

127199

**DÜŞÜK SU/ÇİMENTO ORANLI BETONLARDA
ÖZELİKLERİN ÇİMENTO HAMURUNUN BOŞLUK
YAPISINA DUYARLILIĞI**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Hakan Nuri ATAHAHAN
(501962024)

**İ.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Mayıs 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ekim 2002

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Saim AKYÜZ (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Hulusi ÖZKUL (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.Ü.)
Prof.Dr. Turan ÖZTURAN (B.Ü.)

M. Taşdemir
S. Akköz
H. Özkul
H. Yaşa ERSOY
T. Özturan

EKİM 2002

ÖNSÖZ

Bu çalışmada betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine çimento hamurunun etkisini incelemek için Malzeme Bilimi yaklaşımı kullanılmıştır. Düşük su/çimento oranlı betonlarda beton özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı incelenmiş ve bu betonlarda özellikler arasındaki korelasyonların kuvvetli yada zayıf olmasına neden olan nedenler araştırılmıştır.

Sunulan bu çalışma İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Öncelikle çalışmam boyunca bana olan desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni her zaman en doğru şekilde yönlendiren çok değerli hocalarım Öğretim Görevlisi Dr. Osman Nuri OKTAR ve Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR 'e ve çalışmamda emeği geçen tüm Yapı Malzemesi Laboratuvarı çalışanlarına verdikleri destek ve sabırları dolayısıyla teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Deneyisel çalışmalarımda kullanılan çimento, Nuh Çimento San. A.Ş. tarafından; silis unu, Camiş Madencilik A.Ş. tarafından ve kimyasal katkı maddeleri, YKS ve İNKA firmaları tarafından karşılanmıştır. Hidratasyon ısılarının ölçülmesi ile ilgili ilk çalışmalar ise Akçansa Çimento Laboratuvarlarının katkıları ile gerçekleştirilmiştir. Çimento hamurunun boşluk yapısının belirlenebilmesi için TÜBİTAK MAM' da yapılan deneyler Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından desteklenmiştir. Doktora çalışmam boyunca tarafıma verilen burs dolayısıyla başta Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği' ne ve destekleri dolayısıyla yukarıda adını saydığım tüm kuruluşlara teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora çalışmam süresince sevgisini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Emel ATAHAN'na ve değerli ailesine; tüm öğrenimim boyunca ve ihtiyaç duyduğumuz her an bana ve eşime verdikleri büyük destekten dolayı sevgili babam Yıldırım ATAHAN, annem Necliye ATAHAN ve ablam Nurhan ATAHAN'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Mayıs, 2002

Hakan Nuri ATAHAN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam	2
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Giriş	4
2.2. Beton İç Yapısına Bağlayıcı Hamurun Etkisi	4
2.2.1. Hidratasyon ürünleri	5
2.2.2. Sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar	10
2.2.2.1. Jel boşlukları	10
2.2.2.2. Kılcal boşluklar	12
2.2.2.3. Hava boşlukları	16
2.2.3. Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki su	16
2.3. Bağlayıcı Hamurun Mekanik Özelliklere Etkisi	17
2.3.1. Su/çimento oranının etkisi	18
2.3.2. Jel/hacim oranı	21
2.3.3. Porozite	24
2.3.4. Agrega-çimento hamuru temas yüzeyi	27
2.4. Betonun Dürabilitesine Bağlayıcı Hamurun Etkisi	30
2.5. Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Çimento Hamuru Boşluk Yapısına Duyarlılığı	33
2.5.1. Özelliklerin çimento hamuru boşluk yapısına 1. tip duyarlılık derecesi (SD1) _i	35
2.5.2. Özelliklerin çimento hamuru boşluk yapısına 2. tip duyarlılık derecesi (SD2) _i	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	36
3.1.1. Agrega özellikleri	36
3.1.1.1. Kum	36

3.1.1.2. Kırmataş	36
3.1.1.1. Kırmataş kumu	37
3.1.1. Agregaların granülometrik bileşimleri	37
3.1.2. Çimento özellikleri	38
3.1.3. Kullanılan katkılar	38
3.2. Beton Karışım Hesapları	39
3.2.1. Kabul edilen esaslar	39
3.2.2. Beton karışım hesapları	40
3.2.3. Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları	42
3.2.4. Numune boyutları ve sayıları	42
3.2. Deneylerin Tanımlanması ve Uygulanan Yöntemler	43
3.3.1. Sertleşmiş beton deneyleri	43
3.3.1.1. Tek eksenli basınç deneyi	43
3.3.1.2. Yarma deneyi	43
3.3.1.3. Ultrases hızı ölçümleri	44
3.3.1.4. Schmidt çekici geri tepme değerlerinin bulunması	44
3.3.2. Çimento hidratasyon ısılarının ve hidratasyon derecelerinin belirlenmesi	44
3.3.3. Civalı porozimetre deneyleri	45
4. DENEY SONUÇLARI	46
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	46
4.2. Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları	47
4.2.1. Kılcal boşlukları kurutulmuş durumda ölçülmüş birim ağırlıklar	47
4.2.2. Küp ve silindir basınç dayanımları ile elastiklik modülü, Poisson oranı, süreksizlik ve çözülme sınırları	48
4.2.3. Yarma-çekme deneyi sonuçları	53
4.2.4. Ultrases hızı ölçümleri ve Schmidt çekici geri tepme değerleri	53
4.3. Çimento Hidratasyon Isıları	56
4.4. Hidratasyon Derecelerinin Belirlenmesi	60
4.5. Civalı Porozimetre Deneyi ile Sertleşmiş Çimento Hamurundaki Boşluk Dağılımının Ölçülmesi	63
4.6. Bağlı Kırılma Enerjileri	73
5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	76
5.1. Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Çimento Hamuru Boşluk Yapısına Duyarlılık Derecelerinin Belirlenmesi	76
5.1.1. Anhidr çimento tanelerinin jele dönüşmesi sonucu oluşan hacim artışı oranlarının bulunması	76
5.2. Özellikleri İfade Etmekte Kullanılan Gelişmiş Fonksiyonlar	78
5.2.1. D2 değişkeni ve Y parametresi	78
5.2.2. Y değerlerinin dayanımlar açısından irdelenmesi	80

5.2.3. Özellikleri ifade etmekte kullanılan gelişmiş fonksiyonlar	81
5.3. Özellikleri İfade Etmekte Kullanılan Fonksiyonların Karşılaştırılması	83
5.4. 1. Tip (SD1) _i ve 2. Tip (SD2) _i Duyarlılık Derecelerinin Karşılaştırılması	86
5.5. Özellikler Arasındaki Korelasyonları Belirleyen Nedenler	87
5.5.1. Özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları	87
5.5.2. Çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi	87
5.5.4.1. Duyarlılık yakınlığı oranı	87
5.5.4.2. Duyarlılık bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi	88
5.5.3. Bileşim faktörlerinin değişiminden etkilenme bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi	92
6. SONUÇLAR	99
KAYNAKLAR	102
EK A	108
EK B	113
EK C	121
ÖZGEÇMİŞ	163

KISALTMALAR

C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate
C-S	: Kalsiyum Hidroksit
C-A-S-H	: Etrenjit
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
D1, D2	: 1 ve 2 no.lu Değişkenler
P_{hi}	: Sertleşmiş Beton Özeliği
SD1	: 1. Tip Duyarlılık Derecesi
SD2	: 2. Tip Duyarlılık Derecesi
(KE)_{maks}	: Kırılma Şekildeğiştirme Enerjisi
TS	: Türk Standartları
ASTM	: American Society for Testing and Materials



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. C ₃ S 'in hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler.....	8
Tablo 2.2. Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler....	8
Tablo 2.3. Hidrate çimento hamuru içerisindeki boşlukların sınıflandırılması	11
Tablo 2.4. Değişik su/çimento oranları için kılcal boşlukların bloke edilebilmeleri için geçmesi gereken süreler.....	32
Tablo 3.1. Agregalara ait özgül ağırlık ve birim ağırlık deney sonuçları.....	37
Tablo 3.2. Elek analizi deney sonuçları.....	37
Tablo 3.3. Çimento fiziksel ve mekanik özellikleri.....	38
Tablo 3.4. Kullanılan katkı maddeleri ve kullanım yüzdeleri.....	39
Tablo 3.5. Agrega karışım oranları.....	39
Tablo 4.1. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelere ait kılcal boşlukları kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlıklar.....	47
Tablo 4.2. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde süreksizlik sınırlarındaki Poisson oranları.....	48
Tablo 4.3. 7 günlük mekanik özellikler.....	51
Tablo 4.4. 14 günlük mekanik özellikler.....	51
Tablo 4.5. 28 günlük mekanik özellikler.....	52
Tablo 4.6. 365 günlük mekanik özellikler.....	52
Tablo 4.7. 7 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri.....	54
Tablo 4.8. 14 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri.....	54
Tablo 4.9. 28 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri.....	55
Tablo 4.10. 365 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri...	55
Tablo 4.11. 7., 14., 28. ve 365. günlerde ölçülen hidratasyon ısıları.....	58
Tablo 4.12. Verbeck ve arkadaşlarının Portland tipi çimento üzerinde ölçtükleri hidratasyon ısıları.....	59
Tablo 4.13. Su/çimento oranları (w/c) ile hidratasyon ısıları (H) arasındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları.....	60
Tablo 4.14. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde bulunan buharlaşamayan su miktarı oranları (w _n /c).....	61
Tablo 4.15. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerin hidratasyon dereceleri.....	62
Tablo 4.16. Su/çimento oranları (w/c) ile hidratasyon dereceleri (α) aralarındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları.....	62
Tablo 4.17. 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde toplam nüfuz eden civa hacimleri.....	65
Tablo 4.18. 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde kritik boşluk çapları.....	71
Tablo 5.1. Δ ile D1 değişkeni arasındaki ilişkiden faydalanılarak bulunan “p” değerleri ve (Δ -D1) bağıntılarının korelasyon katsayıları.....	77

Tablo 5.2.	Δ ile D2 Değişkeni arasındaki ilişkiden faydalanılarak bulunan “p” değerleri ve (Δ -D2) bağıntılarının korelasyon katsayıları.....	79
Tablo 5.3.	Δ ile D2 değişkeni arasındaki ilişkilerde Y’ nin farklı değerleri için bulunan “p” ler ve bunlara ait korelasyon katsayıları.....	80
Tablo 5.4.	Küp ve silindir basınç dayanımları ve silindir yarma dayanımları dikkate alındığında Y’ nin değişik değerleri için bulunan maksimum korelasyon katsayıları.....	81
Tablo 5.5.	Özelikleri ifade etmekte kullanılan fonksiyonlar.....	81
Tablo 5.6.	Özelikleri ifade etmekte kullanılan fonksiyonların formları.....	81
Tablo 5.7.	7 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar.....	84
Tablo 5.8.	14 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar.....	84
Tablo 5.9.	28 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar.....	85
Tablo 5.10.	365 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar.....	85
Tablo 5.11.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (SD1) _i ’ lere göre 6 değişik fonksiyon için bulunan t_{ij} değerleri ile r_{ij} ’ ler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları.....	89
Tablo 5.12.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (SD2) _i ’ lere göre 6 değişik fonksiyon için bulunan t_{ij} değerleri ile r_{ij} ’ ler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları.....	90
Tablo 5.13.	Her deney yaşı için (t_{ij} - r_{ij}) bağıntılarına ait en büyük korelasyon katsayıları.....	91
Tablo 5.14.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F5)’ fonksiyonundan elde edilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile (r_{ij})’ ler arasındaki bağıntılar.....	94
Tablo 5.15.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F6)’ fonksiyonundan elde edilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile (r_{ij})’ ler arasındaki bağıntılar.....	94
Tablo 5.16.	Her beton yaşı için $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile (r_{ij})’ ler arasındaki bağıntılara ait en büyük korelasyon katsayıları ve elde edildikleri fonksiyonlar.....	95
Tablo 5.17.	(F5)’ ve (F6)’ fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (r_{ij})’ ler ile $T[A,B,C]_{ij}$ ’ ler arasındaki bağıntılar.....	96
Tablo 5.18.	r_{ij} -[$T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$, $T(C)_{ij}$] bağıntıları ile (t_{ij} - r_{ij}) bağıntılarının en büyük korelasyon katsayıları.....	97
Tablo 5.19.	(F5)’ ve (F6)’ fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (r_{ij})’ ler ile (SD1) _i ler dikkate alınarak bulunan (t_{ij})’ ler ve $T[A,B,C]_{ij}$ ’ ler arasındaki bağıntılar.....	98
Tablo 5.20.	(F5)’ ve (F6)’ fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (r_{ij})’ ler ile (SD2) _i ler dikkate alınarak bulunan (t_{ij})’ ler ve $T[A,B,C]_{ij}$ ’ ler arasındaki bağıntılar.....	98
Tablo A.1.	A16-B16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.....	109
Tablo A.2.	B16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.....	110
Tablo A.3.	B16-C16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.....	111

Tablo A.4.	C16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.....	112
Tablo B.1.	7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde maksimum yükteki birim deformasyon miktarları, (ϵ_{cu}).....	114
Tablo B.2.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda hesaplanan kırılma şekil değiştirme enerjileri, (KE) _{maks}	115
Tablo C.1.	7 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	122
Tablo C.2.	14 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	122
Tablo C.3.	28 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	123
Tablo C.4.	365 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	123
Tablo C.5.	7 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	124
Tablo C.6.	14 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	125
Tablo C.7.	28 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	126
Tablo C.8.	365 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	127
Tablo C.9.	7 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	128
Tablo C.10.	14 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	128
Tablo C.11.	28 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	129
Tablo C.12.	365 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	129
Tablo C.13.	7 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	130
Tablo C.14.	14 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	131
Tablo C.15.	28 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	132
Tablo C.16.	365 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	133
Tablo C.17.	7 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	134
Tablo C.18.	14 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	134
Tablo C.19.	28 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	135
Tablo C.20.	365 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	135
Tablo C.21.	7 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar..	136
Tablo C.22.	14 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	137
Tablo C.23.	28 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar	138
Tablo C.24.	365 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar.....	139
Tablo C.25.	7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde özellikler ile değişkenler arasındaki maksimum korelasyon katsayıları, $R(n_i^*)$	140
Tablo C.26.	F1 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	141
Tablo C.27.	F2 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	142
Tablo C.28.	F3 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	143
Tablo C.29.	F4 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	144
Tablo C.30.	F5 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	145
Tablo C.31.	F6 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları.....	146

Tablo C.32.	7 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij}).....	147
Tablo C.33.	14 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij}).....	148
Tablo C.34.	28 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij}).....	149
Tablo C.35.	365 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij}).....	150
Tablo C.36.	7 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	151
Tablo C.37.	14 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	152
Tablo C.38.	28 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	153
Tablo C.39.	365 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	154
Tablo C.40.	7 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	155
Tablo C.41.	14 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	156
Tablo C.42.	28 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	157
Tablo C.43.	365 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2) _i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları.....	158
Tablo C.44.	(F5)' fonksiyonuna göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlara ait özelliklerden elde edilen A, B, C ve D katsayıları.....	159
Tablo C.45.	(F6)' fonksiyonuna göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlara ait özelliklerden elde edilen A, B, C ve D katsayıları.....	160
Tablo C.46.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F5)' fonksiyonundan bulunan $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri.....	161
Tablo C.47.	7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F6)' fonksiyonundan bulunan $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri.....	162

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Portland çimentosunun piriz başlangıcı ve sertleşme mekanizmasını gösteren dört aşama: (a) su ile temas, (b) hidrasyon başlangıcı, (c) jelleşme (priz), (d) sertleşmiş çimento hamuru	6
Şekil 2.2 : Sertleşmiş çimento hamuru yapısının basitleştirilmiş bir modeli.....	7
Şekil 2.3 : Hadley tanesi.....	10
Şekil 2.4 : Portland çimentosu hamurunda oluşabilecek olası çatlak yolu..	16
Şekil 2.5 : Sertleşmiş çimento hamurunda, değişik su/çimento oranlarında basınç dayanımı ile toplam porozite arasındaki ilişki	20
Şekil 2.6 : Jel/hacim oranı ile dayanımlar arasındaki ilişki	22
Şekil 2.7 : Portland çimentosu (PC) ve uçucu küllü çimento (UK) hamurlarında jel/hacim oranı ile basınç dayanımları arasındaki ilişki	23
Şekil 2.8 : Basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişki	25
Şekil 2.9 : (a) Su/çimento oranı 0.45 ve (b) su/çimento oranı 0.55 olan karışımlardaki boşluk boyutu dağılımları	26
Şekil 2.10 : Geçiş bölgesinin mikroyapısı	27
Şekil 2.11 : Zimbelmann' a göre arayüzey geçiş bölgesinin şematik gösterimi.....	27
Şekil 2.12 : Kılcal boşlukların parsellere ayrılabilimleri için gerekli su/çimento oranı ile hidrasyon derecesi arasındaki ilişki	31
Şekil 2.13 : (a) Sertleşmiş çimento hamurunda, kılcal porozite ile geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki, (b) Hidrasyonunu tamamlamış çimento hamurlarında su/çimento oranı ile geçirimsizlik katsayısı arasındaki ilişki	32
Şekil 2.14 : Taze betonun yapısı.....	33
Şekil 2.15 : Sertleşmiş betonun yapısı	34
Şekil 3.1 : A16-B16 karışım granülometrisi.....	41
Şekil 3.2 : B16 karışım granülometrisi.....	41
Şekil 3.3 : B16-C16 karışım granülometrisi.....	41
Şekil 3.4 : C16 karışım granülometrisi.....	42
Şekil 4.1 : Silindir basınç dayanımları ile maksimum yükteki birim deformasyon (ϵ_{cu}) arasındaki ilişki.....	49
Şekil 4.2 : Silindir basınç dayanımları ile süreksizlik sınırındaki Poisson oranları arasındaki ilişki.....	50
Şekil 4.3 : 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde su/çimento oranı ile hidrasyon ısıları arasındaki ilişkiler.....	59

