55 -Kuarsit % 25-30 -Kalseduan % 20-25 -Opal % 1-2 -Kalsit % 2-3

Tablo. III.3- Su/Çimento Oranı 0,65 olan Betonların Gerçek Bileşimleri

Beton Kodu	B E T O N							H A R Ç F A Z I						
	$\frac{E}{C}$	İri Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Hava (lt)	V_p (m ³ /m ³)	Komp. (m ³ /m ³)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{C}$	Komp. (m ³ /m ³)
BK/0,65/0	0,65	0	1166	533	346	32	0	0,622	1166	533	346	0,652,187		0,622
BK/0,65/10	0,65	266	1063	486	316	19	0,098	0,665	1178	539	349	0,652,187		0,629
BK/0,65/20	0,65	538	954	436	284	11	0,197	0,706	1189	544	351	0,652,186		0,634
BK/0,65/30	0,65	812	840	384	250	4	0,297	0,746	1198	548	356	0,652,186		0,639
BK/0,65/35	0,65	952	784	359	233	0	0,349	0,767	1206	552	353	0,642,186		0,644
BK/0,65/40	0,65	1082	720	330	214	5	0,397	0,781	1197	547	349	0,642,186		0,639

Tablo III.4- Su/Çimento Oranı 0,50 Olan Betonların Gerçek Bileşimleri

Beton Kodu	B E T O N							H A R Ç F A Z I						
	$\frac{E}{C}$	İri Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Hava (lt)	V_p (m ³ /m ³)	Komp, (m ³ /m ³)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{C}$	Komp. (m ³ /m ³)
BK/0,50/0	0,50	0	1324	551	275	37	0	0,689	1324	551	275	0,50	2,405	0,689
BK/0,50/10	0,50	274	1201	499	250	26	0,100	0,725	1335	555	276	0,50	2,405	0,694
BK/0,50/20	0,50	550	1074	447	223	17	0,202	0,760	1346	560	277	0,50	2,405	0,700
BK/0,50/30	0,50	821	935	389	195	18	0,301	0,787	1340	557	274	0,49	2,405	0,697
BK/0,50/35	0,50	967	877	364	182	8	0,354	0,810	1360	566	277	0,49	2,405	0,707
BK/0,50/40	0,50	1092	799	332	166	18	0,400	0,816	1336	556	270	0,49	2,405	0,695
BÇ/0,50/10	0,50	266	1214	505	252	16	0,100	0,731	1349	561	280	0,50	2,405	0,692
BÇ/0,50/20	0,50	528	1071	445	223	21	0,199	0,756	1338	556	277	0,50	2,405	0,696
BÇ/0,50/30	0,50	791	935	389	195	21	0,299	0,785	1335	556	276	0,50	2,405	0,694
BÇ/0,50/35	0,50	925	871	362	181	17	0,349	0,802	1339	557	276	0,50	2,405	0,696
BÇ/0,50/40	0,50	1052	800	333	166	22	0,397	0,812	1328	552	273	0,49	2,405	0,691
BĞ/0,50/20	0,50	526	1042	433	217	44	0,197	0,739	1300	540	268	0,50	2,405	0,676
BĞ/0,50/40	0,50	896	666	277	138	180	0,336	0,682	1005	418	203	0,49	2,406	0,523
FK/0,50/0	0,50	0	1209	557	279	64	0	0,658	1209	557	279	0,50	2,166	0,658
FK/0,50/20	0,50	552	970	448	224	47	0,202	0,730	1216	562	278	0,50	2,166	0,662
FK/0,50/40	0,50	1091	719	332	166	43	0,400	0,791	1202	555	270	0,49	2,166	0,654

Tablo III.5- Su/Çimento Oranı 0,45 Olan Betonların Gerçek Bileşimleri

Beton kodu	B E T O N							H A R Ç F A Z I						
	$\frac{E}{C}$	İri Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Hava (1t)	V_p (m^3/m^3)	Komp. (m^3/m^3)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{C}$	Komp. (m^3/m^3)
BK/0,45/0	0,45	0	1392	552	248	36	0	0,715	1392	552	248	0,45	2,523	0,715
BK/0,45/10	0,45	275	1267	502	226	22	0,101	0,752	1410	559	250	0,45	2,523	0,724
BK/0,45/20	0,45	549	1123	445	200	22	0,201	0,778	1407	558	248	0,45	2,523	0,723
BK/0,45/30	0,45	816	975	386	174	26	0,299	0,800	1393	552	244	0,44	2,523	0,716
BK/0,45/35	0,45	943	897	356	160	34	0,346	0,807	1374	545	239	0,44	2,522	0,706
BK/0,45/40	0,45	1094	840	333	150	18	0,401	0,833	1406	558	244	0,44	2,522	0,722

Tablo III.6- Su/Çimento Oranı 0,35 Olan Betonların Gerçek Bileşimleri

Beton Kodu	B E T O N							H A R Ç F A Z I						
	$\frac{E}{C}$	İri Agrega (kg)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	Hava (lt)	V_p (m ³ /m ³)	Komp. (m ³ /m ³)	İnce Agrega (kg)	Çimento (kg)	Su (kg)	$\frac{E}{C}$	$\frac{S}{C}$	Komp. (m ³ /m ³)
BK/0,35/0	0,35	0	1464	567	198	54	0	0,748	1464	567	198	0,35	2,583	0,748
BK/0,35/15	0,35	419	1243	481	169	43	0,153	0,788	1470	569	197	0,35	2,583	0,751
BK/0,35/30	0,35	838	1025	397	139	31	0,307	0,830	1481	573	196	0,34	2,583	0,756
BÇ/0,35/15	0,35	406	1254	486	170	36	0,153	0,794	1482	574	200	0,35	2,583	0,757
BÇ/0,35/30	0,35	815	1035	401	140	24	0,308	0,836	1495	579	200	0,35	2,583	0,764
BG/0,35/15	0,35	416	1253	485	170	35	0,156	0,796	1485	575	199	0,35	2,583	0,759
BG/0,35/30	0,35	824	1024	396	139	30	0,309	0,832	1484	575	196	0,34	2,583	0,758

Tablo III.7- Taze Beton Özellikleri

Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)	Yayılma (cm)	Komp. (m ³ /m ³)	Beton Kodu	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Çökme (cm)	Yayılma (cm)	Komp. (m ³ /m ³)
BK/0,50/0	2150	20	60	0,689	BK/0,65/0	2045	25	-	0,622
BK/0,50/10	2224	18,5	50	0,725	BK/0,65/10	2131	25	-	0,665
BK/0,50/20	2294	9	49	0,760	BK/0,65/20	2211	24,5	-	0,706
BK/0,50/30	2340	3,5	41,5	0,787	BK/0,65/30	2286	22,5	-	0,746
BK/0,50/35	2390	1	39	0,810	BK/0,65/35	2328	19	-	0,767
BK/0,50/40	2390	1	34	0,816	BK/0,65/40	2346	17,5	-	0,781
BÇ/0,50/10	2236	19,5	59,5	0,731	BK/0,45/0	2193	7,5	49	0,715
BÇ/0,50/20	2266	15	49	0,756	BK/0,45/10	2271	3	39	0,752
BÇ/0,50/30	2310	7	44	0,785	BK/0,45/20	2318	1	34	0,778
BÇ/0,50/35	2339	3	41	0,802	BK/0,45/30	2351	0,3	32	0,800
BÇ/0,50/40	2351	3	39	0,812	BK/0,45/35	2356	0	31	0,807
BG/0,50/20	2219	0,5	28	0,739	BK/0,45/40	2418	0	-	0,833
BG/0,50/40	1978	0	28	0,682	BK/0,35/0	2229	2	-	0,748
FK/0,50/0	2045	10	50	0,658	BK/0,35/15	2312	1	-	0,788
FK/0,50/20	2193	5,5	42	0,730	BK/0,35/30	2398	0,5	-	0,830
FK/0,50/40	2309	1	38	0,791	BÇ/0,35/15	2316	2	-	0,794
					BÇ/0,35/30	2390	1	-	0,836
					BG/0,35/15	2324	1	-	0,796
					BG/0,35/30	2383	0,5	-	0,832

Tablo III.8- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,65$)

Tablo III.9- Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,50$)

Tablo III.11 - Sertleşmiş Beton Özellikleri ($E/C = 0,35$)

Tablo III.12 - Taşlar Üzerinde Yapılan Deneylerin Sonuçları

Özellik	Kalker Taşı (ortalama)	Granit Taşı (ortalama)
Aşınma (mm)	2,62	0,64
Schmidt Sertliği	41	53
Dinamik E-Modülü (N/mm ²)	83198	—

Tablo IV.1 - Aşınma ile Beton Özellikleri Arasındaki İlişkiyi Belirliyen Bağlantılar

İncelenen Özellik	Aşınma ile İncelenen Özellik Arasındaki Bağntı	Korelasyon Katsayısı	Korelasyon Kat. Kritik Değeri	
			795 güv.	799 güv.
Birim Ağırlık (kg/m ³)	Kalker kırmataşlı serilerde $h = 12,37 \cdot \Delta^{-1,83}$	0,542	0,273	0,354
Basınç Mukavemeti (N/mm ²)	Kalker kırmataşlı serilerde $h = 23,04 \cdot R^{-0,66}$	0,792	0,250	0,325
	Çakıllı ve granit kırmataşlı ser. $h = 1,78 \cdot R^{-0,14}$	0,134	0,413	0,526
Eğilme Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Kalker kırmataşlı serilerde $h = 4,23 \cdot T^{-0,55}$	0,657	0,250	0,325
Dinamik E-Modülü (N/mm ²)	Kalker kırmataşlı serilerde $h = 309,2 \cdot E_d^{-0,45}$	0,567	0,250	0,325
Schmidt Sertliği	Kalker kırmataşlı serilerde $h = 7,84 - 0,142 \cdot Sc$	0,709	0,273	0,354

Tablo IV.2 - Araştırılan Harç ve Betonların Aşınma Devir Sayısı Olarak Ortalama Aşınma Ömürleri

V_p	BK Serisi Karışımlar				BÇ Serisi Karışımlar		BG Serisi Karışımlar		FK Serisi Karışımlar
	E/C = 0,35	E/C = 0,45	E/C = 0,50	E/C = 0,65	E/C = 0,50	E/C = 0,35	E/C = 0,50	E/C = 0,35	
0	2029 (186) [100]	1468 (135)	1089 (100)	828 (76)	1089 (100)	2029 [100]	1089 (100)	2029 [100]	700 (64)
0,10	-	1426 (120)	1186 (100)	924 (78)	1754 (148)	-	-	-	-
0,15	1897 [100]	-	-	-	-	2509 [132]	-	2023 [107]	-
0,20	-	1349 (136)	994 (100)	825 (83)	3286 (331)	-	1847 (186)	-	811 (82)
0,30	1724 (150) [100]	1237 (108)	1146 (100)	910 (79)	3825 (334)	3182 [185]	-	2147 [125]	-
0,35	-	1284 (106)	1217 (100)	915 (75)	3590 (295)	-	-	-	-
0,40	-	1270 (110)	1155 (100)	946 (82)	5303 (459)	-	1994 (173)	-	840 (73)

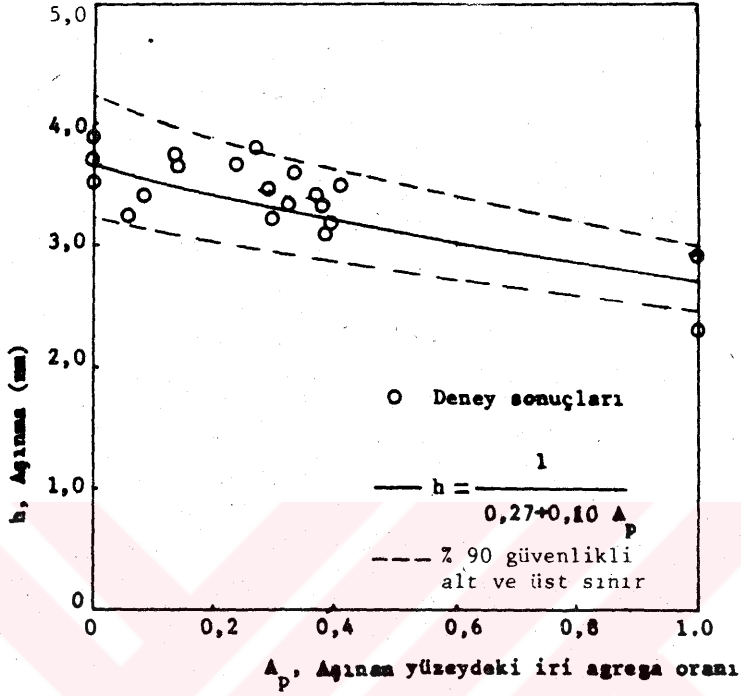
NOT: Yuvarlak parantez içindeki sayılar BK/0,50 serisine, köşeli parantez içindeki sayılar ise BK/0,35 serisine oranlanmış değerlerdir.