Şekil 4.4	: 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde su/çimento oranı – hidrasyon dereceleri arasındaki ilişki.....	62
Şekil 4.5	: 7 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.	64
Şekil 4.6	: 28 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.....	64
Şekil 4.7	: 365 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.....	65
Şekil 4.8	: 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde su/çimento oranı ile toplam nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.	66
Şekil 4.9	: Su/çimento oranı 0.26 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.	66
Şekil 4.10	: Su/çimento oranı 0.34 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.	67
Şekil 4.11	: Su/çimento oranı 0.42 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.	67
Şekil 4.12	: 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde toplam nüfuz eden civa hacminin numunenin kür süresine bağlı olarak değişimi.	68
Şekil 4.13.	: 7 günlük numunelerde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	70
Şekil 4.14	: 28 günlük numunelerde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	70
Şekil 4.15	: 365 günlük numunelerde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	71
Şekil 4.16	: 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamurlarında kritik boşluk çapı ile kür süresi arasındaki değişim.	72
Şekil 4.17	: 7, 28 ve 365 günlük çimento hamurlarında kritik boşluk çapı ile su/çimento oranı arasındaki değişim.	73
Şekil 4.18	: (a) Lineer elastik ve (b) inelastik davranış gösteren malzemede bağıl kırılma enerjileri.	74
Şekil 4.19	: Normalize edilmiş basınç dayanımları ile bağıl kırılma enerjileri arasındaki ilişki.....	75
Şekil B.1	: Su/çimento oranı 0.26 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	116
Şekil B.2	: Su/çimento oranı 0.34 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	116
Şekil B.3	: Su/çimento oranı 0.42 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	117

Şekil B.4	: Su/çimento oranı 0.26 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	117
Şekil B.5	: Su/çimento oranı 0.34 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	118
Şekil B.6	: Su/çimento oranı 0.42 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	118
Şekil B.7	: Su/çimento oranı 0.26 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	119
Şekil B.8	: Su/çimento oranı 0.34 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	119
Şekil B.9	: Su/çimento oranı 0.42 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.....	120



SEMBOL LİSTESİ

C	: 1 m ³ yerleşmiş betondaki çimento ağırlığı
c	: 1 m ³ yerleşmiş betondaki mutlak çimento hacmi
W	: 1 m ³ yerleşmiş betondaki su ağırlığı
K	: 1 m ³ yerleşmiş betondaki katkı ağırlığı
δ_c	: Çimentonun özgül ağırlığı
δ_k	: Katkı maddesi özgül ağırlığı
δ_i	: “i” agregasının özgül ağırlığı
P_i	: “i” agregasının karışım yüzdesi
V_a	: Toplam agrega hacmi
a	: 1 m ³ yerleşmiş betondaki hava boşluğu
G_i	: “i” agregasının ağırlığı
Δ	: Birim ağırlık
ν	: Poisson oranı
ϵ_{cu}	: Maksimum yükteki birim şekildeğiştirme
ϵ_b	: Boyuna birim şekildeğiştirme
ϵ_e	: Enine birim şekildeğiştirme
f_{cc}	: Küp basınç dayanımı
f_{cs}	: Silindir basınç dayanımı
f_{css}	: Süreksizlik sınırı
$f_{csç}$	: Çözülme sınırı
T_s	: Yarma-çekme dayanımı
V_c	: Küp numunede ölçülen ültrases hızı
V_s	: Silindir numunede ölçülen ültrases hızı
S	: Schmidt çekici geri tepme değeri
H	: Hidrate olmuş çimentonun hidratasyon ısısı
α	: Hidratasyon derecesi
w_n	: Buharlaşamayan su miktarı
U_r	: Bağlı kırılma enerjisi
n_i	: Duyarlılık katsayısı
p	: Hacim artış oranı
m	: Agreganın incelik modülü
t_{ij}	: Duyarlılık yakınlığı oranı
r_{ij}	: Özellik çiftleri arasındaki bağıntılara ait korelasyon katsayısı

DÜŞÜK SU/ÇİMENTO ORANLI BETONLARDA ÖZELİKLERİN ÇİMENTO HAMURUNUN BOŞLUK YAPISINA DUYARLILIĞI

ÖZET

Bu çalışmada düşük su/çimento oranına sahip betonlarda özelliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı ve bu özellikler arasındaki korelasyonların kuvvetli ya da zayıf olmasının nedenleri araştırıldı. Bu amaçla düşük su/çimento oranına sahip betonların özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıklarını niceliksel olarak tanımlayan duyarlılık katsayıları ve duyarlılık dereceleri tanımlandı. Aralarındaki korelasyonların kuvvetli olduğu özellikler arasında bazı yakınlıkların olması gerektiği düşünülerek bu yakınlıkların neler olduğu araştırıldı.

Aynı Portland çimentosu ve aynı agregalar kullanılarak 20 değişik beton karışımı hazırlandı. Agregalar karışım oranları, maksimum dane çapı 16 mm.'de sabit tutularak A16-B16, B16, B16-C16 ve C16 referans eğrilerine uyacak şekilde seçildi. Su/çimento oranları 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 olmak üzere beş değişik su/çimento oranında beton üretildi. Üretilen betonlarda yeterli işlenebilmeyi sağlayabilmek amacı ile iki değişik süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanıldı. 0.26, 0.30 ve 0.34 su/çimento oranlı betonlarda hiperakışkanlaştırıcı (yeni kuşak süperakışkanlaştırıcı) ve 0.38 ve 0.42 su/çimento oranlı betonlarda ise süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanıldı. Karışımlarda mineral katkı maddesi kullanılmadı. Üretilen betonlar üzerindeki mekanik deneyler 7., 14., 28. ve 365. günlerde 10 adet sertleşmiş beton özeliğinin ölçülmesi ile gerçekleştirildi. Bu özellikler: Sabit ağırlığa kadar kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlık, 150 mm boyutlu küp numuneler üzerinde ölçülen basınç dayanımı, Schmidt çekici geri tepme değeri, ultrases hızı ve 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde silindir numuneler üzerinde ölçülen basınç dayanımı, yarma-çekme dayanımı, elastiklik modülü, ultrases hızı, süreksizlik ve çözülme sınırlarıdır.

Üretilen betonlar ile aynı su/çimento oranı ve aynı akışkanlaştırıcı katkı yüzdesiyle üretilen çimento hamuru numuneleri üzerinde buharlaşamayan su miktarının saptanması esasına dayanarak 7., 14., 28. ve 365. günlerde α hidratasyon dereceleri hesaplandı. Hidratasyon dereceleri (α) sertleşmiş çimento hamuru numunelerinde kızdırma esasına dayanarak saptanan buharlaşamayan su miktarının, çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmeleri için gerekli su miktarına (0.23) oranlanmasıyla bulundu. Deney sonuçları, hidratasyon derecelerinin numune yaşının ve su/çimento oranının artması ile birlikte belirgin şekilde arttığını gösterdi. Üretilen çimento hamuru numunelerine ait hidratasyon derecelerinin %45.8 ile % 80.0 arasında değiştiği görüldü. Aynı sertleşmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde yapılan hidratasyon ısı ölçümlerinde ise hidratasyon ısılarının numune yaşının ve su/çimento oranının artması ile belirgin şekilde arttığı ve 63.0 cal/gr ile 107.4 cal/gr arasında değiştiği görüldü.

Sertleşmiş çimento hamurundaki boşluk dağılımının incelenebilmesi amacı ile civalı porozimetre deneyleri yapıldı. Deneyler 7., 28. ve 365. günlerde su/çimento oranı 0.26, 0.34 ve 0.42 olan çimento hamurları üzerinde yapıldı. Deneyler sonucunda tüm deney yaşlarında su/çimento oranının azalması ve numune yaşının artması ile birlikte numune içine nüfuz eden toplam civa hacminin azaldığı görüldü. Civa basıncındaki birim değişiklik sonucu oluşan civa penetrasyonundaki en yüksek hıza karşılık gelen çap “kritik boşluk çapı” olarak anılır. Boşluk çapı ile toplam nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişkilere ait grafiklerin diferansiyel eğrilerinden faydalanarak deney yapılan numunelere ait kritik boşluk çapları tesbit edildi. Kritik boşluk çaplarının, su/çimento oranının azalması ve numune yaşının artması ile birlikte azaldığı ve bu değer 30 nm ile 110 nm arasında değişen değerler aldığı görüldü. Diğer bir deyiş ile minimum toplam porozite ve minimum kritik boşluk çapları, su/çimento oranının minimize edilmesi ve kür süresinin maksimize edilmesi ile sağlandı.

Özellikleri ifade etmek için 2 farklı değişken kullanıldı. Bu değişkenler D1 ve D2 olmak üzere:

$$D1 = n_i [w - (p-1)\alpha c] + a \quad [1]$$

$$D2 = \frac{p\alpha\alpha + 0.12(1-\alpha)c}{n_i [w - (p-1)\alpha] + a} \quad [2]$$

şeklinde ifade edildi. Burada p, anhidr çimento tanelerinin jele dönüşmesi sonucu oluşan hacim artış oranını; α , çimento hidrasyon derecesini; n_i , duyarlılık katsayısını; “c”, “w” ve “a” ise sırası ile mutlak hacim olarak $1m^3$ yerleşmiş betondaki çimento, su ve hapsolmuş hava boşluğunu ifade etmektedir. D1 değişkeni sertleşmiş betondaki çimento hamuru toplam boşluk hacmini ifade ederken, D2 değişkeni, jel hacmi ile henüz jele dönüşmemiş (hidrate olmamış) çimento hacmi toplamının boşluk hacmine oranını ifade etmektedir. Deney sonuçları, özellikle dayanımlarla ilgili özellikleri belirlemede D2 değişkeninin, diğer özelliklerin belirlenmesinde ise D1 değişkeninin daha başarılı olduğunu gösterdi.

Duyarlılık dereceleri, D1 ve D2 değişkenlerine betonun diğer bileşim özellikleri (agrega konsantrasyonu, agrega karışımının incelik modülü, vb. gibi) katılarak da hesaplandı. Sonuç olarak P_{hi} sertleşmiş beton özelliklerini ifade etmek için 6 değişik fonksiyon (F1, F2, F3, F4, F5 ve F6) kullanıldı.

P_{hi} herhangi bir sertleşmiş beton özeliği ve n_i bir parametre olmak üzere yeteri kadar çeşit ve sayıdaki bir beton gurubunda P_{hi} 'nin aldığı değerleri D1 ve D2 değişkenlerine göre ve n_i 'ye değişik değerler vererek incelediğimizde $n_i = n_i^*$ için en büyük korelasyon katsayısı elde edilsin. Korelasyon katsayısının maksimum olmasının kullanılan değişkenin P_{hi} özeliği üzerinde çimento hamuru boşluk yapısının etkisini en iyi şekilde ifade etmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Bu durumda eğer,

- $n_i^* = 1$ ise, kılcal boşlukların hacmi ile hapsolmuş hava boşluğu hacmi özeliği aynı ağırlıkta etkiliyor demektir. Dolayısıyla özellik çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlıdır.
- $n_i^* \neq 1$ ise, özeliği boşlukların hacminden başka niteliği de etkiliyor demektir. Dolayısıyla özellik çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlıdır.

n_i^* değerine gözönüne alınan P_{hi} özeliğinin “çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık katsayısı” denilmiş ve bu katsayı “1.tip duyarlılık derecesi (SD1)_i” olarak tanımlanmıştır.

Bu fonksiyonlar kullanılarak bulunan 1. tip (SD1)_i ve 2. tip (SD2)_i duyarlılık dereceleri incelendiğinde, herhangi bir sertleşmiş beton özeliği için bulunan (SD1)_i değerlerinin, kullanılan fonksiyona göre her deney yaşı için birbirinden çok farklı görülmesiyle birlikte, tüm fonksiyonlarda (SD1)_i değerinin genel olarak yaşın artması ile birlikte arttığı ve hatta bazı fonksiyonlar için bu değer sonsuz çıktığı gözlemlendi. Bunun anlamı, kılcal boşluk hacminin yanında, hapsolmuş hava boşluğu hacmi (a)’nın betonun o özeliğini etkilemede ihmal edilebilir bir etkiye sahip olmasıdır. Bunun tersi olacak şekilde, (SD1)_i değerleri bazı fonksiyonlarda ise sıfır olarak bulundu. Bunun anlamı ise, hapsolmuş hava boşluğunun özellik üzerindeki etkisinin kılcal boşluklardan daha önemli olmasıdır.

(SD2)_i ile ifade ettiğimiz “2.tip duyarlılık derecesi” ise duyarlılığı gözönüne almakla herhangi bir özeliğe ait korelasyon katsayısının ne oranda yükseldiğini ifade eden bir büyüklüktür:

$$(SD2)_i = \frac{R(n_i^*)}{R(n=1)} \quad [3]$$

Burada;

- $R(n_i^*)$: P_{hi} özeliğinin değişimi, değişkenlerdeki n parametresine çeşitli değerler verilerek incelendiğinde elde edilen en büyük korelasyon katsayısı,
- $R(n=1)$: P_{hi} özeliği için yapılan aynı incelemede, n parametresine 1 değeri verildiğinde bulunan korelasyon katsayısıdır.

Dolayısıyla herhangi bir beton özeliği için (SD2)_i değerinin (SD2)_i>1 olmak üzere, 1 değerinden uzaklaşması, o beton özeliği için duyarlılığı gözönüne almanın yararının büyük olduğu anlamına gelmektedir. Deney sonuçlarından bulunan (SD2)_i değerlerindeki dağılımların, (SD1)_i’lere göre çok daha az olduğu görüldü. Bunun yanında gerek (SD1)_i ve gerekse (SD2)_i değerlerinin incelenmesinden, dayanımlarla ilgili özelliklerin diğer özelliklere göre çimento hamuru boşluk yapısına belirgin olarak daha duyarlı olduğu ve özellikle dayanımlar için duyarlılık dereceleri, deney yaşının artması ile belirgin bir şekilde arttığı görüldü. Dayanımları daha iyi ifade eden ve içinde sadece D2 değişkeninin kullanıldığı F2 fonksiyonundaki silindir basınç dayanımlarına ait (SD2)_i değerlerini örnek vermek gerekirse, 7. günde bu değer 1.11, 14. günde 1.28, 28. günde 1.42 ve 365. günde ise 1.75 olarak bulundu. Benzer şekilde sadece D1 değişkeninin kullanıldığı F1 fonksiyonunda da özellikle dayanımları ifade eden bağıntıların (SD2)_i duyarlılık derecelerinin numunenin yaşının artması ile birlikte arttığı görüldü. Buna karşın, D1 ve D2 değişkenine sırası ile çimento hamuru hacmi ve incelik modüllerinin ilave edilmesi ile türetilen diğer fonksiyonlarda (F3, F4, F5 ve F6) ise tüm özellikler için bulunan (SD2)_i değerleri 1 değerine oldukça yakın olup, belirgin bir artış veya azalma görülmedi. Bunun nedeni ise, F3, F4, F5 ve F6 fonksiyonlarının daha fazla değişken içermesi ve bu yeni değişkenlerin etkilerinin duyarlılığın etkisini örtmesidir.

Çalışmada ayrıca beton özellikleri arasındaki korelasyonların kuvvetli yada zayıf olmasını belirleyen nedenler araştırılmış, aralarındaki korelasyonların kuvvetli olduğu özellikler arasında bazı yakınlıkların olması gerektiği düşünülmüş ve bunların neler olduğu araştırılmıştır. Duyarlılıklar arasındaki yakınlığın, beton özellikleri arasındaki korelasyonların kuvvetli ya da zayıf olmasını belirleyen en önemli etken olacağı düşünülerek, çimento hamuru boşluk yapısına duyarlılık bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi incelendi. Beton yaşının artması ile birlikte, duyarlılık yakınlığı ile özellikler arasındaki korelasyonların gücü arasındaki ilginin giderek daha belirgin hale geldiği görüldü.

Bu çalışmada ayrıca, beton özelliklerinin, gözönüne alınan bileşim faktörlerindeki değişimlerden etkilenme dereceleri dikkate alınmış ve bu etkilenme derecelerindeki yakınlık ile özelliklere ait korelasyonların arasındaki ilişkiler incelenmiştir. En çok değişken içeren F5 ve F6 fonksiyonları kullanılarak yapılan bileşim faktörlerinin değişiminden etkilenme bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi incelendiğinde, özellikler arasındaki korelasyonların belirlenmesinde çimento hamuru miktarından ve çimento hamurunun boşluk yapısından etkilenmedeki yakınlıkların, agrega granülometrisinden etkilenmedeki yakınlığın önüne geçtiği, fakat bunun yanında tek tek ele alındıklarında bileşim faktörlerinden etkilenmedeki yakınlıkların hiçbiri duyarlılıkların yakınlığı kadar özellikler arasındaki korelasyonları etkilemediği anlaşıldı. Bileşim etkenlerinin tümü birarada gözönüne alındığında, 7. ve 14. günlerde bileşim etkenlerinden etkilenmedeki yakınlık birinci derece önemliyken, 28. günden itibaren duyarlılıkların yakınlığı korelasyonların belirlenmesinde öne çıktığı görüldü.

SENSITIVITY OF PROPERTIES TO PORE STRUCTURE OF CEMENT PASTE OF CONCRETES WITH LOW WATER - CEMENT RATIO

SUMMARY

In this study, in concretes with low water/cement (w/c) ratios, sensitivity of concrete properties to the pore structure of hardened cement paste (hcp) and the factors determining correlation coefficients between concrete properties were investigated. Sensitivity coefficients and sensitivity degrees were introduced to define quantitatively the sensitivity of concrete properties to the pore structure of hcp. It has been thought that there should be some close resemblances between properties related with high correlations and such resemblances have been systematically investigated.

20 mixes were prepared using the same Portland cement and the same aggregates. In the mixes, the following four different grading curves were used: A16-B16, B16, B16-C16, and C16 known as ISO reference curves. The maximum particle size of concrete was kept constant at 16 mm. Five different w/c ratios were used from 0.26 to 0.42, in steps of 0.04. For concretes with low w/c ratios varying from 0.26 to 0.34, a hyper-plasticizer (new generation high range water reducer), and relatively high w/c ratios, such as 0.38 and 0.42, a super-plasticizer (high range water reducer) were used to maintain workable fresh concretes. No mineral admixture was used in the mixes. The mechanical tests on the hardened concretes were done at the following ages: 7, 14, 28 and 365 days. Ten hardened concrete properties were measured: unit weight of concrete dried in an oven up to constant weight, standard cube compressive strength; Schmidt's hammer rebound number; and ultrasonic pulse velocity on 150mm cubic specimens; and standard cylinder compressive strength; splitting tensile strength; modulus of elasticity; ultrasonic pulse velocity; and discontinuity and loosening limits on the cylinders of 150mm in diameter and 300mm height.

The hydration degrees (α) were measured on hcp specimens with the same w/c ratios used for concrete mixes. Tests were done on the 7, 14, 28, and 365 day old specimens. Non-evaporable water contents (w_n) of hcp's were determined to evaluate the degree of hydration. All the calculations were carried out on the ignited basis. The degrees of hydration were determined based on that the hydration of 1 gr of anhydrous cements produces 0.23 gr of non-evaporable water. Test results have shown that the degrees of hydration were increased significantly with both increasing the curing time and w/c ratios of hcp's and it varied from 45.8% to 80.0%. Heat of hydration of the hcp specimens was measured on the same samples used for the determination of hydration degrees. Test results have shown that, the heat of hydration were increased significantly with increasing w/c ratio and curing time, and it varied from 63.0 cal/gr to 107.4 cal/gr.

Mercury intrusion porosity (MIP) tests were also done on the same samples used for the determination of hydration degrees. MIP tests were done on the 7, 28, and 365 day old specimens with the w/c ratios of 0.26, 0.34 and 0.42. Test results have shown that the volume of the total intruded mercury was decreased with increasing curing time and decreasing w/c ratios. The pore width corresponding to the highest rate of mercury intrusion per change in pressure is known as the “threshold”, “critical” or “percolation” pore width. The critical pore widths of the hcp’s were determined by using the differential curves of the pore width (μm) versus cumulative intruded mercury (ml/gr) relations. Calculations have shown that, the threshold pore width of the hcp’s decreased significantly with decreasing w/c ratio and increasing curing time, and it varied from 30 nm to 110 nm. In another word, the minimum values of total porosity and critical pore width were obtained by minimizing w/c ratio and maximizing curing time.

Two different variables were used for the definition of the hardened concrete properties:

$$D1 = n_i [w - (p-1)\alpha c] + a \quad [1]$$

$$D2 = \frac{p\alpha\alpha + 0.12(1-\alpha)c}{n_i [w - (p-1)\alpha] + a} \quad [2]$$

Here, “p” is the ratio of the volume of cement gel to the volume of original anhydrous cement, α is the hydration degree, and n_i is the coefficient of sensitivity of the property to the pore structure of hardened cement paste. “c”, “w”, and “a” are the absolute volumes of cement, water and air, respectively. The first variable (D1) indicates the total porosity of the paste structure of hardened concrete, and the second one (D2) indicates the ratio of the gel volume and anhydrous cement volume to the total porosity of the paste structure of hardened concrete. Test results have shown that the variable D2 was more successful especially in determining the strengths, the variable D1, however, was more successful in determining the other properties.

Sensitivity degrees were also determined by adding some other mixing properties of concrete (paste volume (c+w+a), and fines modulus of mixing aggregate (m), etc.) to the variables D1 and D2. Consequently, six different functions (F1, F2, F3, F4, F5, and F6) were used for the definition of the hardened concrete properties, (P_{hi}).

Let P_{hi} be a hardened concrete property and n_i be a parameter, and let us consider the values taken by P_{hi} in a sample large enough to be representative of the concrete in relation to the variable D1 or D2 by giving several values to n_i . Suppose that for $n_i = n_i^*$ the highest coefficient of correlation $[R(n_i^*)]_{\max}$ is obtained. By obtaining this it can be thought that the variable used is the best representation of the influence of the pore structure of cement paste on the property. Thus,

- if $n_i^* = 1$, this means that the volume of capillary pores and the volume of entrapped air affect the property equally. Hence, the property is insensitive to the pore structure of cement paste.

- if $n_i^* \neq 1$, this means that the volume of pores and their type both affect the property, which is said to be sensitive to the pore structure of cement paste.

According to this, n_i^* may be called “the coefficient of sensitivity to the pore structure of cement paste” of the property, and this is also called Type 1, (SD1)_i sensitivity degree to the pore structure of hardened cement paste.

Type 1, (SD1)_i sensitivity degrees determined from these functions have shown that, (SD1)_i values found for any hardened concrete property had very distinct values for all functions, but it was observed that the (SD1)_i values were generally increased with increasing curing time, even it was found as infinity for some functions. This means that the effect of the volume of capillary pores on the properties indicated by these relations is much more significant than that of entrapped air, (a). In contrary to this, (SD1)_i was found zero for some functions. In this case, the effect of the entrapped air on the property is more significant than that of capillary pores.

Type 2 sensitivity degree (SD2)_i indicates how the correlations becomes stronger by taking into account the degree of sensitivity:

$$(SD2)_i = \frac{R(n_i^*)}{R(n=1)} \quad [3]$$

where;

- $R(n_i^*)$: The highest correlation coefficient obtained when the variation of the P_{hi} property is calculated with respect to the variable by giving several values to the parameter n_i .
- $R(n=1)$: The correlation coefficient obtained in the same manner by allocating the value of 1 to the parameter n_i .

Consequently, it means that taking into account the Type 2 sensitivity degree ((SD2)_i ≥ 1) for P_{hi} property of hardened concrete have gained benefits when it differs from the value 1. It was observed that, the distribution in the values of (SD1)_i was more than those of (SD2)_i's, however, the results have shown that strengths were significantly more sensitive to the pore structure of hcp than other properties according to both (SD1)_i's and (SD2)_i's, and especially for the strengths, sensitivity degrees were increased significantly with increasing curing time. It can be concluded that taking into account the sensitivities to the pore structure of hcp provides more benefits in concretes with low water/cement ratio than those of concretes with high water/cement ratio. For an example, (SD2)_i values found for compressive strengths of cylinder specimens using F2, which includes the variable D2 alone, were 1.11 for 7 day, 1.28 for 28 day, 1.42 for 28 day, and 1.75 for 365 day-old specimens. Similarly, (SD2)_i values found from F1, which includes the variable D1 alone, increased with increasing curing time especially for strengths. On the contrary to this, (SD2)_i values found for all properties from the other functions (F3, F4, F5, and F6) derived from the variables D1 and D2 were very close to 1 and these values were not shown significant increase or decrease. It can be concluded that the functions F3,

F4, F5, and F6 include more variables than those of other functions and the effect of these variables reduces the effect of sensitivity.

The factors determining the correlation coefficients between concrete properties were also investigated. It is assumed that the existence of some resemblance between these properties may affect the strength of the correlations and it is thought that the closeness of the sensitivity degrees of the properties to the pore structure of cement paste is the most important factor. It has been shown that the relations between the closeness of sensitivities and the strength of correlations were getting dominant with increasing curing time.

For concrete properties, the significances of changes in composition factors considered in this study have been calculated. Relations between the closeness of influences of these changes on different properties and the coefficients of correlation between them have been analyzed. The effect of the closeness of dependence on composition factors of properties on the strength of the correlations were investigated using functions F5 and F6, which includes three variables. Determination of the correlations between the properties has shown that closeness of influences of both the amount and pore structure of cement paste has been more effective than the modulus of fines of the aggregate. On the other hand, none of the closeness of influences of the composition factors affected the correlations between the properties as significant as the closeness of the sensitivities when these factors are considered individually. Nevertheless when the composition factors are considered all together, it has been shown that while the closeness of influences of the composition factors were more successful on 7-day and 14-day old specimens, for 28-day and 365-day old specimens however, closeness of the sensitivities were more significant in determination of the correlations.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Günümüzdeki büyük gelişmelerin sonucu olarak hem bilgisayar teknolojisinde hem de deney tekniklerinde sağlanan ilerlemeler betonun mekanik davranışına da yansımıştır. Özellikle betonun iç yapısı ve mekanik davranışının birlikte incelenip değerlendirilmesi araştırmalara yeni boyutlar kazandırmıştır. Yeni gelişmeler ışığında beton davranışının daha iyi anlaşılacağı, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve çok daha gelişmiş yöntemlerin kullanılabileceği beklenmektedir. Bu yüzden betonun daha etkin bir biçimde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı betonların reaktörler, açık deniz yapıları, yüksek katlı binalar ve savunma amaçlı depolama siloları gibi özel yapılarda kullanılması çatlama davranışına artan bir ilginin oluşmasına neden olmuştur [1-5].

Alt yapısını tamamlama çabasında olan ülkemizin önemli miktarda çimento esaslı malzemelere gereksinimi vardır. Çimento üretiminde ülkemizde sürekli artış kaydedilmektedir. Örnek olarak yaklaşık aynı nüfusa sahip olmamıza karşın İngiltere 'deki çimento üretiminin üç katı kadar çimento üretilmektedir. Son yıllarda ülkemizde üretilen çimento miktarı 35 milyon ton civarındadır. Böyle bir üretimle Türkiye Avrupa 'da ilk üç içinde, dünyada ise büyük miktarda çimento üreten ülkelerden ilk sekizi arasında sayılmaktadır. Buna karşılık çok yaygın kullanım alanı olan betonun kısa ve uzun süreli mekanik davranışı ile dürabilitesine yönelik araştırmalar olması gereken düzeyde değildir.

Son yıllarda hem dünyada hem de ülkemizde yüksek mukavemetli betonlara olan ihtiyaç giderek artmaktadır. TS 500, C50 (28 günlük silindir basınç dayanımı 50 MPa) ye varan beton sınıflarını öngörmekle birlikte TS 11222 C100' e kadar beton sınıflarını hedeflemektedir. Ancak ülkemizde en yaygın olarak kullanılan beton sınıfları C14, C16 ve C20 dir. Yüksek yapılarda ise C30 veya C35 sınıfları kullanılmaktadır. Buna karşın Eurocode 2 de normal beton sınıfları C80 ' e

varmaktadır. Avrupa'da Almanya'nın öncülüğünde C60-C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım kodları geliştirilmektedir. Bu aralıktaki betonlar yüksek dayanımlı olarak kabul edilirler. 1960'lı yıllarda basınç dayanımı bakımından alt sınır 40 MPa olarak tanımlanan yüksek mukavemetli betonun günümüzde 100 MPa ' a kadar olanlarının rutin olarak hazır beton tesislerinde üretilmesi artık sözkonusudur, hatta 100 MPa ile 120 MPa dayanım değerine sahip betonlar da bazı yapılarda kullanılmıştır [5]. Yapılan araştırmalarda basınç dayanımı 150 MPa ' ı aşan betonların üretildiği bilinmektedir. Ancak 100 MPa ' ı aşan dayanıma sahip betonları rutin olarak üretmek hem pratik hem de ekonomik değildir. Böylece çok yüksek dayanımlı betonlar yerine dayanımları bu değerlerin altında (örnek olarak CEB-FIB [6] üst sınır beton sınıfı olarak verilen 80 MPa civarında olan) fakat daha düşük geçirimsizliğe sahip, donma-çözölmeye ve zararlı ortamların etkisine dayanıklı betonları ülkenin önemli yapılarında kullanmak daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır.

Betonun dayanımı yanında dörabilitesinin de yeterli olması istenir. Geçirimsiz olması istenen bir betonun dörabilitesinin de yeterli olacağı beklenir. Geçirimli ve boşluklu bir beton içindeki çeliği koruyamaz. Karbonatlaşma ve klor nedeni ile oluşan çelik korozyonu betonarme yapıda dayanım azalmasına neden olur. Sismik yüklemeler sırasında bu tür çatlaklar daha ilerler ve kalan dayanım daha da azalır. Ülkemiz etkin bir deprem kuşağındadır. Bundan dolayı depremle korozyon arasında doğrudan ilişki vardır. Böylece betonun çatlaması, kırılması, betonun iç yapısı ile mekanik davranışı arasındaki ilişkinin saptanması büyük önem kazanmaktadır. Ülkemizin önemli alt yapılarında kullanılacak yüksek dayanımlı betonların aynı zamanda ekonomik ve dayanıklı olmaları için iç yapı ve mekanik davranış bakımından en yeni tekniklerin kullanılarak incelenmeleri önemli yarar sağlayacaktır. Bunun sonucu olarak da kaynakların daha rasyonel kullanımı söz konusu olabilecektir.

1.2 Amaç ve Kapsam

Beton çimento hamuru, agrega ve çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeyden oluşan üç fazlı bir kompozit malzeme olarak tanımlanabilir. Özellikle betonun kırılması ve deformasyonu çimento hamurunun yapısı ile çok yakından ilgilidir. Betonun mekanik özellikleri ve mikroyapısı ile ilgili konularda geçmiş yıllarda çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel yaklaşımların sınırlı olması yeni

araştırma konularının gündeme gelmesini zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada betonun mekanik davranışına çimento hamurunun etkisi malzeme bilimi yaklaşımı ile ele alınacaktır. Düşük su/çimento oranlı betonlarda beton özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı incelenecek ve bu betonların özellikleri arasındaki korelasyonların kuvvetli veya zayıf olmasına sebep olan etkenler araştırılacaktır.

Beton özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı Oktar ve arkadaşları [7,14] tarafından tanımlanmış ve incelenmiştir. Bu çalışmalarda duyarlılık kavramı aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır: Çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların kılcal boşluklar mı, yoksa hapsedilmiş hava boşlukları mı olduğu bir beton özeliği için önem taşımıyorsa ve bu özeliğin aldığı değerleri bu boşlukların sadece miktarı belirliyorsa bu beton özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarsızdır. Buna karşı bir beton özeliğinin aldığı değerlere çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların miktarından başka türü veya geometrisi de etki ediyorsa bu beton özeliği de çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlıdır. Ref. [7]' de bu düşüncelere dayanılarak duyarlılığın sayısal olarak ifade edilmesini sağlayan iki tip duyarlılık derecesi de tanımlanmıştır. Aynı araştırmacılar daha sonra beton özellikleri arasındaki korelasyonların kuvvetli olmasını sağlayan etkenleri araştırmış ve sonuçta özelliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıklarının birbirine yakın olmasının bunu sağlayan en önemli etken olduğunu göstermişlerdir [8]. Ref.[7] ve [8]' de betonların su/çimento oranları 0.40 ' ın üzerindedir ve deneyler 28 günlük numunelerde yapılmıştır. Son yıllarda kullanımı giderek yaygınlaşan yüksek dayanımlı betonlarda su/çimento oranını kimyasal katkıları kullanarak düşürmek mümkündür. Yapılacak bu çalışmada her iki yayındaki temel konular düşük su/çimento oranlı betonlarda ve çeşitli yaşlarda gözönüne alınmaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Giriş

Çimento esaslı malzemelerin dayanımına etki eden bazı mikroyapısal özellikler vardır. Bunlar, beton içindeki çimento hamuru ve agrega fazının ile bu fazlar arasındaki bağlardır. Kompozit malzeme yaklaşımı ile beton, sertleşmiş çimento hamuru, agrega ve agrega ile çimento hamurunun temas yüzeyinden oluşan üç fazlı bir malzeme olarak gözönüne alınabilir. Betonun ve sertleşmiş çimento hamurunun mekanik özellikleri, hidrate çimentonun kimyasal yapısından ziyade, hidrate ürünlerin fiziksel yapısına bağlıdır. Bu yüzden çimento jelinin fiziksel özelliklerinin doğru şekilde belirlenmesi, bu yapının mekanik davranışı ve durabilitesinin daha iyi açıklanabilmesi açısından oldukça önemlidir. Çimento hamurunun mikroyapısı ve bu yapının beton özelliklerine etkisi ile ilgili geçmiş yıllarda çok sayıda çalışma yapılmıştır [9-14].

2.2 Beton İç Yapısına Bağlayıcı Hamurun Etkisi

Yerleşmiş beton hacminin önemli bir kısmını oluşturan bağlayıcı hamurun özellikleri, betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir. Taze çimento hamuru, su ve çimento tanelerinin oluşturduğu plastik bir kıvama sahiptir. Çimento hamuru pirizini tamamladıktan sonra, plastik kıvama sahip taze hamur, hacmi yaklaşık olarak sabit kalan bir kütleye dönüşmektedir. Zaman içerisinde hidrasyon olayının ilerlemesi ile birlikte, çimento tanelerinin değişik bileşenlerinin oluşturduğu hidrate kristaller, kalsiyum hidroksit kristalleri, bazı minör bileşenler ve hidrate olmamış çimento tanelerinden meydana gelen çimento jeli oluşmaktadır. Bu jel içerisinde de kılcal boşluklara göre boyutları bir mertebe daha küçük olan jel boşlukları mevcuttur. Çimento jelinin fiziksel karakteristiklerinin kullanılan çimentonun kimyasal yapısından çok fazla etkilenmediği, fakat çimento hamurunun mekanik davranışının jel ve dolayısıyla jelin porozitesi ile doğrudan ilgili olduğu görülmüştür [15,17,21]. Çimento jelinin kurutulmuş durumdaki birim

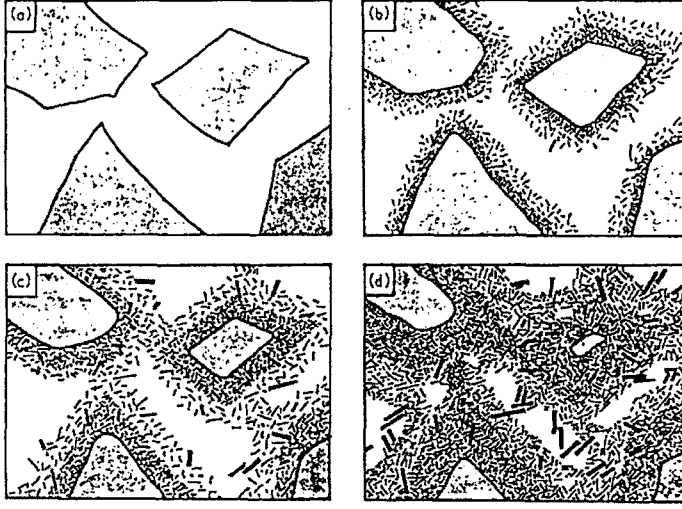
ağırlığı 0.568 gr/cm^3 olup, porozitesi %28 civarındadır. Bu büyük poroziteye rağmen jelin geçirimsizlik katsayısı oldukça düşüktür ($\sim 10^{-14} \text{ cm/sn}$) [15]. Bunun sebebi jel boşluklarının çok küçük oluşudur. Yüksek dayanımlı çimento esaslı malzemelerin dayanımlarına etki eden ve hidrasyon reaksiyonları ile birlikte zaman içerisinde değişerek meydana gelen iç yapıyı oluşturan fazların morfolojisi ve bu fazların yapı içerisindeki dağılımlarının belirlenmesi, mikroyapı davranışının açıklanabilmesi için önemli bir yaklaşım olacaktır.