Tablo IV.3 - Misaade Edilen Aşınma Sınır Değerleri (DIN 52108)

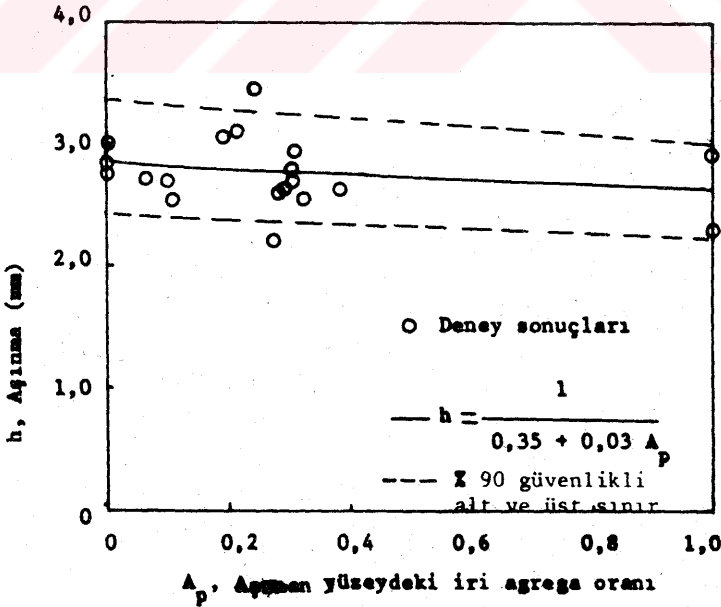
Kaldırım Plakları ve Bordür Taşları	Sert Beton Kaplamaları			Beton Şose Kaplamları
	Az kullanılan	Orta derecede kullanılan	Çok kullanılan	
3 mm	0,7-1,4 mm	0,5-1,4 mm	0,4-1,4 mm	Taş : 2 mm Beton : 3,5 mm (kuru halde) Beton : 6,5 mm (yaş halde)

Tablo IV.4 - Aşınmaya Dayanıklı Beton Karışımları İçin Pratik Reçeteler

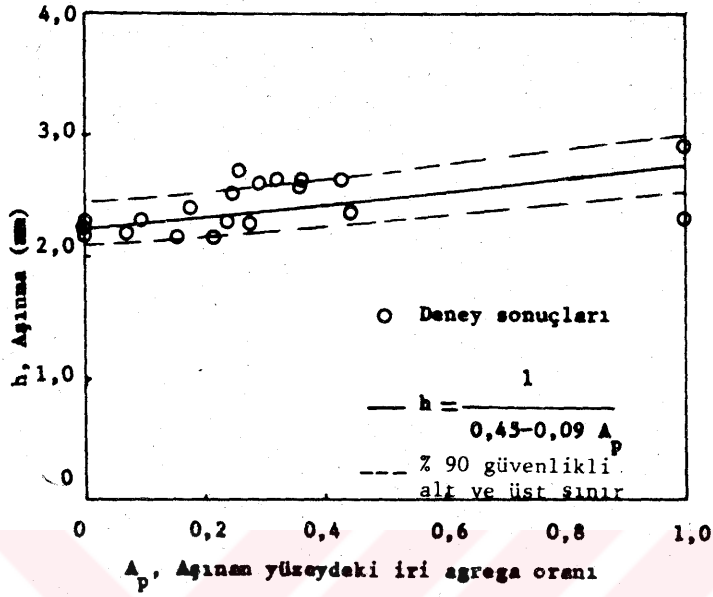
Agregalar	Bağlayıcı	Katkı Maddesi
Karabiga Kumu : 871 kg/m^3 (0-7 mm) Podima Çakılı : 925 kg/m^3 (15-30 mm)	Çimento : 362 kg/m^3 Su : 181 kg/m^3	-
Karabiga Kumu : 1035 kg/m^3 (0-7 mm) Podima Çakılı : 815 kg/m^3 (15-30 mm)	Çimento : 401 kg/m^3 Su : 140 kg/m^3	Süperakışkanlaştırıcı 6 kg/m^3
Karabiga Kumu : 1024 kg/m^3 (0-7 mm) Granit Kırmataşı : 824 kg/m^3 (15-30 mm)	Çimento : 396 kg/m^3 Su : 139 kg/m^3	Süperakışkanlaştırıcı 6 kg/m^3
Karabiga Kumu : 897 kg/m^3 (0-7 mm) Kalker Kırmataşı : 943 kg/m^3 (15-30 mm)	Çimento : 356 kg/m^3 Su : 160 kg/m^3	-
Karabiga Kumu : 1025 kg/m^3 (0-7 mm) Kalker Kırmataşı : 838 kg/m^3 (15-30 mm)	Çimento : 397 kg/m^3 Su : 139 kg/m^3	Süperakışkanlaştırıcı 6 kg/m^3



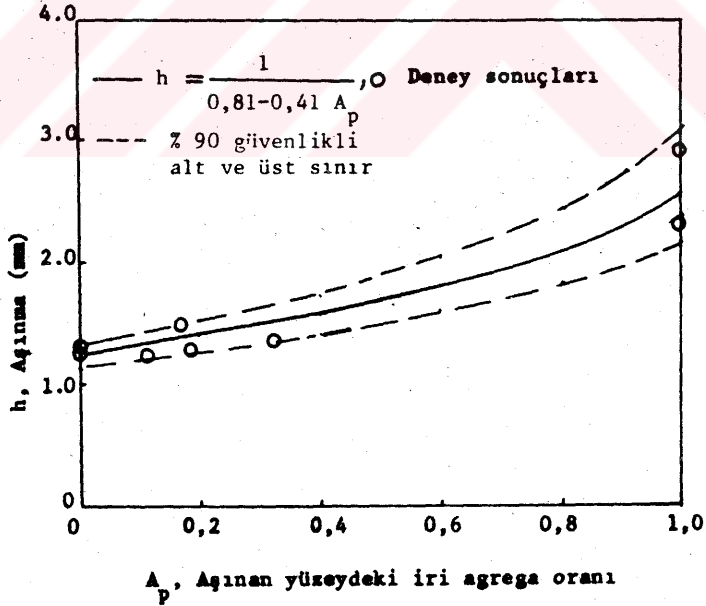
Şekil IV.1 - BK/0,65 Serisi betonlarda h - A_p ilişkisi



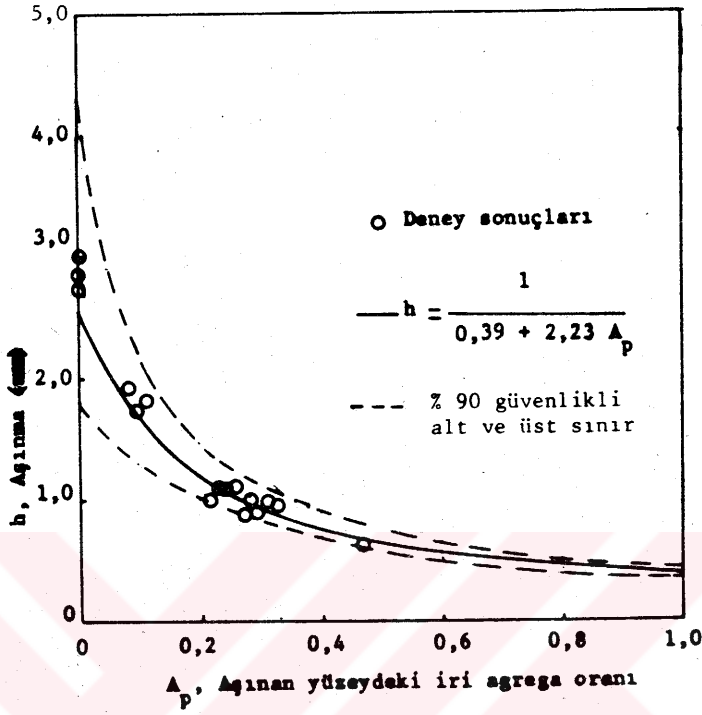
Şekil IV.2 - BK/0,50 Serisi betonlarda h - A_p ilişkisi



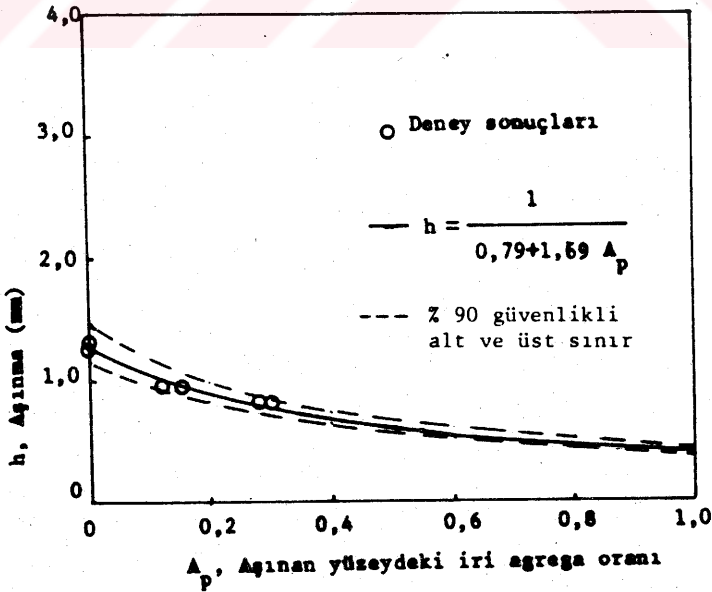
Şekil IV.3 - BK/0,45 Serisi betonlarda $h-A_p$ ilişkisi



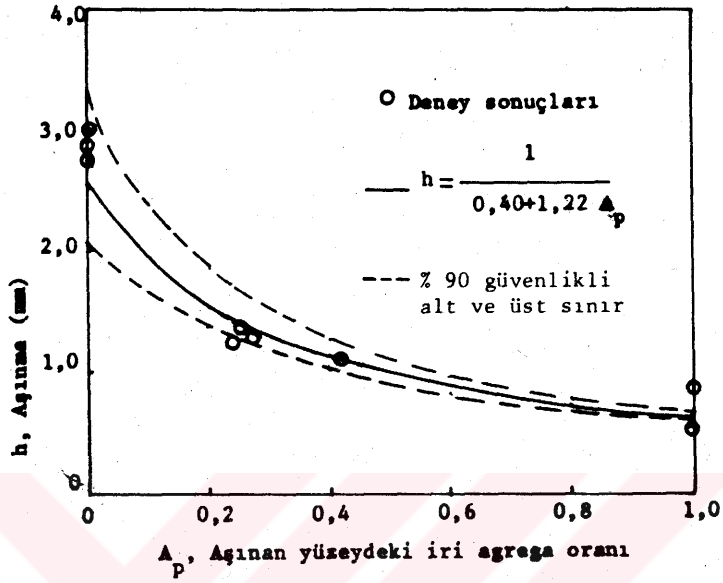
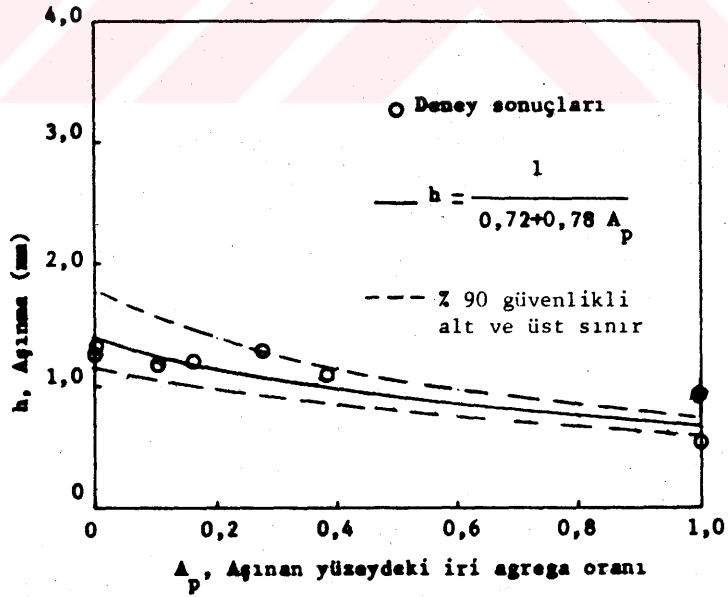
Şekil IV.4 - BK/0,35 serisi betonlarda $h-A_p$ ilişkisi