2.2.1 Hidrasyon ürünleri

Hidrasyon, çimento tanelerinin su ile temas ettiği andan itibaren başlayan ve zaman içerisinde ilerleyen fizikokimyasal bir süreç olarak tanımlanabilir. Hidrasyon olayının üç önemli karakteristiğinden söz edilebilir [16]. Bunlardan birincisi, çimentonun klinker halinde iken su ile reaksiyona girmemesi, ikincisi, hidrasyon reaksiyonunun kısa süre içerisinde meydana gelen bir reaksiyon olmaması, bu olayın zamanın bir fonksiyonu olarak yıllar boyu devam etmesi ve üçüncüsü ise bu olayın ekzotermik bir reaksiyon olması, yani reaksiyon süresince ortaya başlangıçta daha yüksek, zaman içerisinde giderek azalan bir ısınin açığa çıkmasıdır.

Portland çimentosunun karmaşık bileşenlerinden kalsiyum silikatların hidrasyonu sonucunda çimento hamuruna esas dayanımını kazandıran kalsiyum silikat hidrate (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (C-H) ile diğer minör ürünler ile birlikte kalsiyum sülfaloüminatlar oluşur. Bu hidrasyon ürünlerinin yaklaşık %58 lik kısmını C-S-H (Tobermorit), %27 lik kısmını C-H (Portlandit) ve geriye kalan %15 lik kısmını da diğer hidrate elemanlar oluşturmaktadır [16]. Bu değerlere bakıldığında hidrasyonunu tamamlamış bir çimento hamurunun yaklaşık %85' ini C-S-H ve C-H kristalleri oluşturmaktadır.

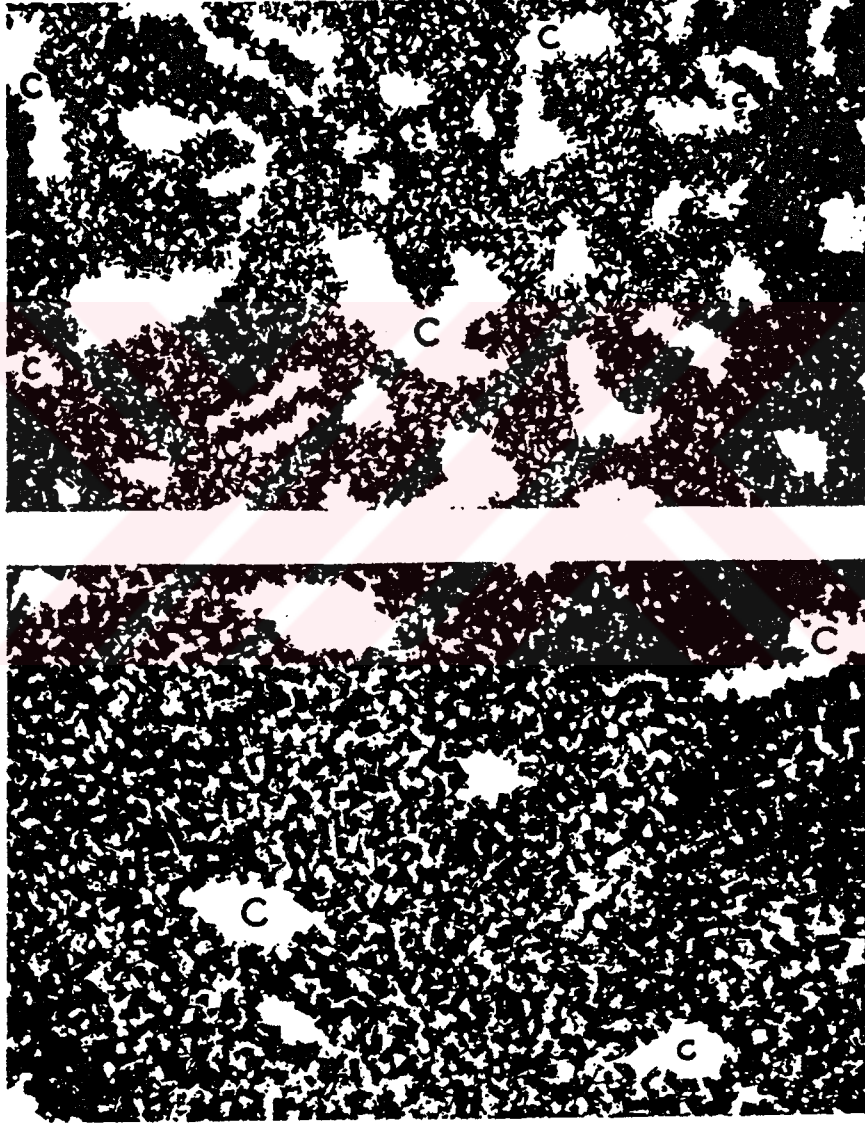
Herhangibir sıcaklık altında Portland çimentosunun pirize başlaması ve sertleşmesi, hamur içerisinde oluşan “jel” ile birlikte gelişen bir olaydır [30]. Bu mekanizma Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Portland çimentosunun priz başlangıcı ve sertleşme mekanizmasını gösteren dört aşama: (a) su ile temas, (b) hidrasyon başlangıcı, (c) jelleşme (priz), (d) sertleşmiş çimento hamuru [30].

Çimento ve suyun karıştırılması çimento tanelerinin su içerisinde dağılmalarını sağlar (Şekil 2.1-a). Çimento tanelerinin su içerisindeki dağılımının homojen olarak ve flokülleşme olmadan sağlanabilmesi için ağırlıkça su/çimento oranı 0.30-0.70 arasında olması önerilir. Fakat günümüzde bu oranı akışkanlaştırıcı katkıları kullanarak aynı homojenliği sağlayacak şekilde daha aşağılara çekmek mümkündür. Çimentonun su ile temas ettiği andan itibaren ilk önce çimento taneleri üzerinde hidrasyon ürünlerinin oluşturduğu yüzey tabakası oluşur. Bu tabaka, kısmen çimento tanesinin hidrate olan kısmı ve kısmen de su içerisinde olacak şekilde bir hacim kaplar (Şekil 2.1-b). Bu aşamada oluşan hidrasyon ürünleri büyük oranda kollodial boyutlarda ($10-1000\text{\AA}$) olup, ayrıca Ca(OH)_2 ve Al, Fe ve SO_4 içeren fazlar gibi daha büyük boyutlu kristaller oluşabilir. Daha sonraki aşamada, çimento tanelerinin etrafında oluşan hidrasyon ürünleri genişlemeye başlayıp komşu çimento tanelerinin hidrasyon ürünleri ile kesişmeler oluşur. Bu sayede taneler arasında “jel” oluşmaya başlar (Şekil 2.1-c). Hidrasyonun bu aşaması, priz başlangıcı olarak kabul edilir. Reaksiyon devam ettikçe, hamur, hidrasyon ürünlerinin birbirleri içine geçmesi ile yoğunluğu giderek artan bir kütle haline gelir (Şekil 2.1-d). Bu olay süresince jel yapısındaki morfoloji belirlemekte, jel içerisindeki hidrasyon ürünlerinin yoğunlaşması bazı bölgelerde daha fazla, bazı bölgelerde ise daha az olmaktadır. Bu da hamur yapısındaki kılcal boşlukların oluşmasına neden olur.

Şekil 2.2' de sertleşmiş çimento hamur yapısının basitleştirilmiş bir modeli görülmektedir [31]. Bu şekilde, rastgele yönlenmiş siyah çizgi gruplarının oluşturduğu kütle çimento jelini, C ile gösterilen beyaz bölgeler kapiler boşlukları ve jel yapı içerisindeki beyaz kısımlar da jel boşluklarını göstermektedir. 1 cm³ anhidr çimentonun hidratasyonu sonucunda açığa çıkan jel hacmi yaklaşık 2.1~2.2 cm³ dür. Oluşan bu jelin 1 cm³ 'ü orjinal çimento tanesinin içerisine doğru ve geriye kalan 1.1 ~ 1.2 cm³ 'ü de hamur içerisindeki su dolu boşluklara doğru ilerler.



Şekil 2.2 Sertleşmiş çimento hamuru yapısının basitleştirilmiş bir modeli: Üstteki şekil su/çimento oranı 0.50, kapiler porozitesi %20 olan ve alttaki şekil su/çimento oranı 0.30, kapiler porozitesi %7 olan hidratasyonunu tamamlamış çimento hamurunu göstermektedir [31].

Çimento içerisindeki karmaşık bileşenlerden C_3S 'in hidratasyonu sonucunda C-S-H ve C-H ürünleri oluşur. Jennings [10,17] tarafından taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemeler bu hidratasyon ürünlerinin bazı tiplere ayrılabilirliğini göstermiştir. Bu sınıflandırma Tablo 2.1’de verilmektedir. Tablo 2.2’ de ise portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler görülmektedir.

Tablo 2.1. C_3S 'in hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler [10,17]

Sınıf	Oluşma Periyodu	Morfolojisi
Tip F (Erken)	İlk birkaç saat içerisinde	Zayıf tabakalar veya yapraklar halinde ve kurutulduğunda C_3S tanesi üzerinden değişik açılarda uzanan silindirik şeklindeki tüpçükler.
Tip 1 (Orta)	İlk birkaç gün içerisinde	C_3S tanelerinin yüzeylerine dik şekilde yönelen, konik, iğnecikler halindeki ürünler
Tip 3 (Geç)	İlerleyen günler içerisinde	Küçük, düzensiz ve yassılaştırmış taneler ya da kendi içerisinde tabakalanmış buruşuk yapraklar biçimindeki ürünler
Tip 4	İlk 24 saat’ten sonra	Yoğun ve jelatinimsi iç ürün

Tablo 2.2. Portland çimentosunun hidratasyonu sonucunda oluşan ürünler [10,17]

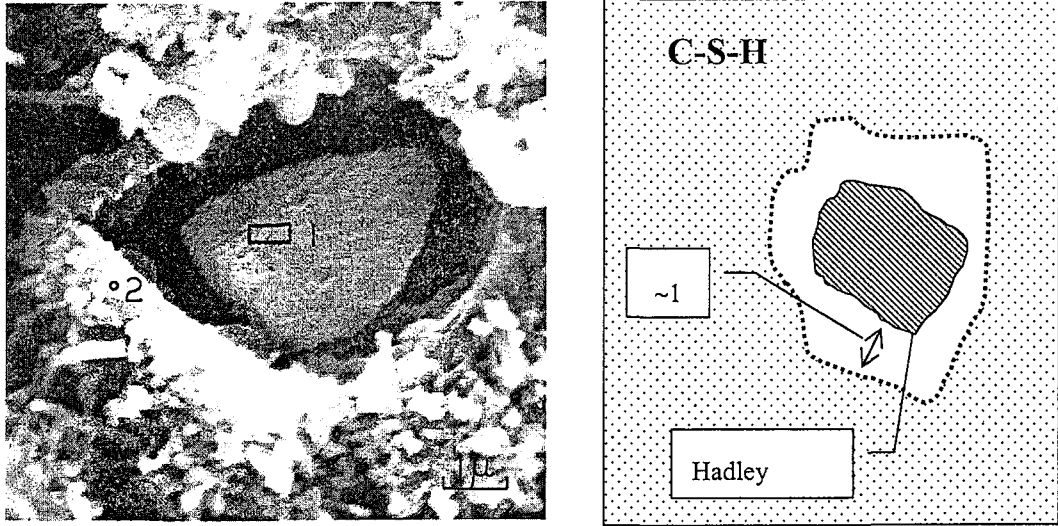
Sınıf	Oluşma Periyodu	Morfolojisi
Tip E	İlk birkaç saat içerisinde	Tanelerin etrafını saran, bileşimi Etrenjit (Aft)’ e yakın jelatinimsi tabaka
Tip 1 (C-S-H)	İlk birkaç gün içerisinde	Fiber şekilli ürünler
Tip 2 (C-S-H)		Ufak çantacıklar görünümüne sahip ağ biçimli ürünler
Aft ^(*)		Çubuk ve tüp şeklindeki ürünler
Tip 3 (C-S-H)	İlerleyen günler içerisinde	Küçük düzensiz veya yassılaştırmış taneler yada kendi içerisinde tabakalanmış buruşuk görünümlü yapraksı ürünler
Tip 4 (C-S-H)		Yoğun iç ürün
Hadley Tanesi		İç boş kabuk şeklindeki ürünler (Bkz. Şekil 2.3)
Aft ^(*)	İlk 24 saat’ten sonra	Çubuk ve tüp şeklindeki ürünler
Afm ^(**)		Tabakalar halindeki ürünler
Aft ^(*) : Yapı ve bileşim olarak etrenjite yakın bir faz.		
Afm ^(**) : Yapı ve bileşim olarak monosülfat alüminat hidrate’ye yakın bir faz.		

Hidratasyonun başlaması ile birlikte, hidrate olmamış tanelerin yüzeylerinden dışarı ve tanenin içerisine doğru gelişen hidratasyon ürünleri oluşur. Bunlardan birincisine “dış ürün” ve ikincisine “iç ürün” denilebilir. Hidrate C_3S üzerinde yapılan incelemelerde [18,19], oluşan iç ürünün dış ürüne göre daha az boşluklu bir yapıya sahip olduğu görülmüş, iç ve dış ürünler arasındaki bölgenin henüz tam olarak anlaşılamadığı, fakat, hidratasyon olayında bu bölgenin önemli bir rol oynadığının

açık olduğu belirtilmiştir. İleri sürülen hipotezlerden birine göre iç ve dış ürünlerin oluşumu, reaksiyonun başlaması ile birlikte başlamakta ve orijinal tanenin yüzeyi bu iki tip ürün arasında bir sınır oluşturmaktadır. Bu durumda, yani iç ve dış ürünlerin oluşmaya başlaması reaksiyonun başlaması ile birlikte aynı anda oluyorsa, oluşan bu farklı ürünlerin miktarlarının oranı herhangi bir koşulun değişmesinden etkilenmemelidir. İleri sürülen diğer bir hipoteze göre, iç ürün reaksiyon başladıktan bir süre sonra oluşmaya başlamakta, dış ürünün oluşumu daha önce başladığından bu ara bölge iç ve dış ürünlerin iç içe geçmesinden oluşan bir bölge olmaktadır. Bu durumda da pek çok değişken iç ve dış ürünlerin oranlarını etkiler. Örnek vermek gerekirse hidratasyon ürünlerinin oluşabilmesi için gerekli boşluk imkanını vermeyecek düşük su/çimento oranlı hamurlarda iç ürünlerin erken oluşumu söz konusu olur. Benzer şekilde ince taneler, iç ürün oluşmaya başlamadan tükenebileceğinden, daha ince taneli hamurlarda oluşabilecek iç ürün miktarı, daha kaba taneli hamurdakine göre daha az olur. Ayrıca kullanılan katkıları da bunların oranlarını etkileyebilirler. Herbir tane arasındaki mesafe de dış ürün miktarını etkiler. Birbirine çok yakın olan taneler arasında oluşacak dış ürün daha yoğun bir yapıya sahip olur.

Şu ana kadar bahsedilen C_3S' in reaksiyonu sonucu oluşan mikroyapı ile Portland çimentosunun reaksiyonu sonucunda oluşan mikroyapı arasında bazı farklar söz konusudur. Bunlar arasındaki en temel fark, hidratasyonun başlangıç aşaması sırasında, çoğu çimento tanesi etrafında alüminat fazını da içine alan bir ürün tabakasının oluşmasıdır. Etrenjit adı verilen, çimentonun karmaşık bileşenlerinden C_3A , su ve piriz süresini ayarlamak amacı ile çimento üretiminde katılan alçı taşı (jips) $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$ 'nın suda çözünmesi ile birlikte açığa çıkan sülfatın birleşimi ile oluşan bu ürün, iğne şeklinde bir kristal yapıya sahiptir $(C-A-\bar{S}-H)$. Çimento taneciklerinin etrafında oluşan bu tabaka zaman içerisinde tabakanın altında bulunan hidrate olmamış çimento tanesinin yüzeyinden ayrılmakta ve sonuç olarak tabaka ile anhidr çimento tanesi arasında yoğunluğu düşük bir bölge oluşmaktadır. Eğer bu bölge boş olursa, tabaka ile çimento tanesi arasında bir boşluk meydana gelir. Bu şekilde oluşan yapıya “ Hadley Tanesi” adı verilir (Şekil 2.3). 1 gün süren hidratasyon sonunda bu tabaka yaklaşık 1µm kalınlığında olup, reaksiyon ilerledikçe, tabakanın içerisindeki ürünlerin oluşumu ile birlikte yoğunluğu giderek artan bir

tabaka haline gelir [10,47]. Hidratasyonun ilk zamanlarında meydana gelen bu tanelerin hamurun mekanik davranışını olumsuz yönde etkileyeceği açıktır.



Şekil 2.3 Hadley tanesi [47], (a) TEM monografi, (b) Şematik gösterim

2.2.2 Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki boşluklar

Taze çimento hamuru, çimento taneleri ile suyun karıştırılması ile oluşur. Karışım oranına bağlı olarak plastik veya akıcı bir kıvama sahiptir. Hidratasyon süresi boyunca oluşan hidrate içleri kısmen su ile dolu veya boş kılcal boşluklar ve jel boşlukları ile karıştırma sırasında oluşabilecek sürüklenmiş hava boşluklarını içerir. Bu boşlukların miktar, boyut ve şekilleri hamurun dayanımını, geçirimliliğini ve dolayısıyla durabilitesini çok önemli derecede etkiler. Mindes ve arkadaşları [10] hidrate çimento hamuru içerisindeki boşlukları boyutlarına göre, i) sürüklenmiş hava boşluğu, ii) kapiler boşluklar ve iii) jel boşlukları olarak sınıflandırmışlardır (Tablo 2.3).

2.2.2.1 Jel boşlukları

Hidratasyon ürünlerinin oluşması ile birlikte meydana gelen jel yapı, büyük miktarda buharlaşabilen su içerdiği için bu su jelin boşluklu bir yapıya sahip olmasına neden olur. Jel miktarı, hidratasyon ilerledikçe artar. Böylece jelin yapı içerisindeki kapladığı hacim de artacağından kılcal boşlukların hacmi azalır. Jel boşlukları toplam jel hacminin yaklaşık %28' ini oluşturur [15]. Jelin porozitesinin gerçek değeri

seçilen çimentonun karakteristiğine bağlı olup, bu değer hazırlanan karışımın su/çimento oranına ve hidrasyonun gelişimine hemen hemen hiç bağlı değildir [21]. Bu ise hidrasyonun her aşamasında aynı özelliklere sahip jelin oluşması ve ilerleyen hidrasyonun önceden oluşan jel yapısını değiştirmedeği anlamına gelmektedir.

Tablo 2.3 Hidrate çimento hamuru içerisindeki boşlukların sınıflandırılması [10]

Boşluk Tipi	Boyutları	Tanımı	Boşluk İçerisindeki Suyun Etkisi	Hamurun Etkilediği Özellikler
Sürüklenmiş Hava	0.1-1.0 mm	Yuvarlak Kesitli	Boş	Dayanım
Kılcal Boşluklar	10-0.05 μm	Büyük kılcal boşluklar	Serbest su	Dayanım ve geçirimsizlik
	50-10 nm	Orta büyüklükteki kılcal boşluklar	Orta kuvvette yüzey gerilim kuvveti yaratır	Dayanım, geçirimsizlik ve yüksek rutubet değerlerinde rötre
Jel Boşlukları	10-2.5 nm	Küçük kılcal boşluklar (Jel boşlukları)	Güçlü yüzey gerilim kuvveti yaratır	%50 bağıl nemde rötre
	2.5-0.5 nm	Mikro Boşluklar	Güçlü adsorblanmış sudur	Rötre ve sünme
	<0.5 nm	Kristaller arası boşluklar	Bağlar içerisindeki yapısal sudur	Rötre ve sünme

Jelin porozitesi (P_{jel}) olarak belirttiğimiz %28 değeri Powers tarafından şu şekilde hesaplanmıştır[15,31]:

$$P_{jel} = 1 - \frac{\left(1 + \frac{w_n^0}{c}\right) v_{hc}}{v'_c + v_w \left(\frac{w_0}{c}\right)^*} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıyı “Porozite=1-Kompasite” şeklinde düşünebiliriz. Burada P_{jel} , jelin porozitesi olmak üzere, v_{hc} , hidrate çimentonun cm^3/gr cinsinden özgül hacmi, v'_c , anhidr çimentonun cm^3/gr cinsinden özgül hacmi, (w_n^0/c) , çimentonun tamamen hidrate olabilmesi için gerekli su/çimento oranı ve $(w_0/c)^*$, karışımın su/çimento oranı olup $(w_n^0/c)=0.23$, $v_{hc}=0.411$, $v'_c=0.315$, $v_w=0.99 \text{ cm}^3/\text{gr}$ ve $(w_0/c)^*=0.38$ değerlerini yerine koyarsak jelin porozitesini $P_{jel}=0.28$ olarak bulunabilir.

Hidrasyon sonucunda oluşan jel çok büyük bir özgül alana sahiptir. Jelin özgül yüzey alanı yaklaşık $200000 \text{ m}^2/\text{gr}$ olduğu [21] saptanmıştır. Hidrate olmamış

çimentonun özgül yüzey alanının 200~500 m²/gr olduğu düşünülürse, hidrasyon sonucunda bu alan yaklaşık 400~1000 kat artmaktadır. Bu durumda jelin, yüzeylerinde oldukça fazla su adsorbe edebilme kapasitesine sahip olduğu düşünülebilir.

2.2.2.2 Kılcal boşluklar

Kılcal boşluklar, hidrasyon ürünlerinin oluşması ile birlikte bu ürünlerin kapladıkları hacimler arasında kalan, içleri su ile dolu olan boşluklardır. Jeli oluşturan mikroyapı içerisinde, hidrate olmamış taneler ile iç ve dış olarak adlandırdığımız hidrasyon ürünleri mevcuttur. Dış ürünler su ile dolu olan boşlukları doldurur. İç ürünler ise orjinal C₃S veya çimento tanesinin sınırlarından içeriye doğru ilerler. Sertleşmiş C₃S veya Portland çimentosu hamuru içerisindeki dış C-S-H ürünleri lifsi ve doğrusal bir morfolojiye sahiptir. Bu lifler arasındaki boşluklar hamurun dayanımı ve dürabilitesi açısından esas önemi oluşturan kılcal boşlukları meydana getirmektedir [22]. Bu tanımlardan anlaşılabileceği gibi kılcal boşlukların hacimleri hidrasyon süresince azalmakta, bunun yanında jel hacmi ve dolayısıyla jel boşlukları artmaktadır. Kılcal boşlukların miktarları ve şekilleri çimentonun hidrasyon derecesine, su/çimento oranına [23-25], katkı kullanımı ve kür koşullarına göre değişim göstermektedir. Khatib ve arkadaşları [26], sabit su/çimento oranı ve akışkanlaştırıcı katkılı ve katkısız hazırladıkları çimento hamurları üzerinde, değişik kür koşullarında hamurun boşluk yapısını civalı porozimetre ölçümleriyle incelemişlerdir. Numunelerin üretiminde kullandıkları su/çimento oranı (0.45) hamur için yüksek bir oran olarak kabul edilebilmesine rağmen, hamur içerisindeki toplam boşluk miktarının akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile birlikte azaldığını, bu azalmanın numuneye uygulanan kür koşullarına göre %8.5 ile %26 arasında değiştiğini belirtmişlerdir.

Su/çimento oranının yaklaşık 0.38 değerinden yüksek oranda hazırlanan hamurlarda, %100 hidrasyon sağlansa da, oluşan hidrasyon ürünleri yapı içerisindeki bütün boşlukları doldurmaya yeterli olmaz ve bir miktar kılcal boşluk kalır [21]. Bunu basit bir sayısal örnek ile göstermek mümkündür. Hidrasyonunu tamamlamış boşluksuz çimento hacmi, anhidr çimentonun işgal ettiği hacim ile buharlaşamayan su miktarı hacimleri toplamından daha küçüktür. Yapılan incelemelere göre, hidrate çimentoda katı fazın mutlak hacmi, hidrate olmamış çimento hacmi ile buharlaşamayan su

miktarının %25.4 oranında azaltılmış hacimlerinin toplamına eşittir [16,21]. Bu hacim V_c ile gösterilecek olursa

$$V_c = \frac{C}{\delta_c} + 0.23C(1 - 0.254) \quad (2.2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada C , anhidr çimento ağırlığı ve δ_c , çimento özgül ağırlığıdır. Su/çimento oranı 0.30 olan 100 gr. çimento ve 30 gr. su ile hazırlanan çimento hamurunu gözönüne alalım. Suyun x gr çimentoyu hidrate edebileceğini ve çimentonun özgül ağırlığının 3.08 gr/cm^3 olduğunu düşünersek:

$$V_c = \frac{x}{3.08} + x0.23(1 - 0.254)$$

$$V_c = 0.497x$$

kadar olur. Oluşan jel hacminin porozitesinin yaklaşık %28 olacağını daha önceki paragraflarda belirtmiştik. Bu durumda jelin porozitesi:

$$\frac{w_g}{0.497x + w_g} = 0.28$$

olacaktır. Burada w_g , jel suyunun hacmini göstermektedir. Bu bağıntı sadeleştirilirse;

$$w_g = 0.19x \quad (a)$$

olur. Diğer taraftan çimento hamuru içerisinde kullanılan su miktarı ($0.30 < 0.38$ olduğundan hidratasyonun sonunda kılcal boşluk kalmayacağını da düşünerek);

$$0.23x + w_g = 30 \quad (b)$$

olur. (a) ve (b) bağıntıları birlikte çözülürse, $x=71.4 \text{ gr}$ ve $w_g=13.6 \text{ gr}$ olarak bulunur. Yani karışım içerisindeki su sadece 71.4 gr çimentoyu hidrate edebilmiştir. Bu değer hacim olarak 23.2 ml yapmaktadır. Dolayısıyla hidrate çimento hacmi, jel boşluklarındaki hacim ile birlikte;

$$0.497 \cdot 71.4 + 13.6 = 49.1 \text{ ml}$$

olur. Hidrate olmayan çimento hacmi ise;

$$(100-71.4)/3.08=9.3 \text{ ml}$$

olacaktır. Dolayısıyla boş kılcal boşluk hacmi;

$$((100/3.08)+30)-(49.1+9.3)=4.1 \text{ ml}$$

bulunur. Bu durumda 23.2 ml çimento tanesinin hidratasyonu sonucunda 49.1 ml jel hacmi oluşmaktadır. Yani, 1ml çimento tanesinin hidratasyonu sonucu 2.12 ml jel hacmi oluşur. Numunenin dışarıdan bir miktar daha su alabileceğini düşünürsek, geriye kalan 4.1 ml kılcal boşluğun doldurulabilmesi için gerekli olan çimento miktarı 3.7 ml ($4.1/1.12$) yapar. Fakat bu durumda tüm kılcal boşluklar dolduktan sonra ortamda hala $9.3-3.7=5.6 \text{ ml} = 17.2 \text{ gr}$ hidrate olmamış çimento tanesi mevcuttur. Bundan sonra hidratasyon ürünlerinin oluşabileceği bir hacim kalmadığından, geriye kalan tanelerin hidratasyonunu tamamlaması mümkün olmaz. Bu durumda oluşan hamurun “jel/(jele ayrılacak hacim)” oranı 1.0 olur. Hamur içerisinde hidrate olmamış çimento tanelerinin kalmış olması dayanımı olumsuz etkilememekte, aksine, jel/hacim oranı 1.0 olan çimento hamurları içerisinde anhidr çimento oranı fazla olan hamurun dayanımının daha yüksek olduğu görülmüş, bunun nedeni olarak da, anhidr çimento tanesinin etrafını saran hidratasyon ürünlerinin oluşturduğu tabakanın, anhidr çimento tanesine göre daha zayıf olduğu ileri sürülmüştür [21,27]. Diğer taraftan Oddler ve arkadaşları [28], değişik su/çimento oranlarında ve değişik sıcaklık ve sürelerde küre tabi tutulmuş çimento hamurlarının dayanımlarına boşluk yapısı ve hidratasyon derecesinin etkisini incelemişler, sabit porozitede çimento hamuru dayanımının hidrate ürünlerin artması ile arttığını, hidrate olmamış tanelerin tükenmesinin dayanımı olumlu yönde etkilediğini, fakat bu etkinin porozitenin yarattığı olumsuz etkiye göre daha az olduğunu belirtmişlerdir.

Az önce verilen örneğin tersi olacak şekilde 0.38 su/çimento oranının üzerinde bir karışıma sahip çimento hamuru düşünelim. 100 gr çimento ve 50gr su ile hazırlanmış, su/çimento oranı 0.50 olan hamurda, karışım içerisindeki tüm çimentonun tamamen hidrate olduğunu kabul edelim. Hidratasyonun tamamen sağlanabilmesi için çimento tanelerinin kullandığı su miktarı $100*0.23=23 \text{ gr}$ olur. Oluşacak hidrate üründe katı fazın hacmi ise;

$$V_c = \frac{100}{3,08} + 0.23 * 100(1 - 0.254)$$

$V_c=49.7$ ml olacaktır . Jelin porozitesinin 0.28 olduğu düşünülürse;

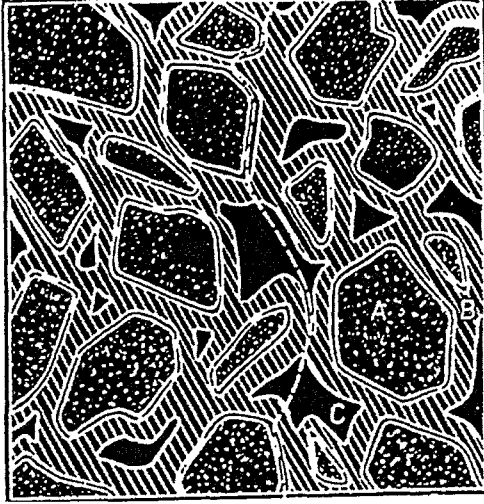
$$\frac{w_g}{49.7 + w_g} = 0.28$$

$w_g=19.3$ ml olacaktır. Dolayısıyla jel hacmi $49.7+19.3=69.0$ ml olur. Karışıma konulan toplam su miktarının 50 ml olduğu düşünülürse, $50-(23+19.3)=7.7$ ml su hala kapiler boşluklarda mevcuttur. Ayrıca başlangıçta karışıma katılan su ve çimento hacimlerinin toplamı ile, jel hacmi ve kılcal su hacimleri toplamı arasındaki fark bize boş kılcal boşluk hacmini verir. Bu durumda boş kılcal boşluk hacmi;

$$\left(50 + \frac{100}{3.08}\right) - (7.7 + 69.0) = 5.8 \text{ ml}$$

olur. Numunenin dışarıdan su alması mümkün olsa bile bu su sadece kılcal boşluklarına dolar, fakat çimento tanelerinin hidratasyonu tamamlandığından bu hacimlerin hidratasyon ürünleri ile dolması mümkün olmaz. Dolayısıyla bu boşluklar kısmen boş, kısmen de su ile dolu boşluklar olarak sertleşmiş hamur içerisinde kalır. Karışımın su/çimento oranı arttıkça, hamur içerisindeki kılcal boşluklar da artacağından hamurun dayanımı ve dürabilitesi düşer.

Portland çimentosu hamuru, boyutları itibari ile kılcal boşluk olarak kabul edilebilecek bir boşluk tipi daha içerirler [10]. Bu boşluklar, hidrate olmamış çimento tanelerinin sınırları üzerinde oluşurlar. Hadley taneleri olarak adlandırılan taneler üzerinde oluşan bu boşluklu yapı, nispeten seyrek rastlanılan bir boşluk tipi olup, bazı çimento tiplerinde daha yaygın olduğu görülmüştür. Hadley tanelerinin boyutlarının en fazla çimento tanesi kadar olabileceği düşünülürse bu boşluklar boyutları itibariyle kılcal boşluklar olarak kabul edilebilir ve kılcal boşluklar gibi davranabilirler. Hamur içerisinde birbirleri ile bağlantılı bir ağ oluşturan Hadley taneleri, çatlağın kolayca ilerleyebileceği bir yol oluşturabilirler (Şekil 2.4).



- A : İç Ürün
 B : Dış Ürün
 C : Boşluk
 ----- : Çatlak Yolu

Şekil 2.4 Portland çimentosu hamurunda oluşabilecek olası çatlak yolu [10]

2.2.2.3 Hava boşlukları

Hava boşlukları, kılcal ve jel boşluklarına göre daha büyük boyutlarda (milimetre mertebesinde), küresel şekilli boşluklardır. Bu boşluklar, beton içerisinde harç fazında karıştırma sonucu oluşan düzensiz yapıdaki hapsolmuş hava boşlukları, fazla karma suyunun buharlaşması sonucunda oluşan hava boşlukları veya isteğe bağlı olarak hava sürükleyici katkılar yardımı ile oluşturulan, boyutları 10 ~250 μm mertebesinde olan küresel şekilli, birbirleri ile bağlantıları olmayan hava boşlukları şeklinde olabilir[33]. Boyutları itibarı ile kılcal ve jel boşluklarından daha büyük boyutta olduklarından bu boşlukların artması dayanımın düşmesine neden olur. Diğer taraftan hapsolmuş hava boşlukları beton içerisindeki kılcal boşlukların yollarını kestiğinden bu bölgelerde hazne görevi görüp, betonun kılcal geçirimliliğini düşürür. Bu da dürabilitenin artmasına neden olur. Hava boşlukları hamur içerisinde hava kabarcıkları şeklinde bulunduklarından, bunların miktarını ve hamur içerisindeki dağılımını karışımın su/çimento oranı değil, kullanılan katkı tipi, karıştırma koşulları (karıştırma süresi, hızı, ortam koşulları, vb.) ve kalıba yerleştirme sırasında uygulanan yerleştirme şekli ve süresi belirler [29].

2.2.3 Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki su

Genel olarak sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki su üç durumda bulunmaktadır: i) kimyasal bağlı, ii) fiziksel bağlı, ya da ii) serbest su [42].

Hamur içerisinde kimyasal bağlarla tutulan su, çimento jelinin tamamlayıcı bir parçasını oluşturmaktadır. Bu su “buharlaşamayan su” olarak tanımlanabilir. Fiziksel olarak adsorbe edilen su ise çimento jeli yüzeylerinde van der Waals kuvvetleri ile tutulan sudur. Serbest su ise geriye kalan su miktarı olup, kılcal boşluklar içerisindeki sudur. Çimento jeli yüzeylerinde fiziksel bağlarla tutulan su ile serbest su toplamına “buharlaşabilen su” denmektedir. Bu su, sertleşmiş çimento hamuru bünyesinden 105 °C sıcaklıkta buharlaştırılarak uzaklaştırılabilir. Buharlaşamayan su, çimento jeli yapısı içerisinde kimyasal olarak bağlanan hidrasyon suyudur. Bu suyun miktarı bize çimentonun hidrasyon derecesi hakkında bilgi verir. Bu miktarın bulunması için, granül hale getirilen sertleşmiş çimento hamurunun 1000°C’ da kızdırılması ve ağırlık kaybının ölçülmesi gerekir. Ancak numunenin daha önce 105 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilerek buharlaşabilen suyun uzaklaştırılmış olması gerekmektedir.

2.3 Bağlayıcı Hamurun Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi

İnşaat mühendisliği uygulamalarında yapı malzemesi olarak en yaygın şekilde kullanılan betondan beklenen üç temel nitelik vardır. Bunlar, i) işlenebilirlik ii) dayanım, ve iii) dürabilite’ dir. Bunlardan birincisi olan işlenebilirlik bir taze beton özeliği olup, betonun dayanımı ve çevre koşullarına karşı dayanıklılığı (dürabilitesi) ise sertleşmiş betonun iç yapısına bağlı niteliklerdir.

Beton iç yapısının kompozit malzeme yaklaşımı ile çimento hamuru, agrega ve agrega ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey olmak üzere üç fazdan oluşmakta olduğunu bilmekteyiz. Dolayısıyla bağlayıcı hamur yapısının betonun mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olacağı açıktır. Hidrasyon sonucunda açığa çıkan ve çimento hamurunun bir kütle olarak davranmasını sağlayan hidrate ürünlerin yapısı, hamurun porozitesi, hidrate ürünler arasındaki bağlar ve hamur içerisindeki boşluk tipleri ve yapıları hamurun mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyecektir. Betonun davranışının incelenmesi ve modellenebilmesi için öncelikle çimento hamurunun davranışını anlamak ve bunu betonun davranışı ile ilişkili duruma getirmek doğru bir yaklaşım olacaktır.