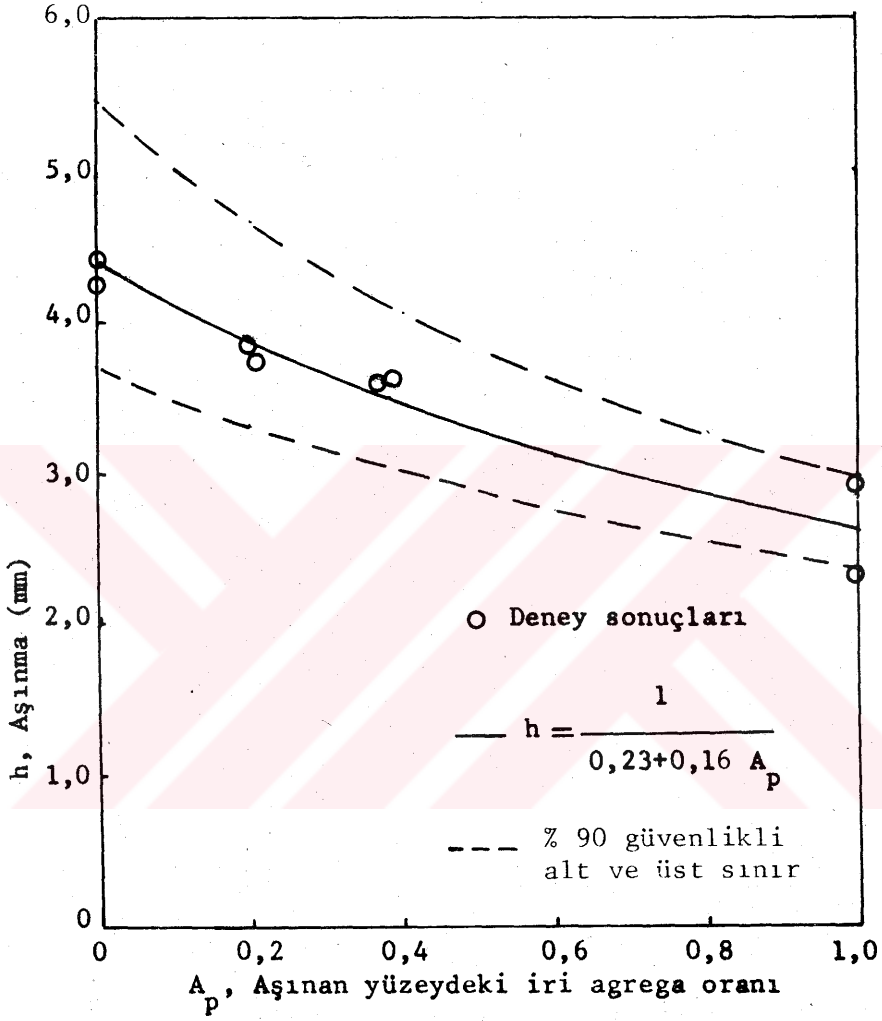


Şekil IV.5 - BÇ/0,50 Serisi betonlarda $h-A_p$ ilişkisi

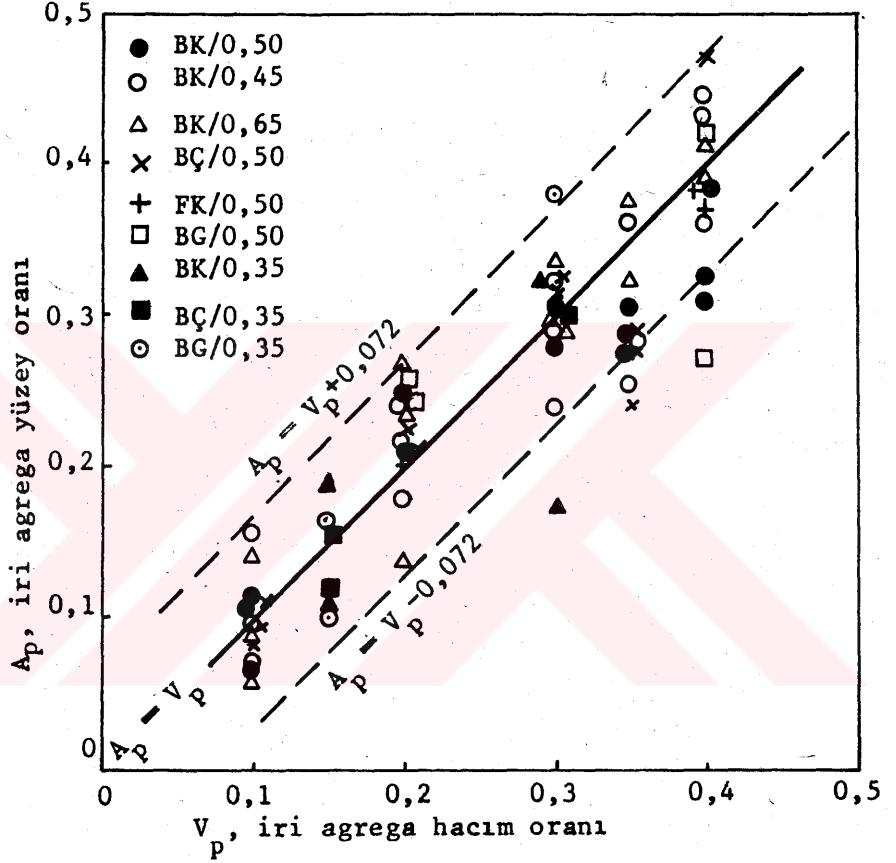


Şekil IV.6 - BÇ/0,35 Serisi betonlarda $h-A_p$ ilişkisi

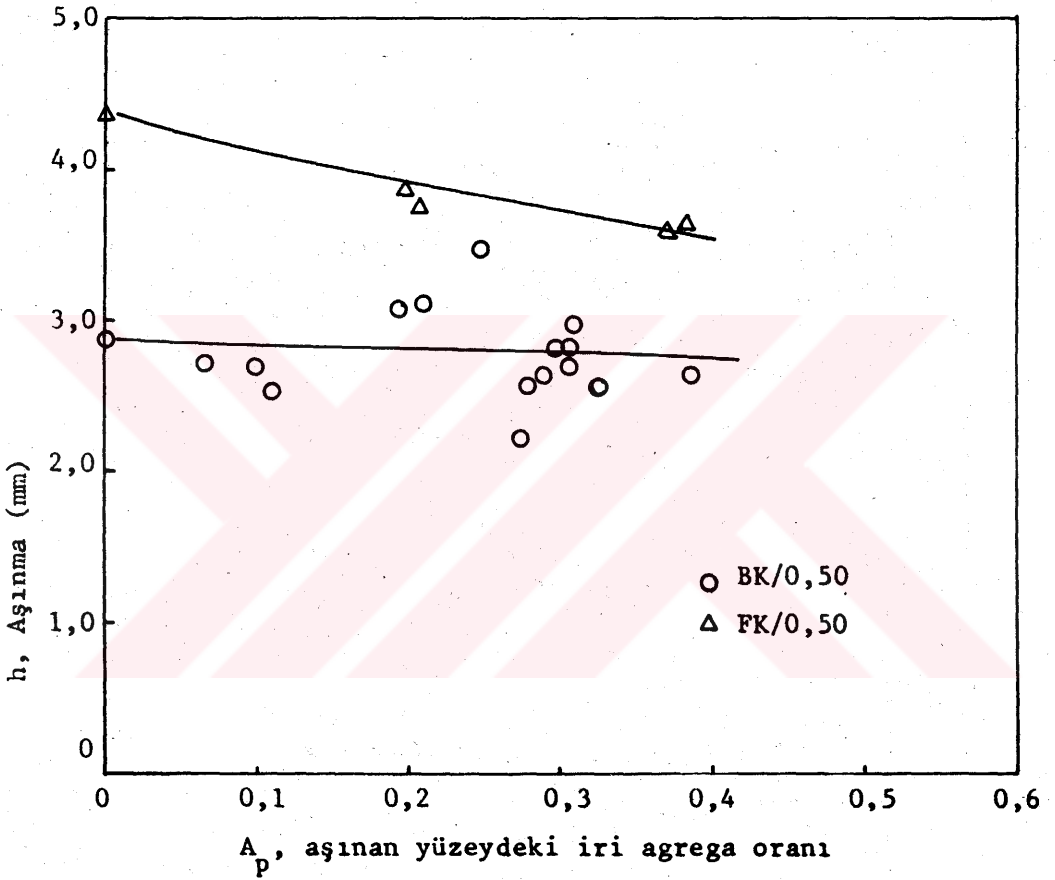
Şekil IV.7 - BG/0,50 Serisi Betonlarda $h-A_p$ ilişkisiŞekil IV.8 - BG/0,35 Serisi betonlarda $h-A_p$ ilişkisi



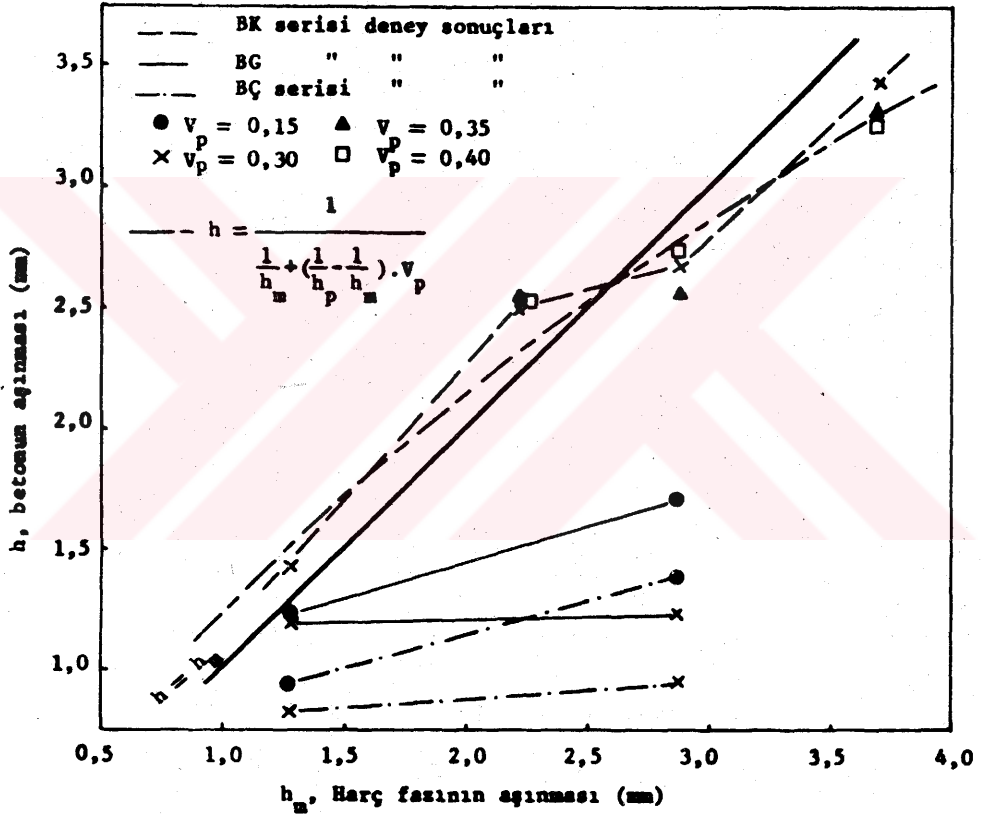
Şekil IV.9 - FK/0,50 Serisi betonlarda h - A_p ilişkisi



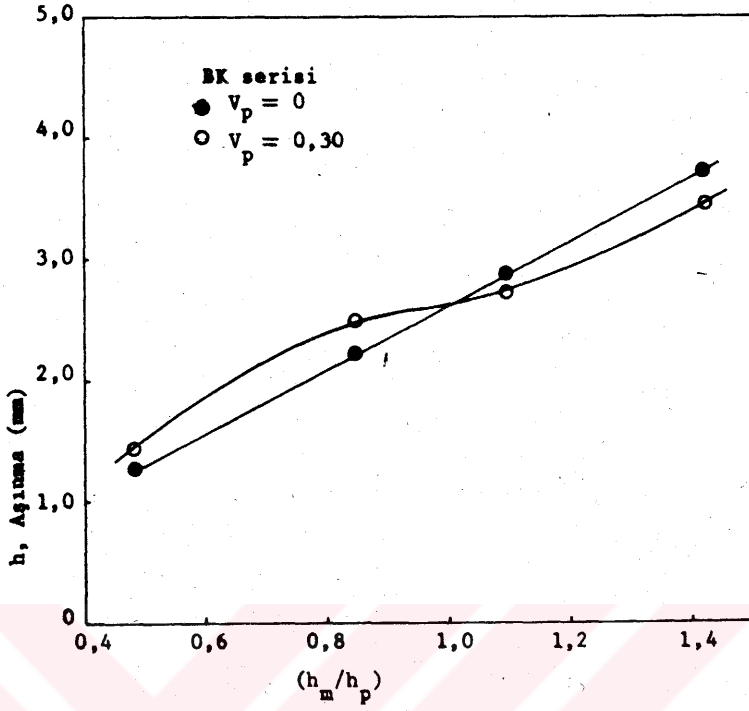
Şekil IV.10 - İri agrega fazı hacim oranı ile yüzey oranı arasındaki korelasyon



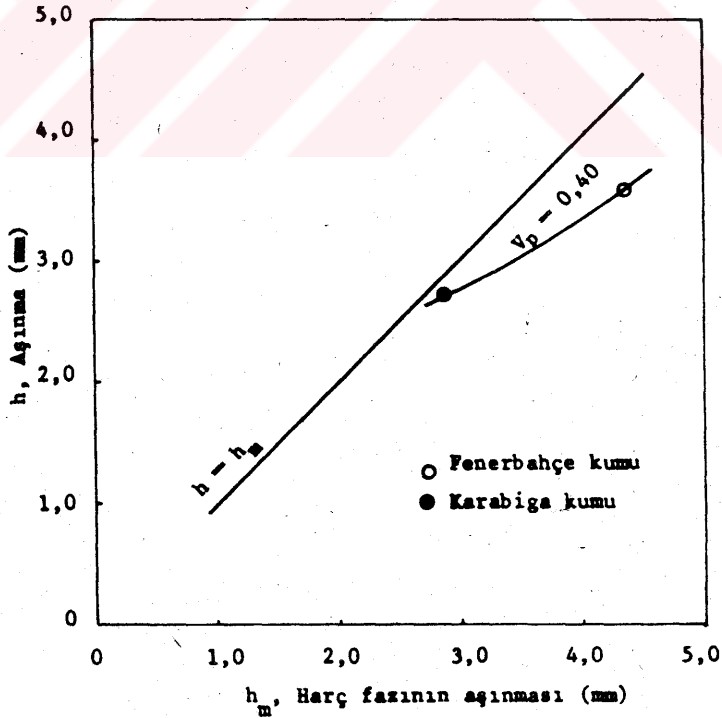
Şekil IV. 11 - Kum Çinsinin $h-A_p$ ilişkisine etkisi



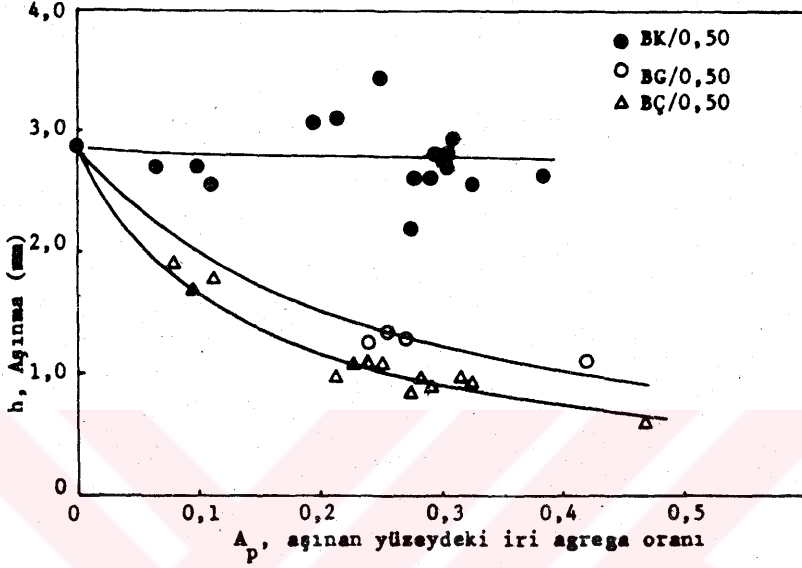
Şekil IV.12 - Harç fazının aşınmasının betonun aşınmasına etkisi