Çimentonun su ile temas ettiği andan itibaren başlayan hidrasyon reaksiyonu ile birlikte, her bir çimento tanesinin etrafında tane yüzeyinden dışarı ve içeri doğru

gelişerek oluşan hidrate ürünler birbirleri ile temas ettikleri yerlerde iç içe girmekte ve bu temas noktalarında oluşan bağlar hamurun akışkan veya plastik halden katı hale geçmesini sağlamaktadır. Hidratasyon devam ettikçe iç içe geçen hidratasyon ürünlerinin temas noktaları arasında oluşan bağlar da artar ve yoğunluğu yüksek bir yapı oluşur. Sonuçta bu bağlar çimento hamurunun rijitliğini ve dayanımını sağlayan en önemli etken olur. Çimento hamurunun dayanım ve deformasyon özellikleri, hidratasyon reaksiyonları sonucunda oluşan bu kollodial parçacıkların yüzeylerinin moleküler yapılarına ve bunlar arasındaki bağların yapısına bağlıdır [32].

Bu bölümde bağlayıcı hamurun betonun mekanik özelliklerine etkisi, su/çimento oranının değişimi, jel/hacim oranı, porozite, agrega ve agrega ile çimento hamuru arayüzeyinin etkisi olmak üzere ele alınmaktadır.

2.3.1 Su/çimento oranının etkisi

Mühendislik uygulamalarında belirli bir küre tabi tutulmuş ve belirli bir yaşa gelmiş beton ya da çimento hamuru numunelerinde dayanıma etki eden iki önemli faktör sözkonusudur. Bunlar karışımın su/çimento oranı ve karışımın kalıp içerisindeki sıkıştırılma oranıdır [21]. Abrams ve Feret boşluk miktarının ve başlangıç su/çimento oranının betonun dayanımı üzerindeki önemini dolaylı veya dolaysız olarak ilk ifade eden araştırmacılar [21,29]. Abrams bağıntısına göre dayanım, σ_c ,

$$\sigma_c = K . A^{-(w / c)} \quad (2.3)$$

ile ifade edilmiştir. Bu bağıntıda K ve A nümerik sabitler olup, w/c su/çimento oranını ifade etmektedir. Feret bağıntısına göre ise dayanım, σ_c ,

$$\sigma_c = K \left[\frac{c}{c + w + a} \right]^2 \quad (2.4)$$

bağıntısı ile ifade edilmiştir. Bu bağıntıda c, çimento hacmi, w, su hacmi ve a karışımdaki hava hacmi olup, parantez içerisindeki kısım çimento konsantrasyonunu ifade eder.

Bu bağıntılar haricinde su/çimento oranı ve boşluk miktarını içine alan Bolomey ve Graf formülleri de mevcuttur [33]. Bolomey formülüne göre dayanım, σ_c ,

$$\sigma_c = K \left[\frac{C}{E + h} - k \right] \quad (2.5)$$

Graf formülüne göre dayanım, σ_c ,

$$\sigma_c = \frac{f_{cc}}{K} \left(\frac{C}{E} \right)^2 \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu bağıntılardaki K ve k değerleri nümerik katsayılar olup, C ve E sırasıyla karışımdaki çimento ve su ağırlığını göstermektedirler.

Seki ve arkadaşları [34] etkin su/çimento oranı olarak tanımladıkları hidrate olmuş çimento ağırlığı ve karışım suyu arasındaki oran ile beton basınç dayanımları arasında lineer bağıntılar tanımlamışlar ve çimentonun hidratasyon derecesi ile dayanımlar arasındaki bağıntıların oldukça güçlü olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca Neville [35], Portland çimentosu ile üretilen betonlarda çimento/su oranının yaklaşık 0.9 ile 2.4 aralığında olması durumunda dayanım ile çimento/su oranı arasındaki bağıntıların lineer olduğunu, fakat alüminli çimentolarda bu oranın yükselmesi ile dayanımın artış hızı giderek azalan bir grafik çizdiğini ifade etmiştir.

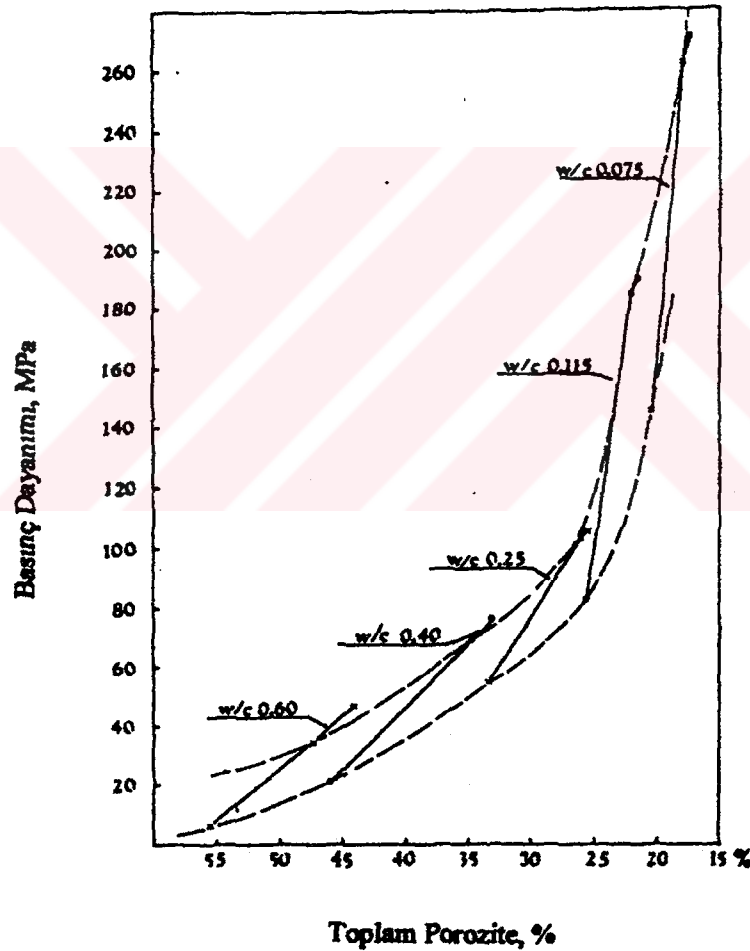
Wittmann ve arkadaşları [36], yaşın, su/çimento oranının ve yükleme hızının betonun kırılma enerjisi üzerindeki etkisini araştırmış, 0.40, 0.50 ve 0.60 su/çimento oranına sahip betonlar üzerinde yaptıkları deneylerde, kırılma enerjisi (G_F), elastisite modülü ve çekme dayanımlarının su/çimento oranının artması ile belirgin şekilde düştüğünü görmüşlerdir.

Popovics'e [39] göre betonun dayanımının değişimi sadece su/çimento oranı büyüklüğüne bağlı olmayıp, bu oranın nasıl değiştiğine de bağlıdır:

- i) Su miktarını sabit tutarak, çimento miktarını değiştirmek; dayanımın daha büyük değişim göstermesine neden olacaktır.
- ii) Çimento miktarını sabit tutarak su miktarını değiştirmek; dayanımın daha az değişim göstermesine neden olacaktır.
- iii) Hem çimento hem de su miktarını birlikte değiştirmek.

Popovics bu çalışmasında, betonda su miktarı sabit tutulduğunda, karışıma ilave edilen çimentonun yararının çimento miktarı arttıkça azaldığını görmüştür.

Su/çimento oranı, sadece çimento hamurunun toplam porozitesini değil, aynı zamanda bağlayıcı hidratasyon ürünlerinin karakterini de etkiler [61]. Düşük su/çimento oranlı hamurlar, hidratasyon ürünlerinin küçük boyutlu olmalarından dolayı nispeten küçük özgül yüzeyli ve oldukça yoğun görünüşlüdür. Bu yapı içerisindeki mikroboşlukların ortalama boyutları 300 Å° dan daha küçüktür. Bağlayıcı hidratasyon ürünlerinin karakteristiğindeki bu değişikliklerden dolayı, su/çimento oranının düşmesi ile birlikte bağlanma kapasitesi belirgin şekilde artar.



Şekil 2.5 Sertleşmiş çimento hamurunda, değişik su/çimento oranlarında basınç dayanımı ile toplam porozite arasındaki ilişki [61]

Dolayısıyla düşük su/çimento oranlı sertleşmiş çimento hamuru veya betonlarda görülen yüksek dayanım ve diğer olumlu özelliklerin nedeni olarak, kılcal boşlukların

zararlı etkilerinin giderilmesinin dışında hidrasyon ürünlerinin düşük porozite ve yüksek bağlanma kapasitesine sahip olması da gösterilebilir. Şekil 2.5 de değişik su/çimento oranlarına ait sertleşmiş çimento hamurlarında toplam porozite ile basınç dayanımları arasındaki ilişki verilmektedir.

2.3.2 Jel / hacim oranı

Herhangibir su/çimento oranındaki hamurun dayanımı özellikle çimentonun hidrasyon derecesine, kimyasal ve fiziksel özelliklerine bağlıdır. Bunlara, hidrasyon reaksiyonunun devam ettiği ortam sıcaklığı, betonun ya da hamurun hava içeriği, etkin su çimento oranı ve terlemeden dolayı meydana gelebilecek çatlak oluşumlarını örnek olarak sayabiliriz [21].

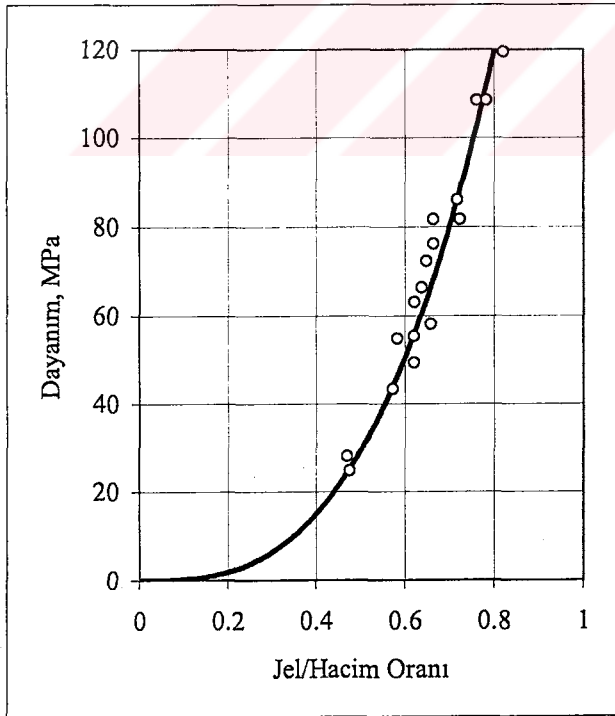
Su/çimento oranının betonun dayanımı üzerindeki etkisini ifade eden bağıntılardan paragraf 2.3.1' de bahsedilmişti. Bu oran bilindiği gibi beton karışımına giren su ve çimento miktarlarının ağırlıkça oranını ifade etmektedir. Dayanımı, hamur içindeki boşluklarda oluşabilecek çimento hidrasyon ürünlerinin konsantrasyonu ile ilişkilendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır [21,29,31]. Powers[31], su/çimento oranının yanında, çimento hidrasyon ürünlerinin konsantrasyonunu da içine alan “Jel/Hacim” oranını tanımlamıştır. Bu tanımda jel/hacim oranı, hidrate çimento hacminin (jel hacmi), hidrate çimento hacmi ile kılcal boşlukların hacimlerinin toplamına oranı olarak ifade edilmiştir. Başka bir deyişle jel/hacim oranı, jel hacminin jele ayrılacak hacme oranı olarak düşünülebilir. Orjinal çimento tanesinin, hidrasyon sonunda anhidr çimento tanesi hacminin iki katından daha fazla bir hacim kapladığı bilinmektedir. 1 cm³ çimento tanesinin hidrasyon sonucunda 2.06 cm³ hacim kaplayacağını düşünürsek, C, çimento ağırlığı, v_c, çimentonun birim ağırlığının hacmi, w, karışım suyu ve α, hidrasyon derecesi olmak üzere jel hacmi;

$$V_j = 2.06Cv_c\alpha \quad (2.7)$$

kadar olacaktır. Jelin oluşabilmesi için hamur içerisindeki toplam boşluk hacmi, $Cv_c\alpha + w_0$ olacağından jel/boşluk hacmi oranı;

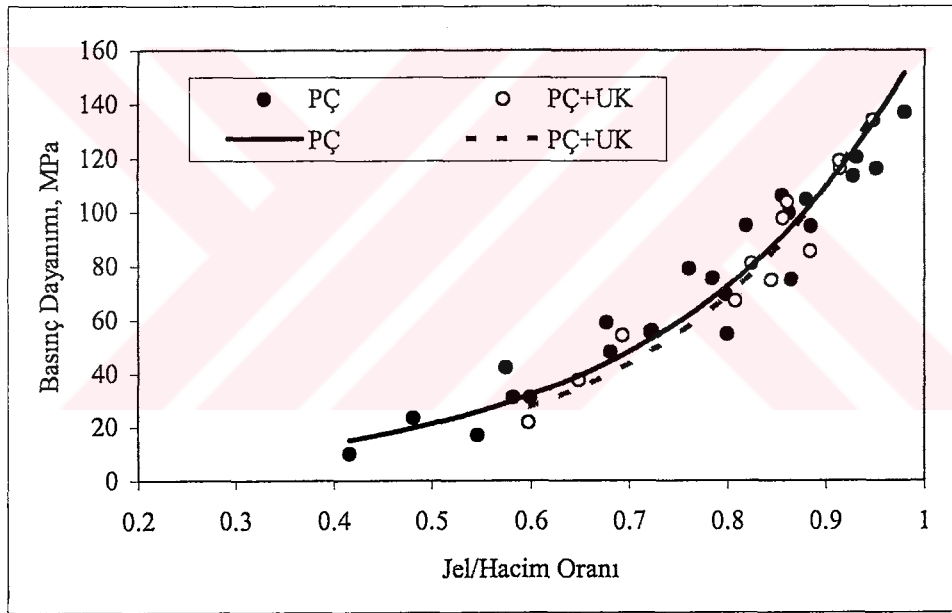
$$X = \frac{2.06 v_c \alpha}{v_c \alpha + \frac{w_0}{C}} \quad (2.8)$$

bağıntısı ile gösterilebilir. Bu bağıntıya göre jel/hacim oranının artması, hamur içerisindeki kılcal boşluk hacimlerinin giderek dolduğunu ifade eder. Bu oranın 1 olması ise jelin hamur içerisindeki bütün kılcal boşluk hacimlerini doldurması ve dolayısıyla hamurun maksimum kompasiteye sahip olması, böylece yüksek dayanım elde edilebilmesi anlamına gelir. Powers tarafından elde edilen , jel/hacim oranı ile basınç dayanımı arasındaki bağıntıyı gösteren grafik Şekil 2.6 da verilmektedir. Bu grafiğe göre dayanımın jel/hacim oranının kübü ile orantılı olduğu ve dayanımın $\sigma_c = 234x^3$ bağıntısı ile ifade edilebileceği gösterilmiştir. Bu bağıntıda x yerine 1 değeri konulduğunda (bütün boşlukların jel ile dolması durumu) jelin kendi dayanımının 234 MPa olduğu görülür. Aynı araştırmacı dayanım değerlerinin portland çimentoları içerisinde çok farklı bir değişim göstermediğini fakat, C_3A içeriğinin fazla olması durumunda dayanımların daha düşük çıktığını ifade etmiştir [21].



Şekil 2.6 Jel/hacim oranı ile dayanımlar arasındaki ilişki [21]

Jel/hacim oranının değişimini etkileyen faktörler, çimentonun hidratasyon derecesi ve karışımın su/çimento oranıdır (Formül 2.8). Hidratasyonun ilerlemesi ile birlikte hidrate ürünlerin hacimleri artacağından bu oran giderek büyür. Lam ve arkadaşları [37] sadece portland çimentosu ve Portland çimentosunun %25, %45 ve %55 oranlarında uçucu kül ile yer değiştirerek ürettikleri hamurlardaki hidratasyon derecelerini hesaplayarak, dayanım ile jel/hacim oranı arasındaki bağıntıyı vermişlerdir. Bu grafik incelendiğinde uçucu küllü çimento hamuru ile sadece Portland çimentosu ile üretilen çimento hamurlarına ait grafiklerin hemen hemen çakıştığı görülmüştür. Düşük jel/hacim oranlarında, uçucu kül içeren hamurların dayanımlarının Portland çimentosu ile üretilen hamurların dayanımlarına göre bir miktar daha yüksek çıktığı, fakat bu oranın büyümesi ile dayanımların çakıştığı görülmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Portland çimentosu (PC) ve uçucu küllü çimento (UK) hamurlarında jel/hacim oranı ile basınç dayanımları arasındaki ilişki [37]

Aynı araştırmacılar çalışmalarında, aynı su/bağlayıcı oranı ve aynı uçucu kül yerdeğiştirme oranlarına sahip hamurların 28. ve 90. günlerdeki porozitelerini civalı porozimetre ölçüm metodu ile ölçmüşler ve porozite değerleri ile dayanımlar arasındaki ilişkileri incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre “jel/hacim” oranı ile dayanım arasındaki ilişkinin, porozite ile dayanım arasındaki ilişki ile uyum içerisinde olduğunu belirtmişler, fakat “Jel/hacim” oranı kullanılarak elde edilen korelasyonların biraz daha yüksek olduğunu gözlemişlerdir.

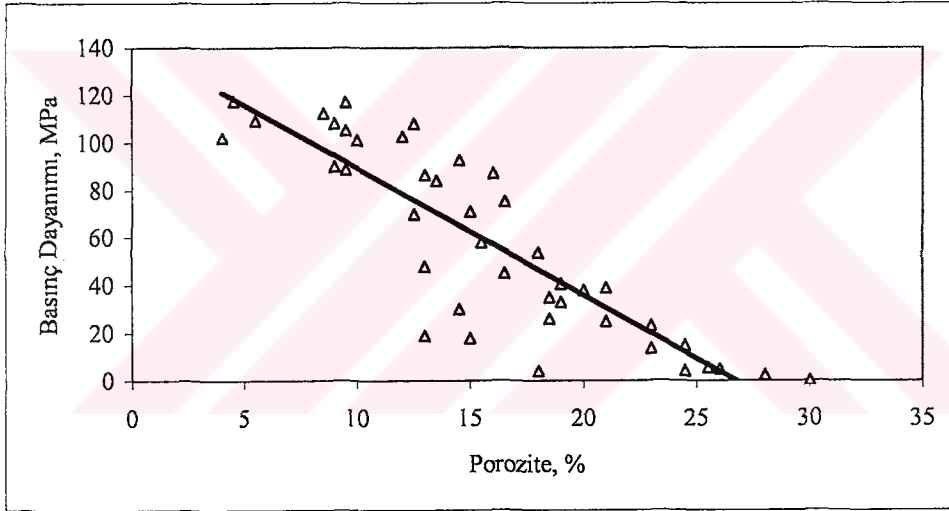
Çimentonun fiziksel yapısı dikkate alındığında dayanımı etkileyen en önemli etkenlerden biri porozitedir. Porozitenin yanında malzemenin çatlak yayılmasına karşı direnci de önemli olup, bu da kristaller arasındaki bağlarla ilgilidir. Kristaller arasındaki bağların zayıf olması buralarda çatlak varmış gibi bir etki yapar, bu da çatlak yayılması için önemli bir kusur oluşturur [38]. Büyük kristaller arasındaki zayıf bağlar, yüksek gerilme konsantrasyonlarına yol açacak çatlaklar gibi davranırlar.