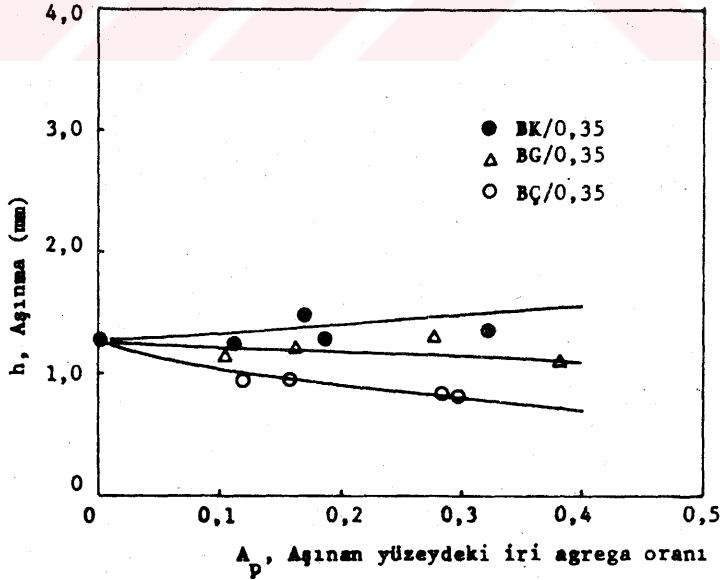
Şekil IV.13 - Aşınmanın h_m/h_p oranıyla değişimi



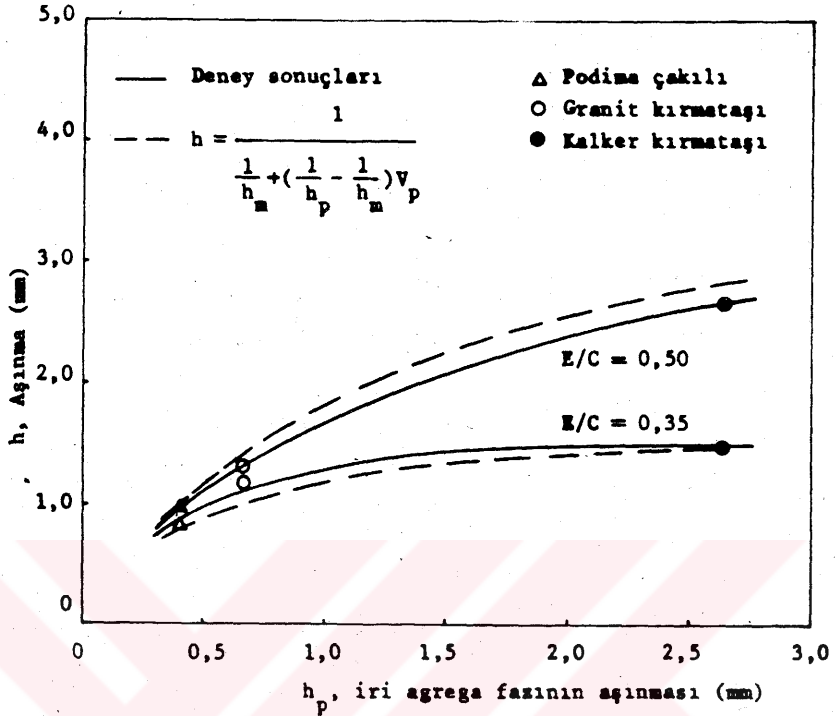
Şekil IV.14- Harç fazının aşınmasının, E/C oranı 0,50 olan kalker kırmetaşlı betonların ($v_p = 0,40$) aşınmasına etkisi



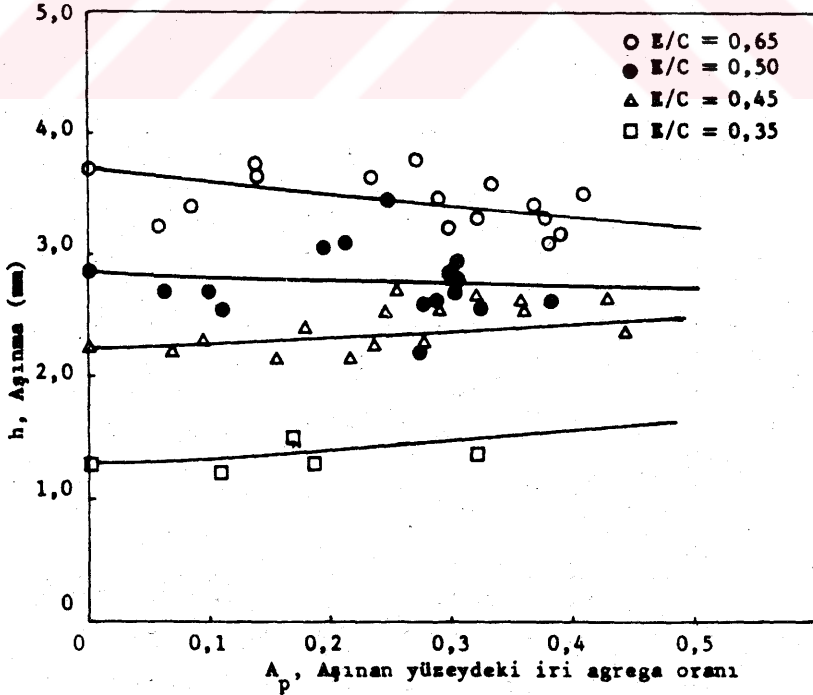
Şekil IV.15- E/C oranı 0,50 olan karışımlarda iri agreganın $h-A_p$ ilişkisine etkisi



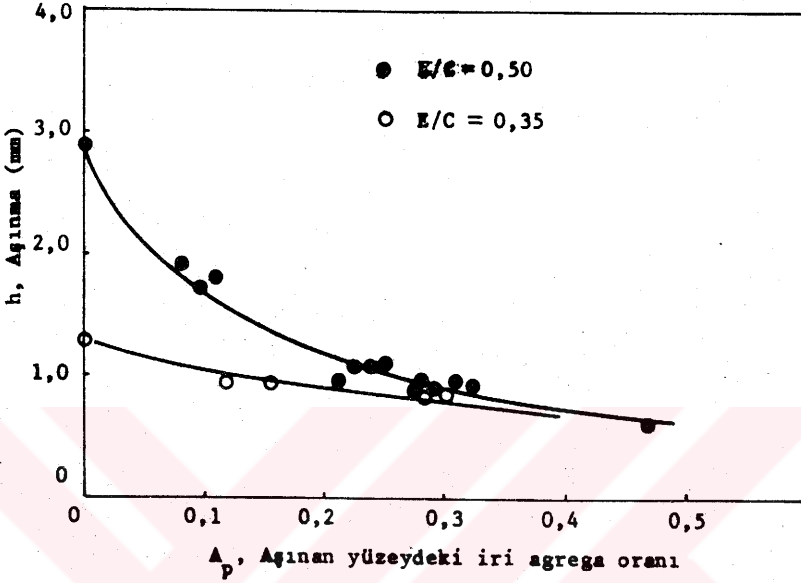
Şekil IV.16 - E/C oranı 0,35 olan karışımlarda iri agreganın $h-A_p$ ilişkisine etkisi



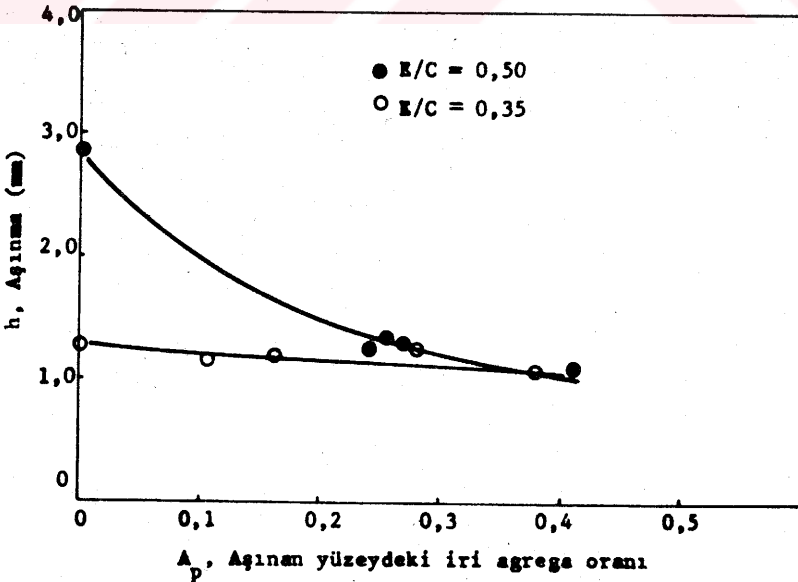
Şekil IV.17 - İri agregre fazının aşınmasının, $V_p = 0,30$ olan betonların aşınmasına etkisi



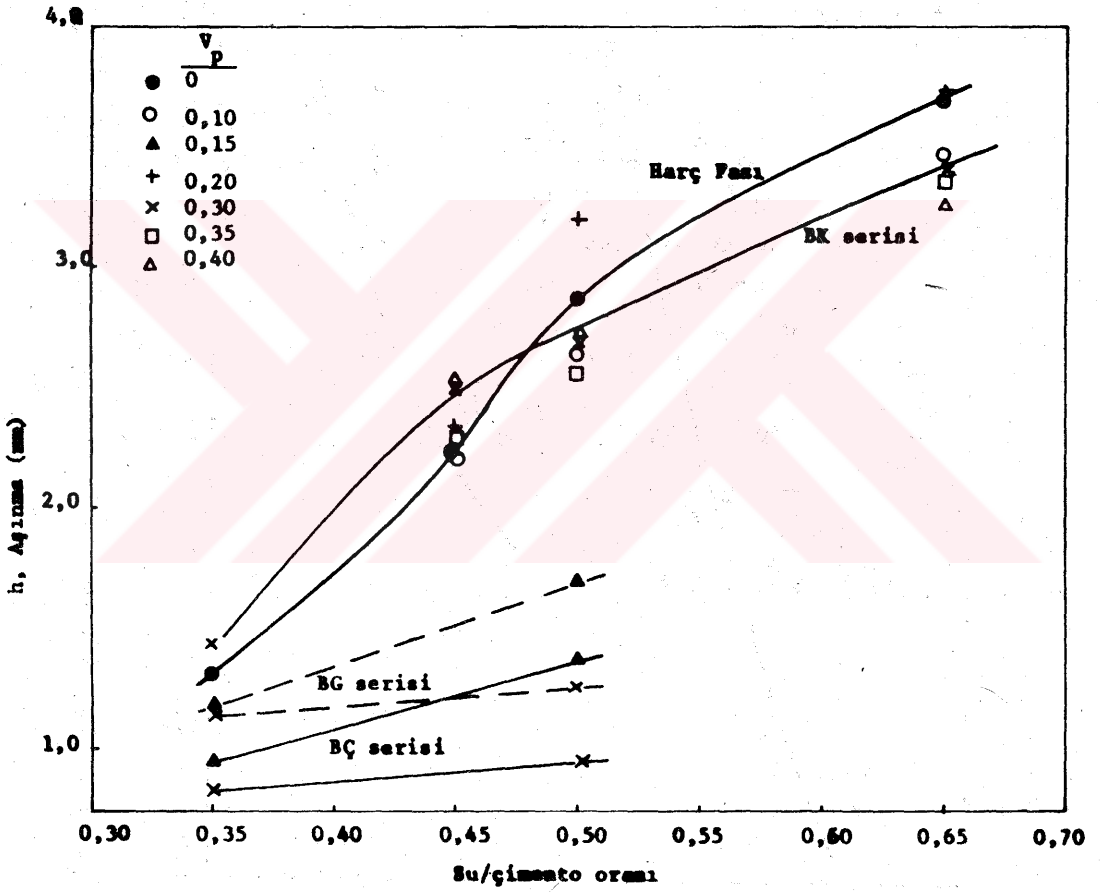
Şekil IV.18 - BK Serisi betonlarda E/C oranının $E-A_p$ ilişkisine etkisi



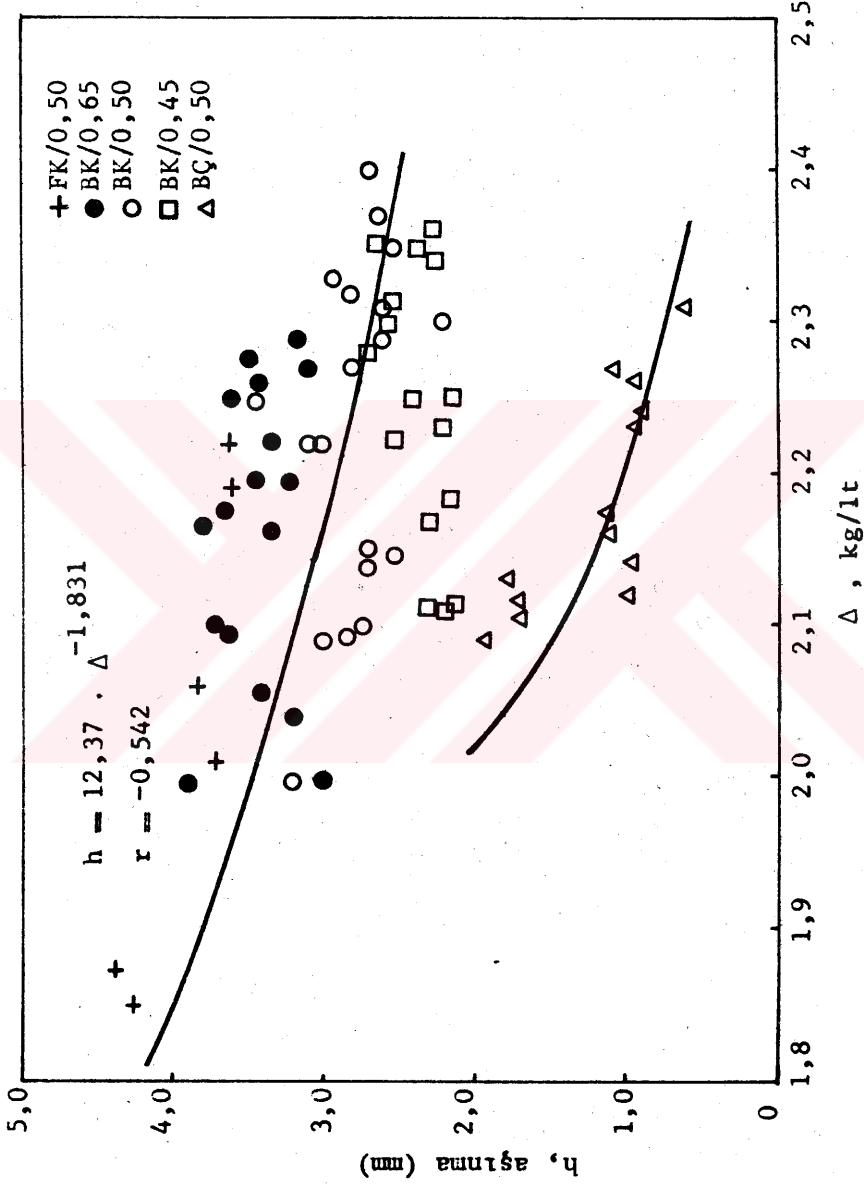
Şekil IV.19- BÇ Serisi betonlarda E/C oranının h- A_p ilişkisine etkisi



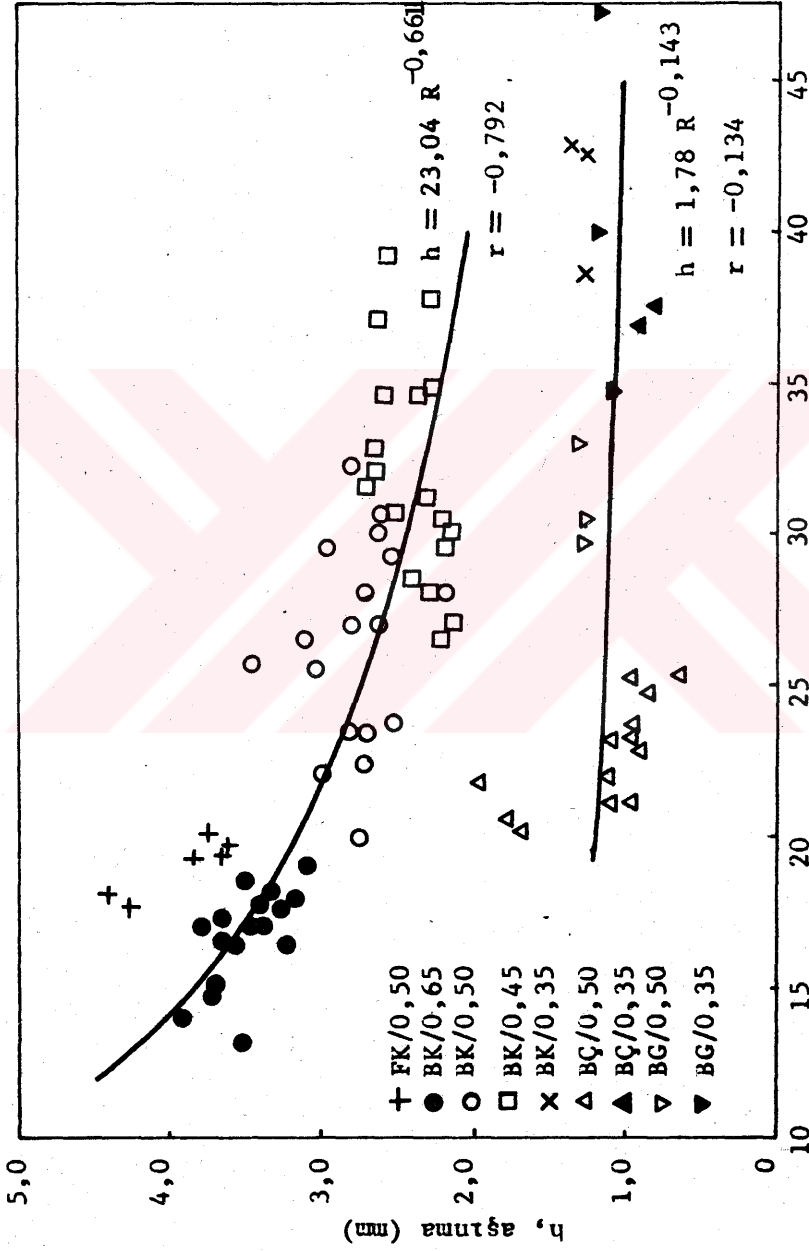
Şekil IV.20 - BG serisi betonlarda E/C oranının h- A_p ilişkisine etkisi



Şekil IV.21 - Su /çimento oranının ağırlığa etkisi

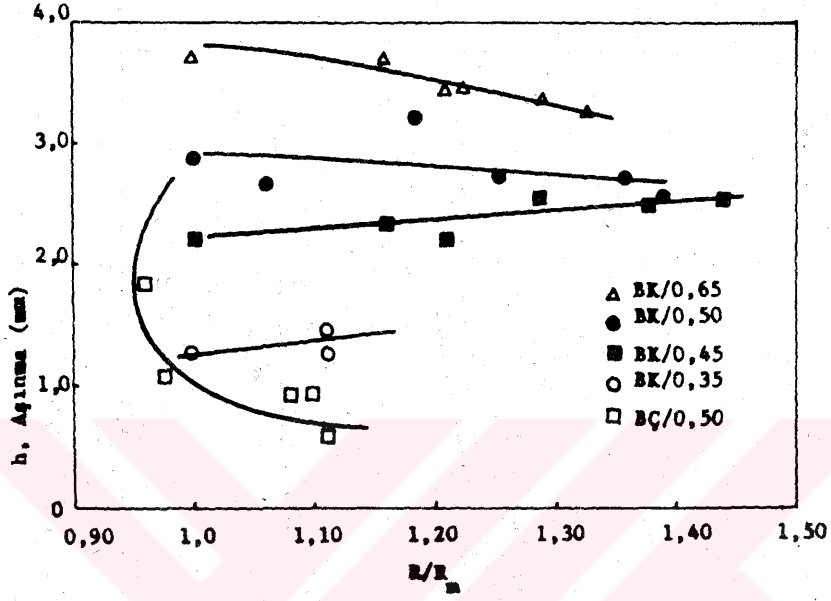


Şekil IV.22- Aşınma ile birim ağırlık arasındaki ilişki

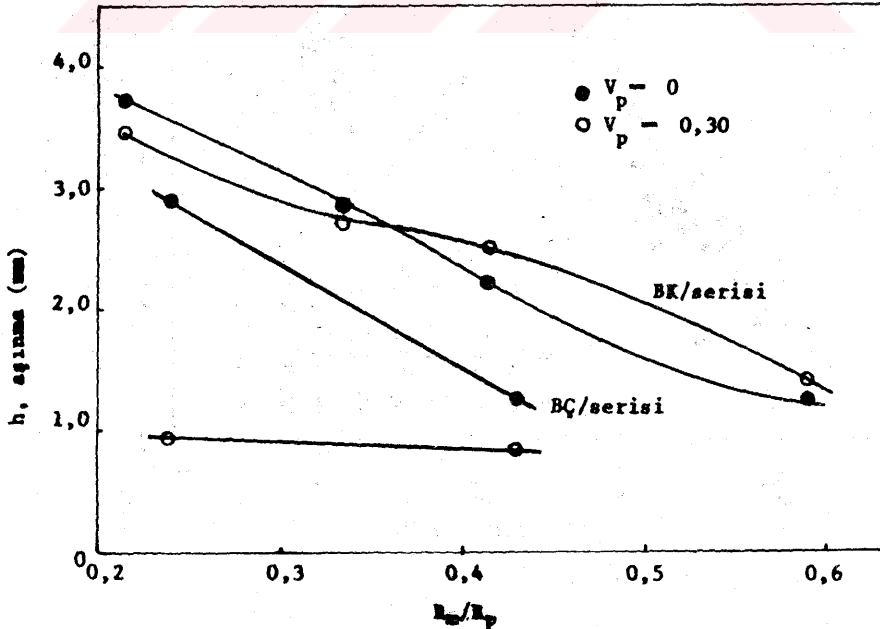


R , 28 günlük küp basınç mukavemeti (N/mm^2)

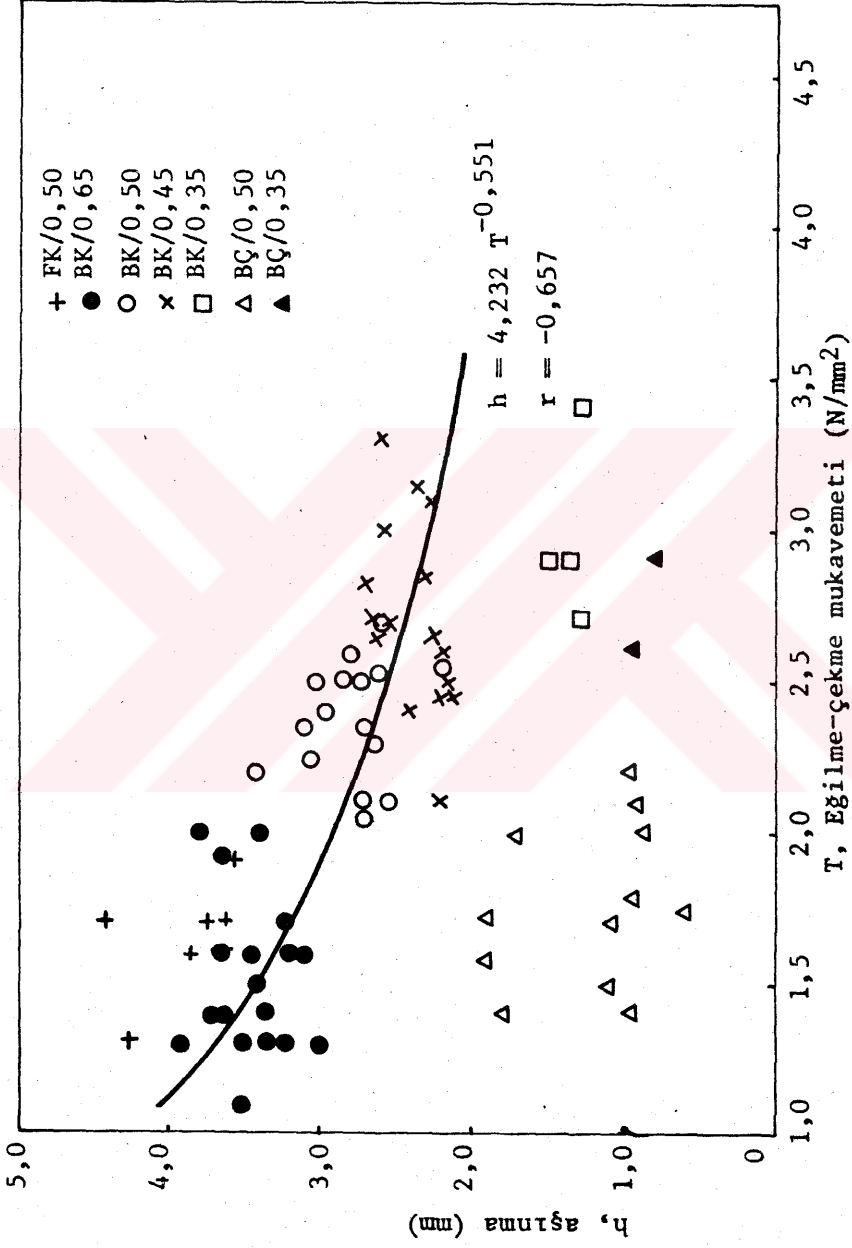
Şekil IV.23- Aşınma ile 28 günlük eşdeğer küp mukavemeti arasındaki ilişki