2.3.3 Porozite

Betonun dayanımı, beton içerisindeki boşluk miktarından etkilenir. Bu boşluklar, beton içindeki i) sıkışmış hava boşluğu, ii) kılcal boşluklar, iii) jel boşlukları, ve iii) sürüklenmiş hava boşlukları olarak sınıflandırılabilir. Bunların yapıları ve boyutları ile ilgili gerekli açıklamalar paragraf 2.2.2’de yapılmıştı. Betonun mekanik özelliklerini etkileme açısından bu boşlukların miktarından başka şekil, boyut ve beton içindeki dağılımları da önemlidir. Bu özellikler yük altındaki beton numunede gerilme dağılımını ve dolayısıyla gerilme konsantrasyonunu etkileyeceğinden, poroziteyi betonun mekanik özelliklerine tesir eden en önemli faktörlerden biri olarak söyleyebiliriz. Porozite ile ilgili olarak literatürde genelde çimento hamuru numuneleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Laboratuvar koşullarında çimento hamuru üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, beton veya harç numunelerin mekanik özelliklerinin hamurun boşluk yapısından nasıl etkileneceğini görebilmek açısından aydınlatıcı olmaktadır.

Betonun veya çimento hamurunun porozitesini jel boşlukları haricindeki toplam boşluk hacminin hamur hacmine oranı olarak tanımlayabiliriz. Popovics [40] porozitenin beton dayanımına etkisini tahmin eden bazı bağıntılar geliştirmiş ve kılcal boşlukların betonun dayanımına olan etkisi ile aynı hacimdeki hava boşluklarının dayanıma olan etkileri arasında farklılıklar olduğunu, kılcal boşluklar ile hava boşlukları arasındaki bu farkın çimento miktarına da bağlı olarak değişim gösteren boyut ve şekil farklılıkları olduğunu belirtmiştir. Hava boşluklarının hacimleri pratik olarak değişim göstermemekle birlikte, kılcal boşlukların hacimleri hidratasyonun devam etmesi ile birlikte azalmaktadır.

Odler ve arkadaşları [28], değişik su/çimento oranlarında ve değişik sıcaklık ve sürelerde küre tabi tuttıkları çimento hamuru numuneleri üzerinde dayanım ve porozite arasındaki ilişkileri incelemişler ve dayanıma etki eden esas etkenin porozite olduğunu, bununla birlikte çapı 10 nm' den daha küçük olan boşlukların dayanım üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğunu belirtmişler, ayrıca hidrate ürünlerin özgül yüzey alanlarının değişiminin dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Aynı araştırmacılar bir başka çalışmalarında [41] yine değişik su/çimento oranlarında hazırlanmış ve değişik sürelerde küre tabi tutulmuş çimento hamuru numunelerinin dayanım ve poroziteleri arasındaki ilişkileri hesaplamışlar, Şekil 2.8' de görüldüğü gibi porozitenin %5 ile %28 değerleri arasında porozite ile dayanım arasındaki değişiminin lineer fonksiyonlarla iyi bir biçimde ifade edilebileceğini söylemişlerdir.

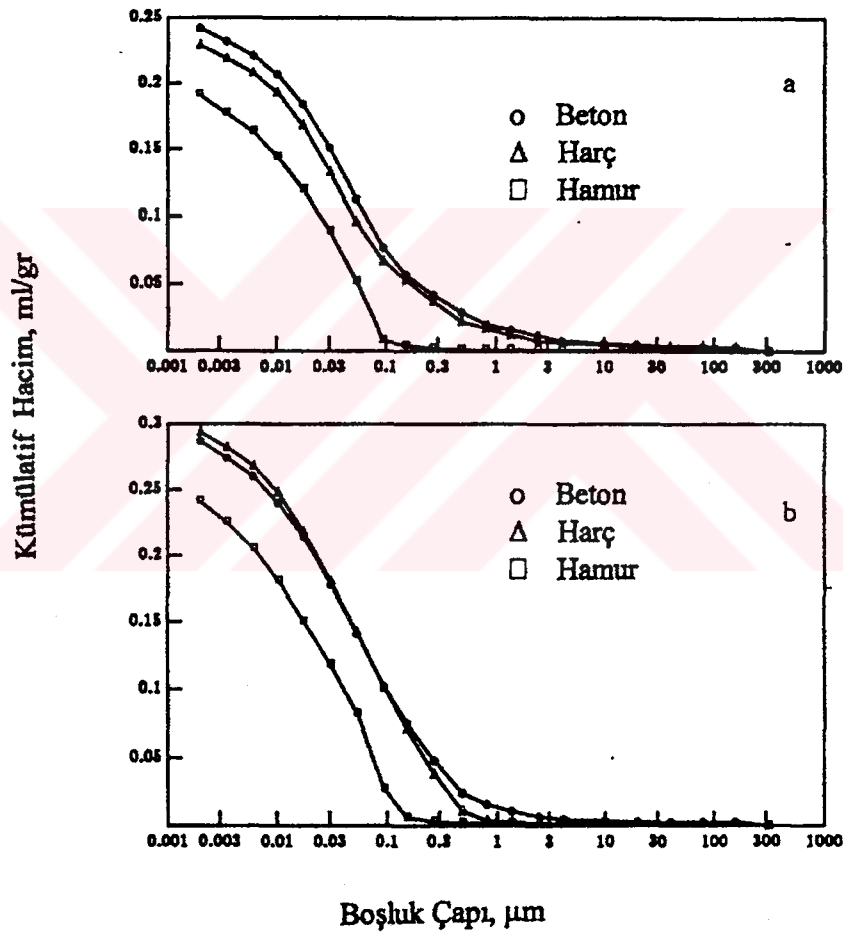


Şekil 2.8 Basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişki [41]

Winslow ve arkadaşları [9], beton içerisindeki çimento hamurunun boşluk yapısını ve boşluk dağılımlarını civalı porozimetre deney tekniği ile ölçmüş, beton ve harç içindeki hamurun boşluk dağılımını çimento hamuru fazı içindeki boşluk dağılımı ile karşılaştırmış ve şu önemli sonuçlara varmışlardır.

- i) Beton içerisinde yer alan çimento hamurunun boşluk yapısı, çimento hamuru fazının boşluk yapısından farklıdır (Şekil 2.9).

- ii) Beton içerisindeki hamur daha boşluklu bir yapıya sahiptir. Bu ek boşlukların çoğunluğunun çapı, çimento hamuru fazında bulunandan daha büyüktür.
- iii) Harç içerisindeki çimento hamurunun boşluk yapısı, betonun çimento hamuru boşluk yapısına daha yakındır.
- iv) Aynı su/çimento oranında hazırlanan ve değişik koşullarda küre tabi tutulan hamurlarda, aynı hidratasyon derecelerine erişildiğinde boşluk boyutu dağılımı benzer olmaktadır.



Şekil 2.9 (a) Su/çimento oranı 0.45 ve (b) su/çimento oranı 0.55 olan karışımlardaki boşluk boyutu dağılımları [9].

Aynı araştırmacı [43], beton ve harç içinde çimento hamuru fazına göre daha büyük çaplarda bulunan ek boşlukların agrega ile çimento hamuru arasındaki ara yüzeyin boşluklu yapısından dolayı kaynaklandığını belirtmişlerdir.

2.3.4 Agreg-a-imento hamuru temas yüzeyi

Beton, agrega, imento hamuru ve agrega ile imento hamuru temas yüzeyinin oluşturduğu üç fazlı bir kompozit malzeme olarak gözönüne alınabilir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki geçiş bölgesinin, betonun dayanımı, geçirimliliği, dürabilitesi ve çatlak oluşumu açısından önemli etkilere sahip olduğu bilinmektedir [44-46]. Dolayısıyla betonun dayanımını aşağıdaki üç önemli etken etkilemektedir:

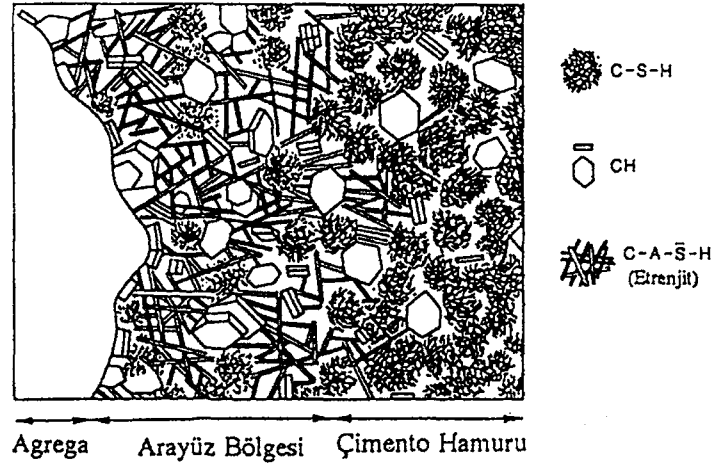
- i) Matrisin (imento hamurunun) dayanımı
- ii) Agreganın dayanımı
- iii) Geçiş bölgesinin (ara yüzeyin) dayanımı

Bu etkenlerin herbirinin çeşitli sınıflardaki betonların dayanımlarına etkileri farklı olmakla beraber, agrega-imento hamuru ara yüzeyi betondaki en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. Bu da betonun mekanik davranışı ve dürabilitesi açısından oldukça etkili bir içyapı zeliğidir. Beton içindeki agreganın tipi, en büyük boyutu, granülometrisi ve agreganın yüzey pürüzlülüğü değişik beton karışımları için geniş bir aralık oluşturabilir. İri agreganın hemen yanındaki hidrate olmuş imento hamurunun iç yapısı, agregadan uzaktaki imento hamurunun i yapısından farklılık gösterecektir [17,47]. Arayüzeyin (temas bölgesinin) mikroyapısı ile ilgili çeşitli modeller ileri sürülmüştür. Bu modellerden biri olan Barnes' in önerdiği modele göre geçiş bölgesinin iç yapısı şoyledir:

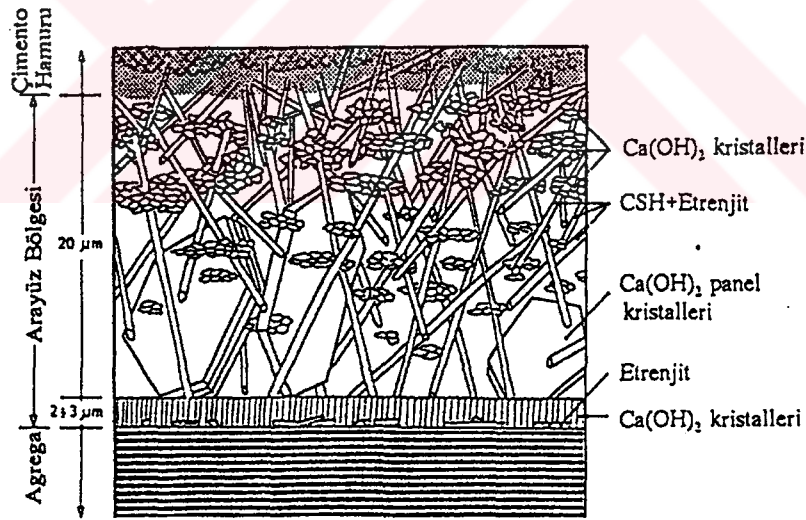
- i) Agreg-a yüzeyine dik doğrultuda C-H filmlerinin birikmesi,
- ii) Sa fırçasını andıran uzanmış C-S-H tanelerinden oluşan bir film ile örtülmesi,
- iii) Agreg-a yüzeyine paralel doğrultuda geniş C-H kristallerinin birikmesi,
- iv) Temas yüzeyinde C-H ile dolu hacim formasyonu (şekil 2.10).

Zimbelmann [48] tarafından önerilen bir diğer modele göre beton karışımı su ile karıştırıldıktan birkaç dakika sonra agrega yüzeylerinde etrenjit iğneleri görülür. Agreg-a yzerine dik doğrultuda oluşan C-H kristalleri bu etrenjit iğnelerini kaplarlar ve yaklaşık 2~3 m kalınlığında bir tabaka oluştururlar. Bu tabakadan sonra büyük

hegzogonal biçimli C-H panel kristalleri oluşmaya başlar. Bu tabakanın kalınlığı yaklaşık olarak 10~30 μm kadardır. Zimbelmann' ın önerdiği temas bölgesi modellenmesi Şekil 2.11' de görülmektedir.



Şekil 2.10 Geçiş bölgesinin mikroyapısı



Şekil 2.11 Zimbelmann' a göre arayüzey geçiş bölgesinin şematik gösterimi

Agrega ile çimento hamuru ara yüzey bölgesinin kalınlığı oldukça ince olmasına rağmen, beton içerisindeki çimento hamuru hacminin yaklaşık %35 ~ %50' lik kısmını bu temas yüzeyi oluşturur [21]. Ara yüzeydeki bu boşluklu yapının açıklanması ile ilgili değişik görüşler söz konusudur. Bunları şu şekilde özetlemek mümkün olabilir:

- i) Karıştırma sırasında agrega tanelerinin yüzeyleri birkaç mikron kalınlığında bir su tabakası ile kaplandığından, hidratasyon başlangıcında hidrate ürünler bu su tabakası ile birleştiğinde bu bölgedeki su/çimento oranı, orijinal su/çimento oranından daha yüksek olur. Buda geçiş bölgesinin daha boşluklu bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır.
- ii) Duvar etkisi olarak isimlendirebileceğimiz olay, çimento tanelerinin agrega tanelerinin civarında boş bir hacimdeki kadar yakın sıkışamamalarıdır.
- iii) Çimento tanelerinin hidratasyonu sonucunda oluşan hidrate ürünlerin, sadece çimento tarafından gelip, agrega tarafından gelmemesi ve dolayısıyla daha az yoğunluğa sahip bölgenin oluşması.

Diğer taraftan beton üretiminde kullanılan agreganın boyutu da betonun dayanımı açısından önemli bir etkiye sahiptir [10]. Bu etkinin nedenleri şu şekilde açıklanabilir:

- i) Agregada genellikle daha büyük parçaların kırılması ile elde edildiğinden, büyük boyutlu agrega taneleri kırılma sırasında daha fazla sayıda kusur ve çatlak içerir. Bu da agreganın ve dolayısıyla betonun daha zayıf dayanıma sahip olmasına neden olur.
- ii) Büyük boyutlu agrega taneleri, daha büyük ara yüzey bölgesinin oluşmasına neden olduğundan, geçiş bölgesi daha büyük kusur etkisi yaratır ve dayanım düşer.

Montreio ve arkadaşları [52] geçiş bölgesinin kalınlığının daha büyük taneli agregalarda daha fazla olduğunu, ayrıca kalınlığın kum taneciklerinin boyut ve şekillerine bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Şengül [50] tarafından yapılan bir çalışmada, beyaz kalker içeren betonların, düşük beton sınıflarında en yüksek dayanımı verirken bu betonlar, yüksek beton sınıflarında, bazalt içeren betonların gerisinde kalmıştır. Düşük beton sınıflarında agrega-çimento hamuru ara yüzeyi oldukça boşluklu ve zayıf bir yapıya sahiptir. Betonun kırılma sürecinde bu bölgenin önemi büyüktür. Yüksek beton sınıflarında ise temas yüzeyi daha boşluksuz bir yapıya sahip olup, çimento

hamurundan agregaya etkili bir gerilme transferi gerçekleşir. Bu noktada agreganın dayanımı, betonun dayanımı üzerinde etkin bir rol oynamaya başlar. Düşük beton sınıflarında beyaz kalker içeren betonların en iyi dayanımı vermesinin nedeni olarak şunlar söylenmiştir:

- i) Beyaz kalker, diğer agrega cinslerine göre daha fazla su emmekte ve bu emilen su, zamanla ara yüzeydeki çimento hamurunun hidrasyonuna yardımcı olmakta ve bu bölgede daha güçlü bir bağın oluşması sağlanmaktadır.
- ii) Beyaz kalkerin elastisite modülünün düşük olması sonucu, çimento hamuru ile elastik uyumunun daha iyi olması.

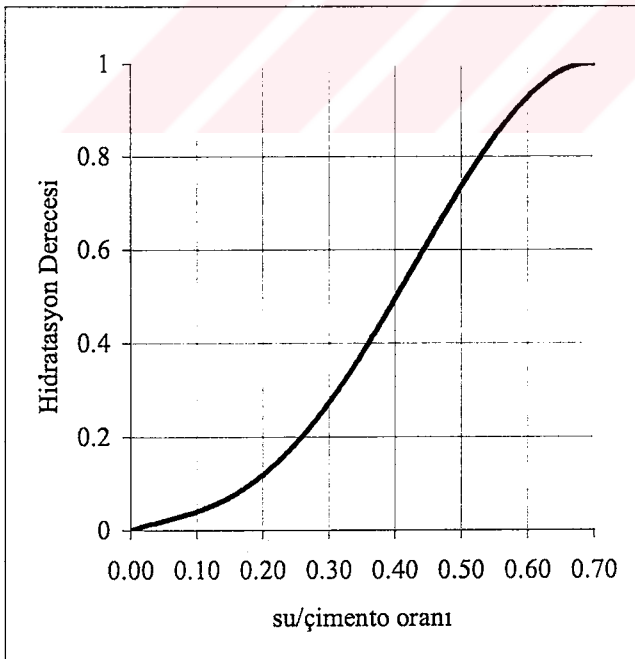
Agrega ve çimento hamurunun elastisite modüllerinin birbirine yakın olması, temas bölgelerindeki gerilme yığılmalarının azalmasına ve daha homojen gerilme dağılımlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu şekilde sağlanacak elastik uyum sonucunda da erken mikroçatlak oluşma olasılığı azalmaktadır [51].