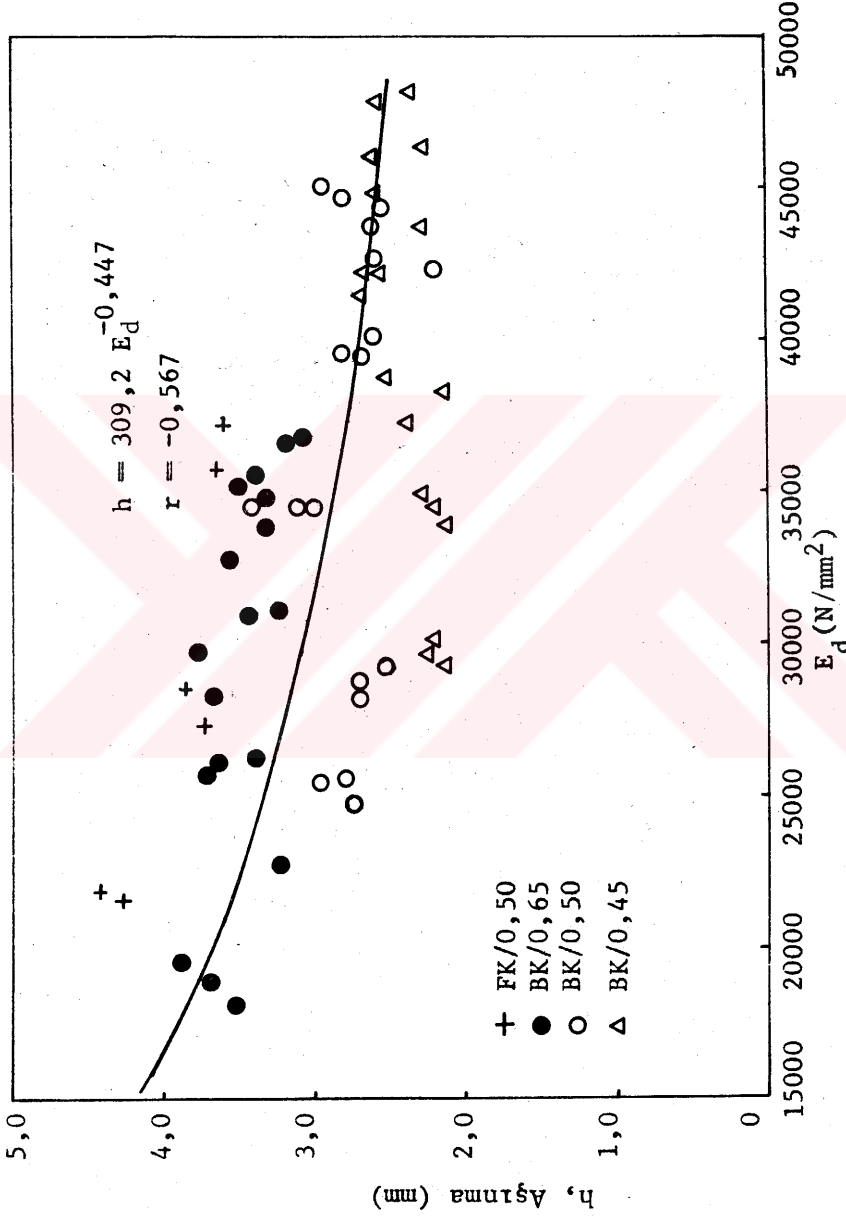
Şekil IV.24- Ağınlığın R/R_m Oranı ile Değişimi



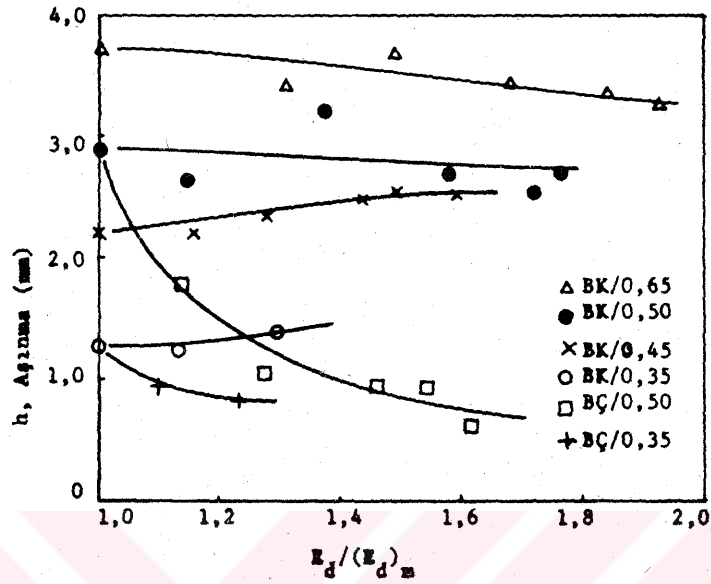
Şekil IV.25- Ağınlığın R_m/R_p oranı ile değişimi



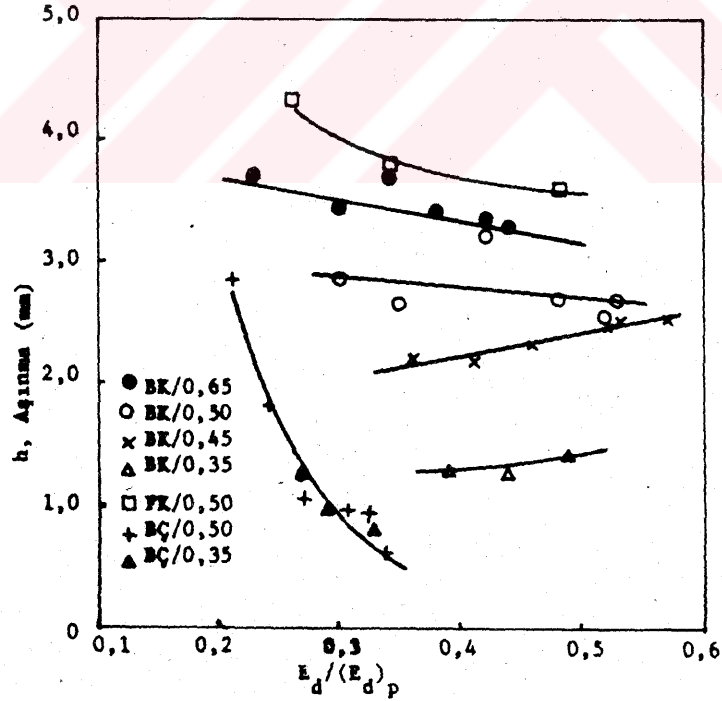
Şekil IV.26- Aşınma ile 28 günlük eğilme-çekme mukavemeti arasındaki ilişki



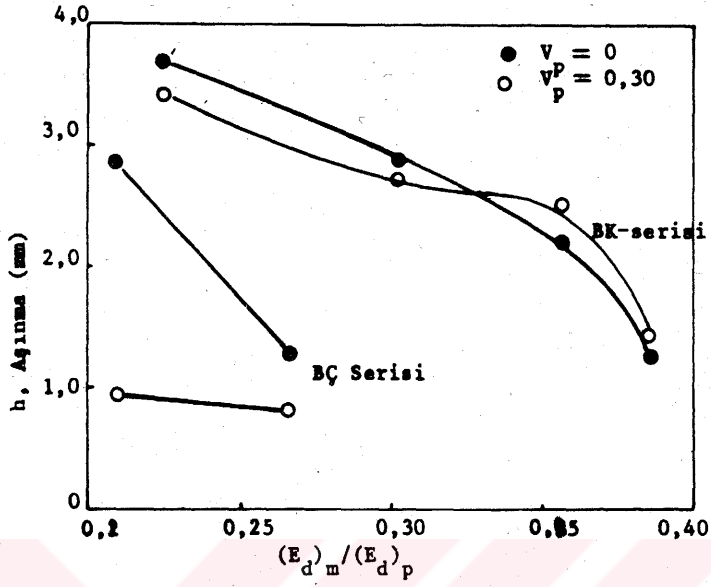
Şekil IV.27- Aşınma ile dinamik elastisite modülü arasındaki ilişki



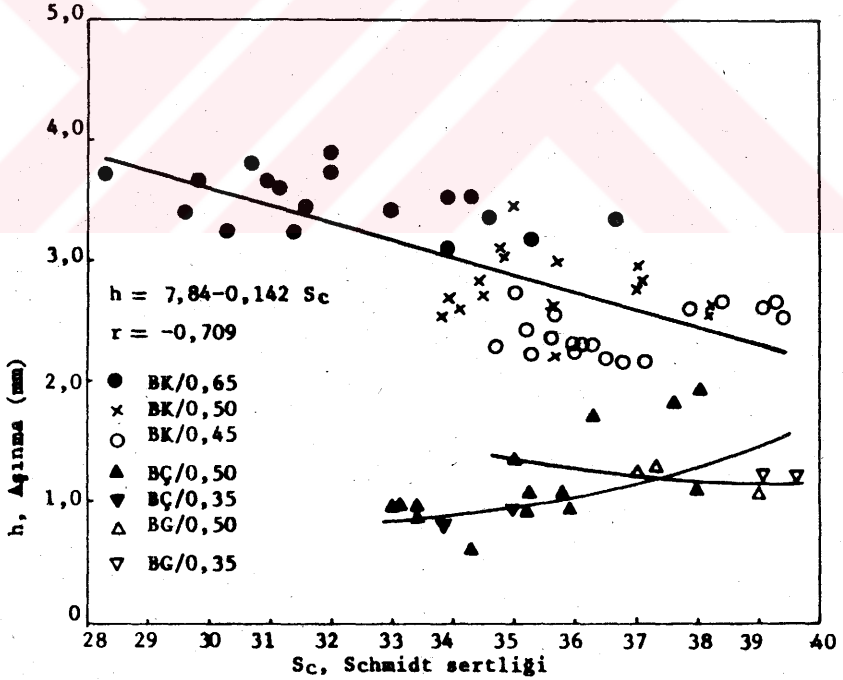
Şekil IV.28- Aşınmanın $E_d/(E_d)_m$ oranı ile değişimi



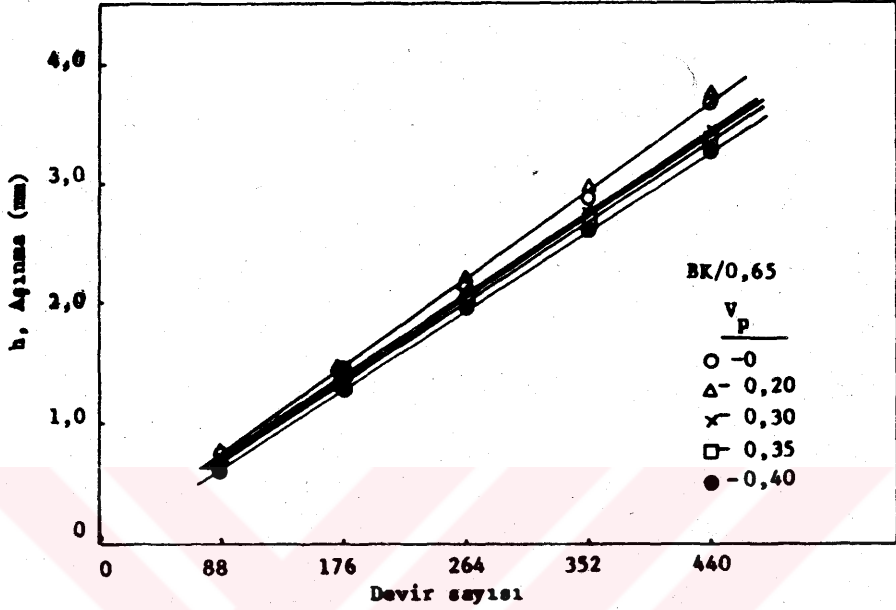
Şekil IV.29- Aşınmanın $E_d/(E_d)_p$ oranıyla değişimi



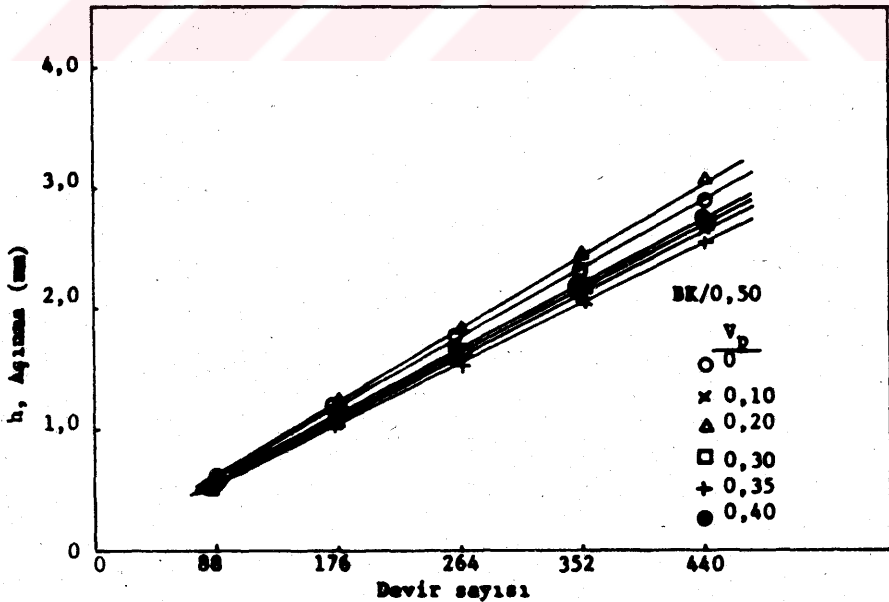
Şekil IV.30- Aşınmanın $(E_d)_m / (E_d)_p$ oranı ile değişimi



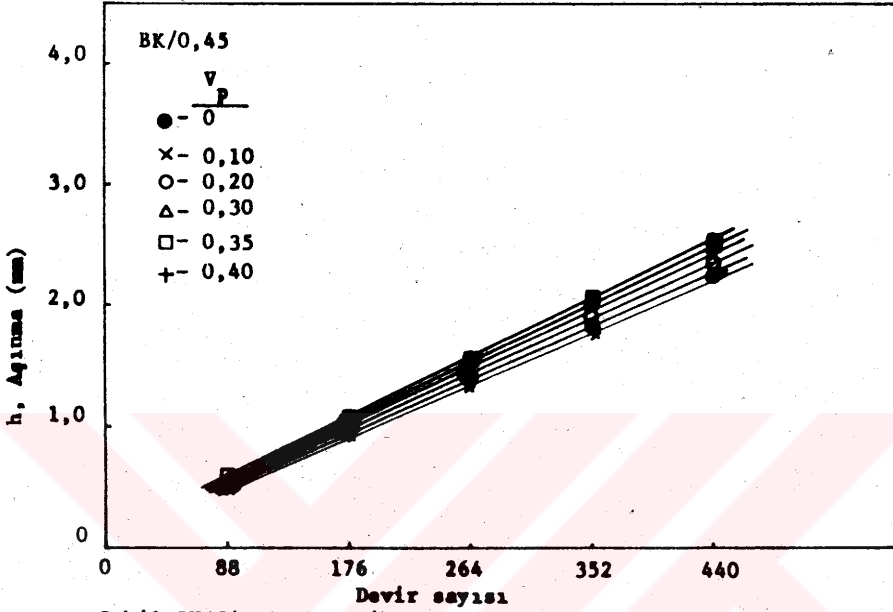
Şekil IV.31- Aşınma ile Schmidt sertliği arasındaki ilişki



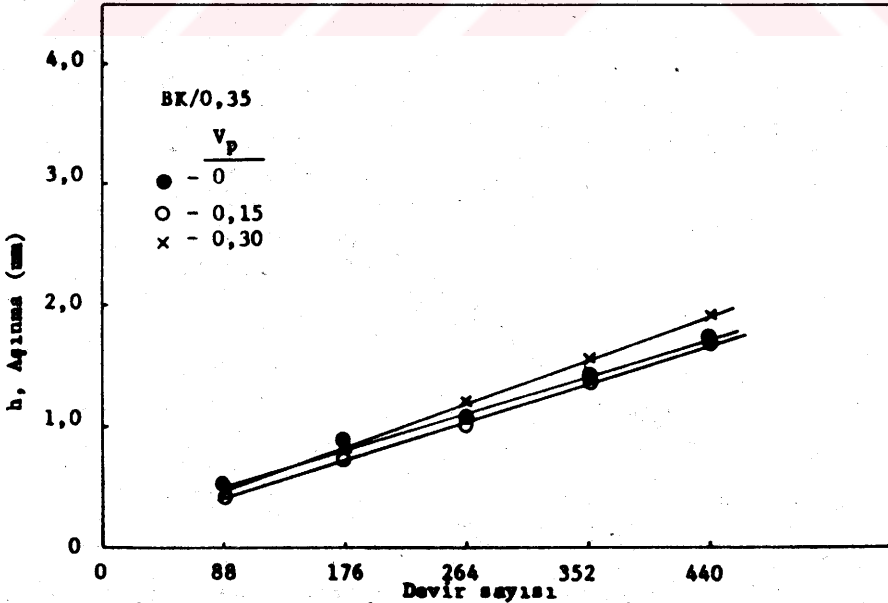
Şekil IV.32- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi



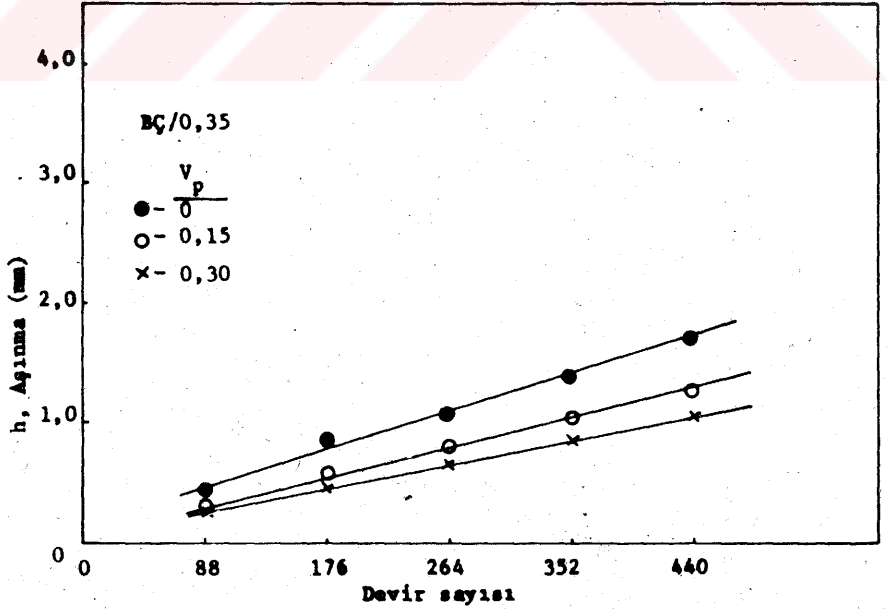
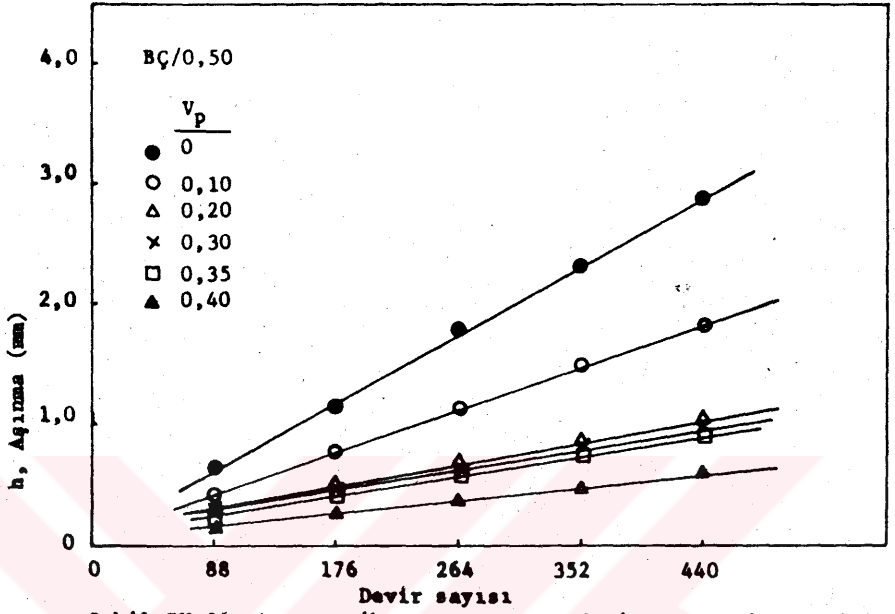
Şekil IV.30- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi

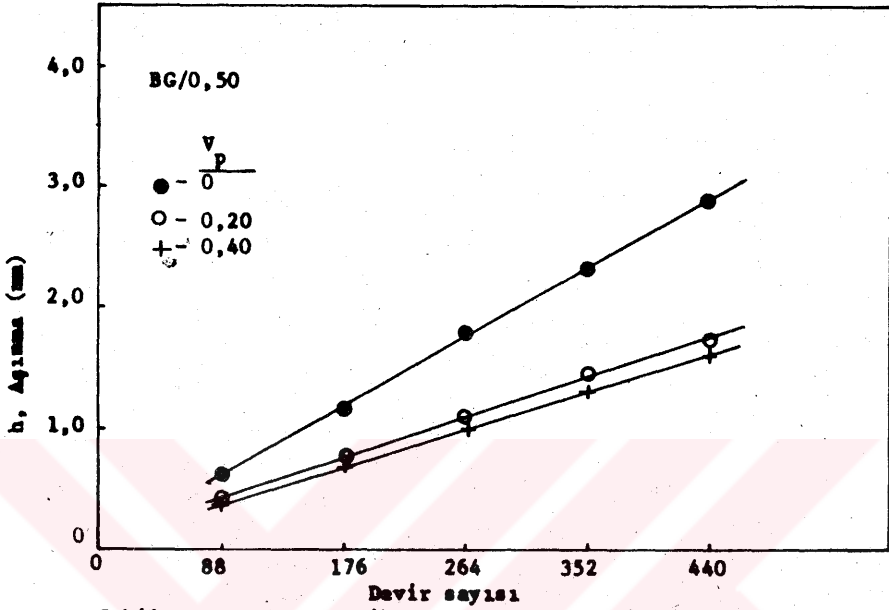


Şekil IV.34- Ağızma miktarının ağızma devir sayısı ile değişimi

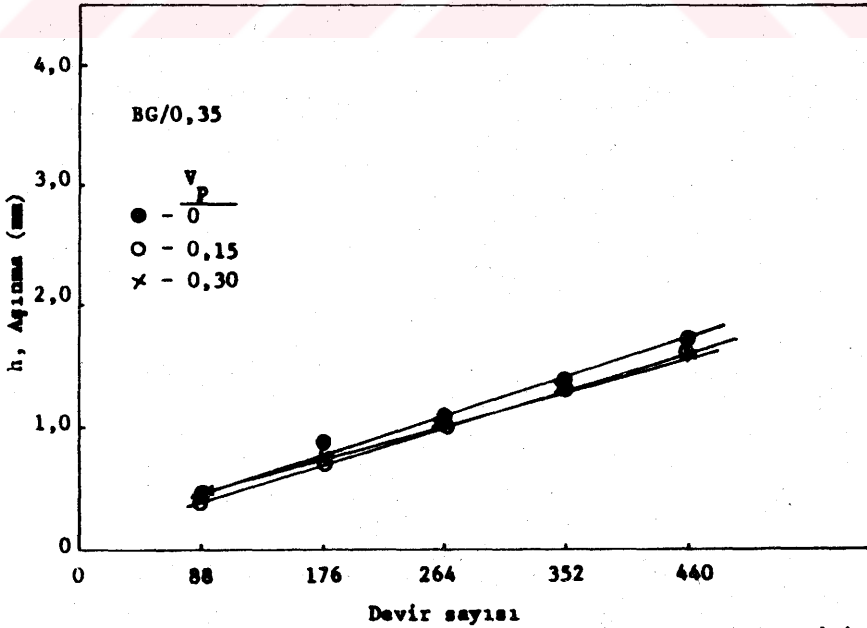


Şekil IV.35 -Ağızma miktarının ağızma devir sayısı ile değişimi

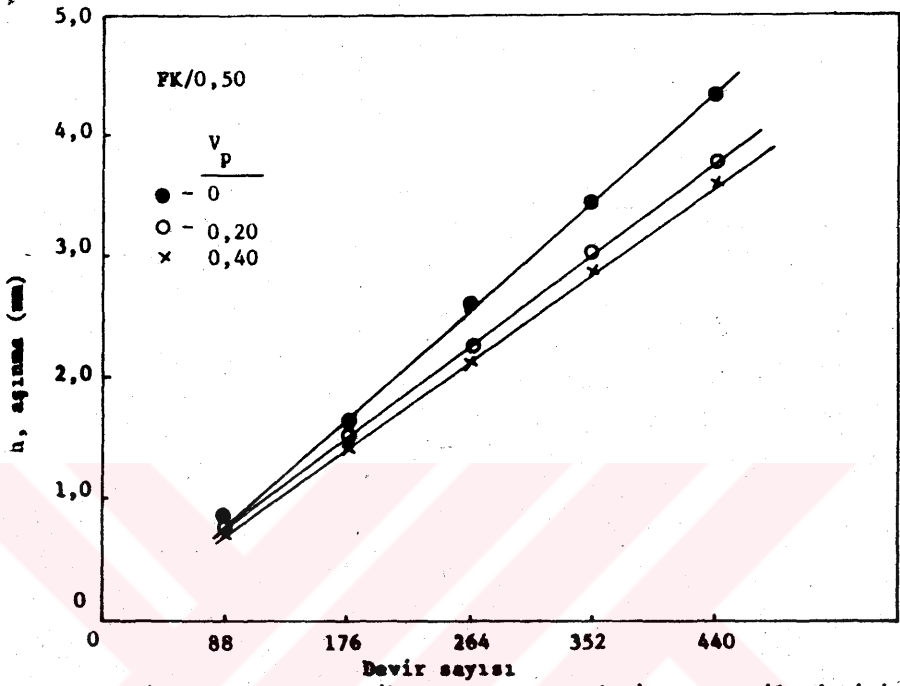




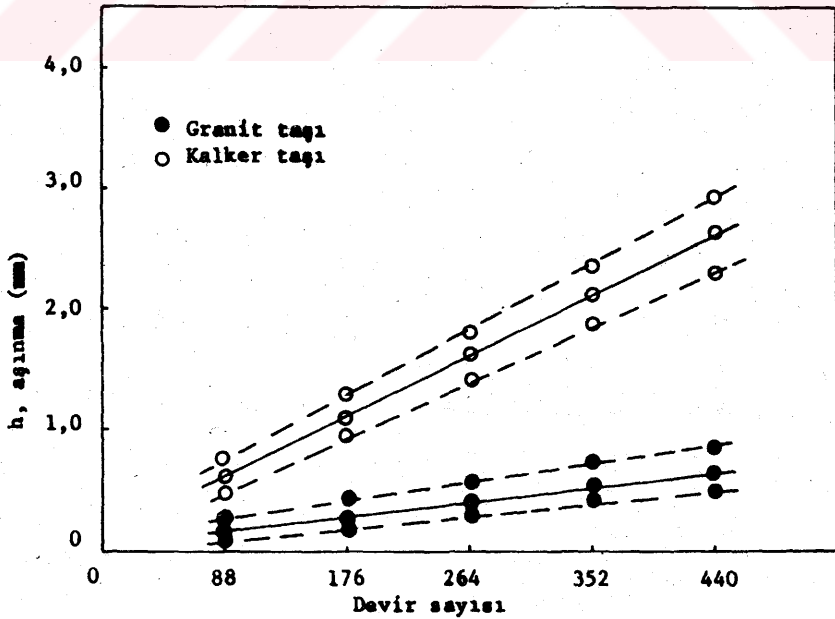
Şekil IV.38- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi



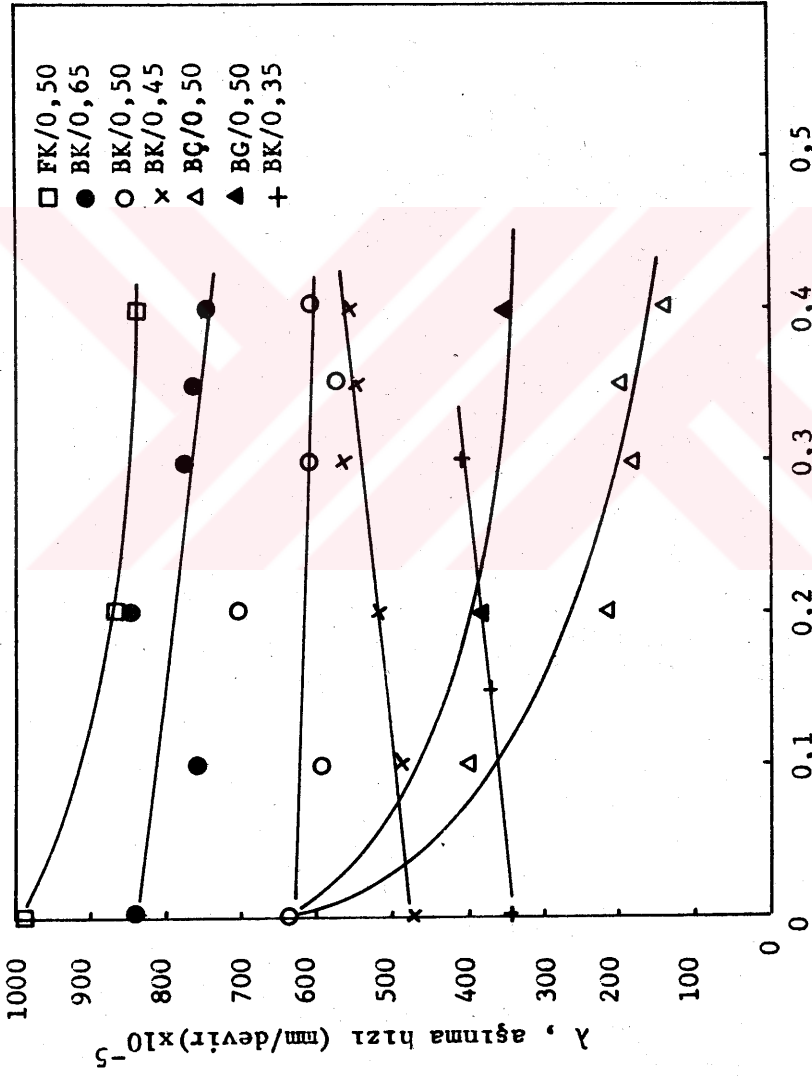
Şekil IV.39- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi



Şekil IV.40- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi



Şekil IV.41- Aşınma miktarının aşınma devir sayısı ile değişimi



A_p , aşınan yüzeydeki iri agrega oranı

Şekil IV.42- Aşınma hızının iri agrega yüzey oranı ile değişimi

LİTERATÜR LİSTESİ

- (1) F.P.Bowden, D.Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford at the Clarendon Press, 1954, Part I
- (2) D.Godfrey, "Lubrication", Symposium on Properties of Surfaces, ASTM Publication STP 340, 1963, pp 105-119
- (3) M.Akkurt, "Makina Elemanları", İstanbul, 1980, Cilt II
- (4) N.Özdaş, "Sürtme ve Aşınma Teorileri", İ.T.Ü. Kütüphanesi, İstanbul, 1958
- (5) F.P.Bowden, D.Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", Oxford at the Clarendon Press, 1964, Part II
- (6) E.Robinowicz, "Friction and Wear of Materials", John Wiley, 1966
- (7) N.P.Suh, A.P.L.Turner, "Elements of Mechanical Behaviour of Solids", Mc.Graw Hill, 1978
- (8) I.V.Kragelzkii, "Friction and Wear", translated from Russian by Leo Ronson, Rutter Worths, London, 1965
- (9) J.F.Archard, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces", Journal of Applied Physics, V.24, No:8, 1953
- (10) K.Onaran, "Bazı Çelik ve Alüminyum Alaşımlarının Kaymalı Yuvarlanma Halinde Aşınma ve Sürtünmesinin Kantitatif Analizi", Doktora Tezi, İ.T.Ü., 1960

- (11) M.Akkurt, "Makina Konstrüksiyonunda Güvenirliğin Esasları", Makina Mühendisleri Odası Yayını, No:106, İstanbul, 1977
- (12) M.E.Prior, "Abrasion Resistance", ASTM Special Technical Publication, No:169-A, 1966, pp 246-260
- (13) G.Braun, "Der Fussboden", Bauverlag GMBH-Wiesbaden-Berlin
- (14) W.Grün, "Beton 2-Spezialbeton", Werner-Verlag, Düsseldorf, 1964
- (15) C.L.a'Court, "Mix Design and Abrasion Resistance of Concrete", Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, 1954, p 77
- (16) J.L.Sawyer, "Wear Tests on Concrete Using the German Standard Method of Test and Machine" ASTM Proceedings, V.57, 1957, p 1143
- (17) E.Plassmann, "Method of Testing Hard Concrete Surfaces Through the Pressure of Rolling Balls", Zement-Kalk-Gips, May 1954, pp 213-216
- (18) B.Fentress, "Slab Construction Practices Compared by Wear Tests", ACI Journal, Proceedings V.70, No:7, July 1973
- (19) F.L.Smith, "Effect of Aggregate Quality on Resistance of Concrete to Abrasion", ASTM Special Technical Publication No:205, 1956, p 91
- (20) L.P.Witte, J.E.Backstrom, "Some Properties Affecting the Abrasion Resistance of Air-Entrained Concrete", ASTM Proceedings, V.51, 1951, p 1141

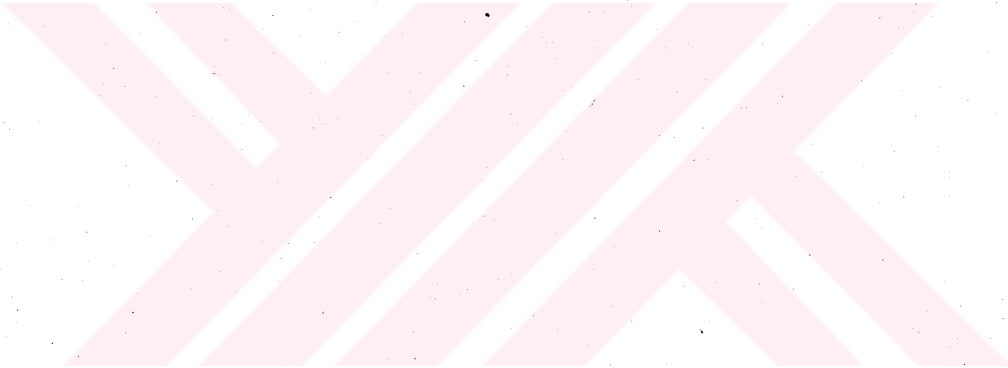
- (21) G.E.Burnett, M.R.Spindler, "Effect of Time of Application of Sealing Compound on the Quality of Concrete", ACI Proceedings, V.49, 1952, p 193
- (22) Shu-t'ien Li, "Wear-Resistant Concrete Construction", ACI Proceedings V.55, Feb.1959, pp 879-892
- (23) E.E.Eckert, "Heavy Duty Concrete Floors", ACI Proceedings V.49, 1953, p 109
- (24) ACI Committee 345, "Recommended Practice for Concrete Highway Bridge Deck Construction", ACI Journal, Proceeding V.70, No:6, June 1973
- (25) ACI Committee 201, "Guide to Durable Concrete", ACI Journal, Proceeding V.74, No:12, December 1977, pp 585-589
- (26) S.H.Dahir, "Relative Resistance of Rained-on Concrete Pavements to Abrasion, Skidding and Scaling", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, V.3, No:1, Summer 1981, pp 13-20
- (27) ACI Committee 210, "Erosion Resistance of Concrete in Hydraulic Structures", ACI Proceedings, V.52, November 1955, pp 259-272
- (28) W.H.Price, G.B.Wallace, "Resistance of Concrete and Protective Coatings to Forces of Cavitation", ACI Proceedings, V.46, 1949, pp 109
- (29) T.C.Liu, "Abrasion Resistance of Concrete", ACI Journal, Proceedings V.78, 1981

- (30) D.L.Houghton, O.E.Borge J.A.Paxton,
"Cavitation Resistance of Some Special
Concretes", ACI Journal, Proceedings
V.75, No:12, Dec.1978
- (31) Graf, Albercht, Schafler, "Die Eigenschaften des
Betons", Springer-Verlag, Berlin/
Göttingen/Heidelberg, sayfa 219-227
- (32) B.Postacıoğlu, "Recherches Expérimentales sur la
rèistance à l'usure des ciments Portland",
Bulletin of the Technical University of
İstanbul, V.12.1959
- (33) A.Aydemir, "Betonlarda Yüzeysel Aşınma", Türkiye
İnşaat Mühendisliği II.Teknik Kongresi,
Rapor No:2, 1964, Ankara
- (34) D.O.Woolf, "Toughness, Hardness, Abrasion, Strength
and Elastic Properties of Aggregates",
ASTM Special Technical Publication,
No:169-A, 1966, pp 462-475
- (35) E.W.Scripture, "Metallic Aggregate in Concrete
Floors", ACI Proceedings, V.33,
Sept.-Oct. 1936, pp 17-27
- (36) E.W.Scripture, S.W.Benedict, D.E.Bryant, "Floor
Aggregates", ACI Journal, Proceedings
V.50, No:4, Dec.1953 pp 305-316
- (37) ACI Committee 302, "Guide for Concrete Floor and
Slab Construction", Concrete International,
Design and Construction, V.2, No:6,
June 1980
- (38) ACI Committee 213, "Guide for Structural Lightweight
Aggregate Concrete", Concrete
International, Design and Construction,
V.1, No:2, Feb.1979, pp 33-62

- (39) J.A.Kauer, R.L.Freeman, "Effect of Carbon Dioxide on Fresh Concrete", ACI Journal Proceedings, V.52, No:4, Dec.1955
- (40) J.C.Yeager, "Concrete Finishing Practices", ACI Journal, Proceedings V.70, No:6, 1973
- (41) A.T.Hersey, "Causes of Floor Failures", ACI Journal, Proceedings V.70, No:6, June 1973
- (42) L.E.Rodway, "Void Spacing in Exposed Concrete Flatwork", Concrete International, Design and Construction, V.1, No:2, Feb.1979
- (43) TS213, Türk Standartları, UDK 629.2/.6, Nisan 1965
- (44) E.Yüzer, "Türkiye Yapı Taşlarından Bazılarının Jeomekanik Özellikleri", İ.T.Ü. Maden Fakültesi, İstanbul, 1977
- (45) TS659, Türk Standartları, UDK 69.053.3, Ekim 1971
- (46) B.Postacıoğlu, "Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt I", İ.T.Ü. Kütüphanesi, sayı 1176, İstanbul, 1981, sayfa 583-584
- (47) F.M.Gavan, "Further Development and Use of the Armstrong Sandpaper Abrasion Machine", ASTM Bulletin, No:238, May 1959
- (48) F.M.Gavan, "The Wear Testing of Carpets and Resilient Floorings", ASTM Materials Research and Standards V.10, No:7, July 1970
- (49) F.E.Bernett, "Performance Testing Machine for Ceramic Tile Floor Systems", ASTM Materials Research and Standards, V.10, No:7, July, 1970

- (50) A.G.Roberts,W.A.Crouse, R.S.Pizer,"Abrasive Jet Method for Measuring Abrasion Resistance of Organic Coatings", ASTM Bulletin, No:208, Sept.1955
- (51) L.Holliday, "Composite Materials", Elsevier Publishing Company, 1966, pp 336-446
- (52) T.C.Hansen, "Creep and Stress Relaxation of Concrete" Swedish Cement and Concrete Research Institute, Handlingar (Proceedings), No:31, Stockholm, 1960
- (53) T.J.Hirsch, "Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate", ACI Journal, Proceedings V.59, 1962, pp 427-551
- (54) J.W.Dougill, "Discussion of 'Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate' by Hirsch", ACI Journal, Proceedings V.59, 1962, pp 1363-1374
- (55) Z.Hashin, "The Elastic Moduli of Heterogeneous Materials", Journal of Applied Mechanics, March 1962, pp 143-150
- (56) T.C.Hansen, "Notes from a Seminar on Structure and Properties of Concrete", Stanford University Civil Engineering Department Technical Report No:71, 1966
- (57) M.S.Bülbüloğlu, "Betonda Aşınma Özeliğinin Kompozit Malzeme Kurallarıyla İncelenmesi", Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. (Maçka) İnşaat Fakültesi, Haziran, 1981.
- (58) Y.Kubat, "Beton Aşınma Özeliğinin Araştırılması", Bitirme Ödevi, İ.T.Ü (Maçka) İnşaat Fakültesi, Şubat, 1981.

- (59) İ.Gemici, "Betonlarda Aşınma Ömrünün Araştırılması", Bitirme Ödevi, İTÜ (Maçka) İnşaat Fakültesi, Şubat, 1982
- (60) C.L.a'Court, Authors Closure on the Discussion of "Mix Design and Abrasion Resistance of Concrete", Symposium on Mix Design and Quality Control of Concrete, 1954



Bu alışma sırasında sürekli yardım ve ilgisinden yararlandığım Hocam Sayın Prof.Dr.Ferruh KOCATAşKIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin yazımı sırasında değerli uyarı ve önerilerde bulunan Sayın Prof.Dr.Bekir POSTACIOĞLU'na, Sayın Prof.Dr. Kâřif ONARAN'a ve Sayın Prof.Dr.Süheyl AKMAN'a teşekkür ederim.

Deneyssel çalışmalarda emeğini esirgemeyen Laborant Hüseyin GÜLER'e ve tezin daktilo edilmesinde sonsuz sabır ve titizlik gösteren Sayın mran KOÇYİĞİT'e teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmanın her safhasında destek ve ilgisini esirgemeyen eşim Meltem ÖZTURAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Y. G.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

TEZ YAZARININ ÖZGEÇMİŞİ

Turan Özturan 1952 yılında İzmir'de doğdu. İlk ve Orta öğrenimini İzmir'de Kahramanlar İlkokulu (1958-1963), Alsancak Ortaokulu (1963-1966) ve İstanbul'da Robert Academy'de (1966-1970) yaptı. 1970 yılında girdiği B.Ü. Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1974 Haziranında B.Sc. ve 1977 Şubatında M.Sc. derecelerini aldı. 1977-1978 arasında askerlik hizmetini tamamladı. 1978 Kasımında İ.T.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Bölümü, Mekanik, Yapı Statiği ve Yapı Malzemesi Kürsüsüne asistan olarak girdi.

Halen İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümü, Yapı Malzemesi Çalışma Grubunda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.