2.4 Betonun Dürabilitesine Bağlayıcı Hamurun Etkisi

Beton yapıların kendilerinden beklenen servis ömürlerini tamamlayabilmeleri için dürabilite açısından belirli özellikleri taşımaları gerekmektedir. Betona zarar verebilecek klor, sülfat, karbondioksit ve bazı endüstriyel sıvılar ve gazların zamanla beton içerisine nüfuz etmesi mümkündür. Bu olayın şiddeti, betonun geçirimliliği ile ilgilidir. Yani betonun dış etkenlere karşı dayanıklılığı ile geçirimliliği arasında doğrudan bir ilişkinin bulunduğu, geçirimsiz betonun dürabilite açısından daha üstün performans sergileyeceği beklenir.

Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki boşluk sistemi ve agrega ile çimento hamuru ara yüzeyinin yoğunluğu, betonun geçirimliliğini etkileyen en önemli etkeni gösterir. Eğer hamurun porozitesi yüksek ve boşluklar birbirleri ile bağlantılı ise dış ortamdan gelecek gaz veya sıvıların beton içerisine nüfuz etmesi kolay olur ve betonun geçirimliliği artar. Bunun tersi olacak şekilde, hamur içerisindeki boşluklar birbirleri ile bağlantılı değilse, ki bu kılcal boşlukların yollarının tıkanması ile mümkün olur, betonun geçirimliliği düşer [57-60].

Taze hamurda su ile dolu kısımlar, sürekli ve birbirleri ile bağlantılı kılcal boşlukları oluştururlar. Çimento jelinin oluşmaya başlaması ile bu boşlukların çapları daralır ve sonunda hidrasyon ürünleri kılcal boşlukları tıkayabilir. Böylece bu boşluklar kılcal oyukları oluşturarak, sadece jel boşlukları ile bağlantılı olurlar [31]. Kılcal boşlukların yollarının tıkanması, hamurun ve dolayısıyla betonun geçirirliğini etkileyen en önemli faktör olacaktır. Kapiler boşlukların şekil ve boyutları geniş bir aralıkta değişmekte, hidrasyonunu tamamlamış çimento hamurları, az bir kısmı 1 μm ' dan büyük ve büyük bir kısmı 100 nm' den küçük boyutlardaki kılcal boşluklar içermektedir [53]. Bu boşluklar çimento hamuru içinde rastgele dağılmış ve birbirleri ile bağlantılı bir ağ oluşturmaktadırlar. Kılcal boşlukların jel ile bloke edilmesi ve parsellere ayrılabilmesi, uygun su/çimento oranının seçilmesi ve numunelerin yeteri kadar küre tabi tutulmaları ile mümkün olabilir [31,54]. Şekil 2.12' de kılcal boşlukların parsellere ayrılabilmeleri için gerekli su/çimento oranı ile hidrasyon derecesi arasındaki ilişki verilmektedir. Bu ilişkiye göre eğer karışımın su/çimento oranı 0.70' den büyük ise, kılcal boşlukların kapanması mümkün olmayacaktır. Tablo 2.4' de çimento hamurunda, kılcal boşlukların bloke edilebilmeleri için geçmesi gereken süreler değişik su/çimento oranları için verilmiştir.



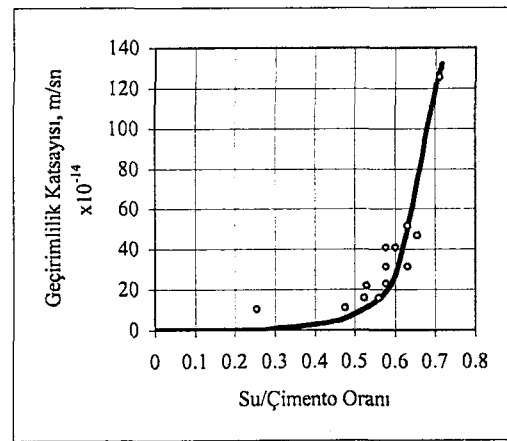
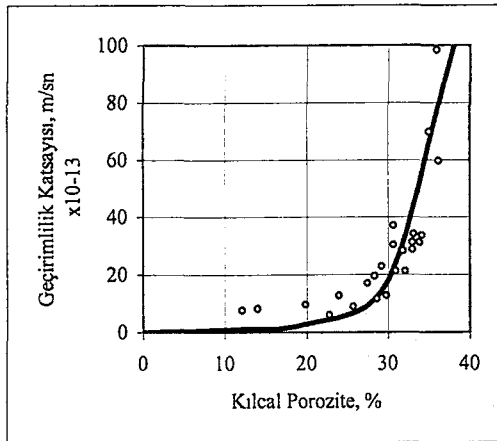
Şekil 2.12 Kılcal boşlukların parsellere ayrılabilmeleri için gerekli su/çimento oranı ile hidrasyon derecesi arasındaki ilişki [54].

Bentz ve Garboczi [55,56], çimento hamuru içerisindeki kılcal porozitenin %18 veya daha az olmasının süreksizliğin sağlanabilmesi için yeterli olduğu sonucuna varmışlardır.

Çimento hamurunun geçirirliğini hamurun porozitesi belirler. Şekil 2.13 (a)' da kılcal porozite ile geçirirlilik katsayısı, ve Şekil 2.13 (b)' de su/çimento oranı ile geçirirlilik katsayısının değişimi görülmektedir. Su/çimento oranının artması ile kılcal boşluk hacmi de artacağından bu iki grafiğin şekli birbirleri ile benzerlik göstermektedir.

Tablo 2.4. Değişik su/çimento oranları için kılcal boşlukların bloke edilebilmeleri için geçmesi gereken süreler [21].

Su/Çimento Oranı	Gerekli Zaman
0.40	3 gün
0.45	7 gün
0.50	14 gün
0.60	6 ay
0.70	1 yıl
>0.70	(imkansız)

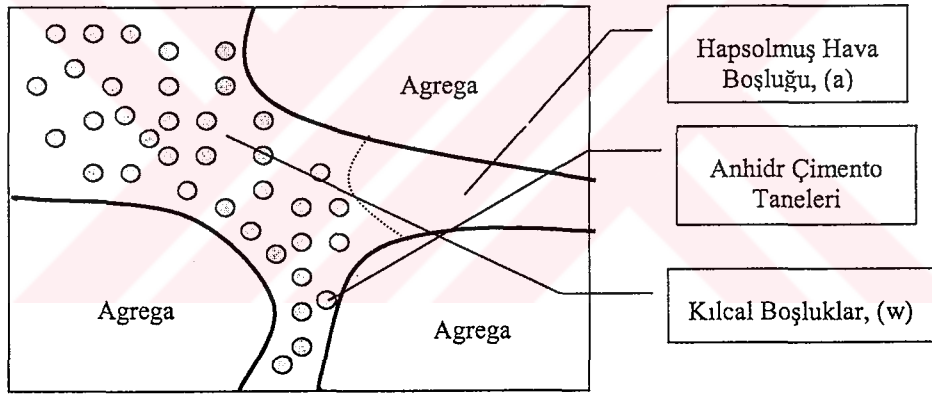


Şekil 2.13 (a) Sertleşmiş çimento hamurunda, kılcal porozite ile geçirirlilik katsayısı arasındaki ilişki, (b) Hidratasyonunu tamamlamış çimento hamurlarında su/çimento oranı ile geçirirlilik katsayısı arasındaki ilişki [21].

2.5 Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Çimento Hamuru Boşluk Yapısına Duyarlılığı

Çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların kılcal boşluklar mı yoksa hapsolmuş hava boşlukları mı olduğu betonun herhangi bir özeliği için önemli değilse, yani bu özeliğin aldığı değerleri sadece bu boşlukların miktarı belirliyorsa, bu beton özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarsız bir özelliktir. Bu ifadenin tersi sayılabilecek şekilde, çimento hamuru fazı içerisindeki boşlukların miktarından başka türü veya geometrisi herhangi bir beton özeliğine etki ediyorsa, bu beton özeliği için de çimento hamuru boşluk yapısına duyarlıdır diyebiliriz [7,14].

Taze betonun yapısı düşünüldüğünde çimento taneleri arasında yer alan karma suyu kılcal boşlukları oluşturmaktadır. Agrega taneleri arasında ise harç fazının giremediği bölgelerde hapsolmuş hava boşlukları vardır. Taze betonun yapısı şematik olarak Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



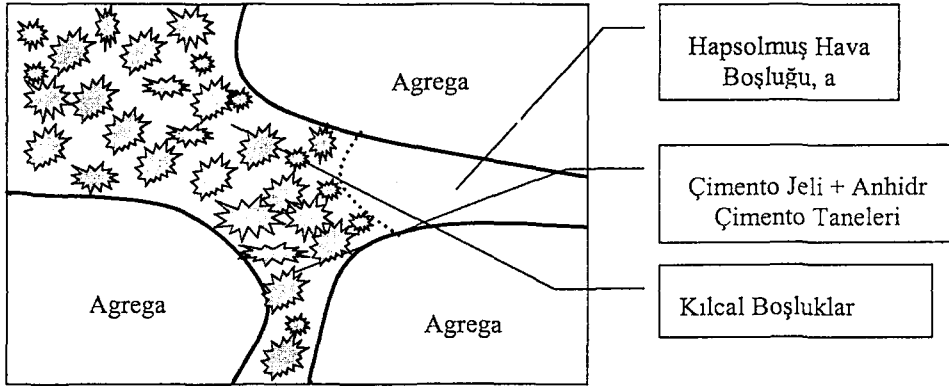
Şekil 2.14 Taze betonun yapısı

1 m³ yerleşmiş betondaki toplam boşluk hacmi, kılcal boşluk hacmi (w) ile hapsolmuş hava boşluğu hacimleri (a)’nın toplamına eşittir. Yani, toplam boşluk hacmi, V,

$$V=w+a \quad (2.9)$$

ile ifade edilebilir.

Sertleşmiş betonun yapısı ise basitleştirilmiş olarak Şekil 4.6’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.15 Sertleşmiş betonun yapısı [7]

Sertleşmiş betonun yapısında, hidrasyon sonucunda çimento tanelerinin yüzeylerinden başlayarak jelleşme oluşmuştur. Powers [15,31]’ in çalışmalarına göre hidrasyona uğrayan her 1 cm^3 çimento tanesi 2.06 cm^3 çimento jeli oluşturmaktadır. Oluşan bu jelleşmeden dolayı çimento taneleri arasındaki kılcal boşlukların hacimleri daralmıştır. 1 m^3 sertleşmiş betondaki çimentonun anhidr haldeki hacmine c dersek, hidrasyon derecesi α olduğunda $2.06\alpha c$ kadar çimento jeli oluşur. Bunun αc kadarlık bir kısmı çimentonun anhidr haldeki sınırları içinde kalacağından kılcal boşluklardaki azalma, $2.06\alpha c - \alpha c = 1.06\alpha c$ kadar olacaktır. Kılcal boşlukların hacmi ise, $w - 1.06\alpha c$ olup, çimento hamurundaki toplam boşluk hacmi,

$$V = (w - 1.06\alpha c) + a \quad (2.10)$$

olur. Burada hapsolmuş hava boşluğu miktarının pratik olarak değişmediği kabul edilmektedir.

P_{hi} herhangi bir sertleşmiş beton özeliği olsun. n_i bir parametre olmak üzere yeteri kadar çeşit ve sayıdaki bir beton gurubunda P_{hi} ’nin aldığı değerleri $n_i \cdot (w - 1.06\alpha c) + a$ değişkenine göre ve n_i ’ye değişik değerler vererek incelediğimizde $n_i = n_i^*$ için en büyük korelasyon katsayısı elde edilsin.

$$\bullet \quad n_i = n_i^* \rightarrow [R(n_i^*)]_{\text{maks}}$$

Korelasyon katsayısının maksimum olmasının, $n_i \cdot (w - 1.06\alpha c) + a$ değişkeninin P_{hi} özeliği üzerinde çimento hamuru boşluk yapısının etkisini en iyi şekilde ifade etmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Bu durumda eğer,

- $n_i^*=1$ ise P_{hi} özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarsız bir özeliğdir.
- $n_i^* \neq 1$ ise, P_{hi} özeliği çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlı bir özeliğdir.

n_i^* değerine gözönüne alınan P_{hi} özeliğinin “çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık katsayısı” denir.

2.5.1 Özeliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına 1. tip duyarlılık derecesi, $(SD1)_i$

Paragraf 2.5’de sertleşmiş betonun yapısı için tanımlanan duyarlılık katsayısına, yani, herhangi bir sertleşmiş P_{hi} beton özeliği ile değişkenler arasındaki ilişkileri değişken içerisindeki n_i değerine değişik değerler vererek incelediğimizde maksimum korelasyon katsayısını veren n_i^* değerine 1. tip duyarlılık derecesi denir. 1. tip duyarlılık derecesi bundan sonra metin içerisinde $(SD1)$ ile gösterilmiştir.

2.5.2 Özeliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına 2. tip duyarlılık derecesi, $(SD2)_i$

Herhangibir P_{hi} beton özeliğine ait $(SD2)_i$, 2. tip duyarlılık derecesi,

$$(SD2)_i = \frac{R(n_i^*)}{R(n=1)} \quad (2.11)$$

ifadesi ile tanımlanmıştır. Burada,

$R(n_i^*)$: P_{hi} özeliğinin değişimi, n parametresine değişik değerler verilerek incelendiğinde elde edilen en büyük korelasyon katsayısı,

$R(n=1)$: P_{hi} özeliği için yapılan aynı incelemede, n parametresine 1 değeri verildiğinde bulunan korelasyon katsayısıdır.

Yani $SD2$, duyarlılığı gözönüne almakla korelasyonların ne oranda güçlendiğini göstermektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışma boyunca üretilen betonlarda kullanılan malzemeler değiştirilmemiştir. Bu malzemelere ait fiziksel ve mekanik özellikler sırası ile aşağıda verilmektedir.

3.1.1 Agregat özellikleri

Yapılan bu çalışma kapsamında beton üretimlerinde kum, kırmataş 1 ve kırmataş kumu olmak üzere üç değişik agregat kullanılmıştır. Bu agregalara ait fiziksel özellikler aşağıda gösterilmiştir.

3.1.1.1 Kum

Üretilen betonlarda kum olarak Camış Madencilik A.Ş.' den temin edilen silis unu kullanılmıştır. Bu malzeme üzerinde özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve elek analizi (granülometri) deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık ve özgül ağırlık deney sonuçları Tablo 3.1' de ve elek analizi deneyi sonuçları Tablo 3.2' de verilmektedir.

3.1.1.2 Kırmataş

Üretilen betonlarda kırmataş olarak kırmataş 1 agregası kullanılmıştır. Üretim boyunca kullanılan tüm kırmataş agregası, beton üretimleri sırasında düşük su/çimento oranlarına daha rahat ulaşılabilmesi için 1 mm göz açıklıklı elekten yıkanarak elenmiş ve laboratuvar ortamında kurutulmuştur. Kırmataş agregası üzerinde özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık ve özgül ağırlık deney sonuçları Tablo 3.1' de ve elek analizi deneyi sonuçları Tablo 3.2' de verilmektedir.

3.1.1.3 Kırmataş kumu

Üretim sırasında kullanılan kırmataş kumu, yukarıdaki paragrafta açıklanan neden ile 0.25 mm göz açıklıklı elek üzerinde yıkanmıştır. Kırmataş kumu agregası üzerinde özgül ağırlık, gevşek birim ağırlık ve elek analizi deneyleri yapılmıştır. Birim ağırlık ve özgül ağırlık deney sonuçları Tablo 3.1' de ve elek analizi deneyi sonuçları Tablo 3.2' de verilmektedir.

Tablo 3.1. Agregalara ait özgül ağırlık ve birim ağırlık deney sonuçları

Agrega Cinsi	Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Birim Ağırlık (kg/m ³)
Kırmataş 1	2730	1440
Silis Unu	2640	1510
Kırmataş Kumu	2730	1260

3.1.2 Agregaların granülometrik bileşimleri

Kullanılan agregaların granülometrik bileşimleri TS 706' ya [62] uygun olarak tesbit edilmiştir. Agregaya yığını tensil edecek şekilde alınan numuneler sırası ile 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.50 mm ve 0.25 mm göz açıklıklı eleklerden elenmiş ve sonuçlar elekten geçen malzemelerin yüzdeleri olarak kaydedilmiştir. Elek analizi deney sonuçları Tablo 3.2' de verilmektedir.

Tablo 3.2. Elek analizi deney sonuçları

Elek Göz Boyutu (mm)	Elekten Geçen Malzeme, %		
	Kırmataş 1	Silis Unu	Kırmataş Kumu
16	100	100	100
8	51	100	100
4	4	100	97
2	1	100	47
1	1	100	25
0.50	0.7	100	10
0.25	0.6	83	1

3.1.3 Çimento özellikleri

Üretilen betonlarda çimento olarak Nuh Çimento PÇ 42.5 kullanılmıştır. Kullanılan çimentoda TS 24' de [63] uygun olarak fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 3.3' de verilmektedir.

3.1.4 Kullanılan katkılar

Yapılan bu çalışmada su/çimento oranları 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 olmak üzere beş değişik su/çimento oranında beton üretilmiştir. Üretilen betonlarda yeterli işlenebilmeyi sağlayabilmek amacı ile iki değişik süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. 0.26, 0.30 ve 0.34 su/çimento oranlı betonlarda YKS marka, ticari adı Glenium 51 olan polikarboksil etilen esaslı bir hiperakışkanlaştırıcı ve 0.38 ve 0.42 su/çimento oranlı betonlarda ise İnka marka, ticari adı BS2000 olan naftalin ve melamin esaslı bir süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan katkı oranları 1 m³' deki çimento ağırlığının yüzdeleri olarak Tablo 3.4' de verilmiştir.

Tablo 3.3. Çimento fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgül Ağırlık (kg/m ³)	Elek Analizi	
	90µ Elek Üzerinde Kalan,%	200µ Elek Üzerinde Kalan,%
3080	0.2	0
Blaine Özgül Alanı, m ² /kg	Normal Kıvam Suyu, %	Le Chatelier Deneyi (İğnelerin Toplam Açılması) (mm)
385	30	3
Priz Başlangıcı : 3 saat 20 dak.		
Priz Sonu : 4 saat 50 dak.		
Mekanik Özellikler		
	7 Gün	28 Gün
Basınç Dayanımı, N/mm ²	43.8	54.1
Eğilme Dayanımı	6.9	7.9

Tablo 3.4. Kullanılan katkı maddeleri ve kullanım yüzdeleri

Su/Çimento Oranı	Katkı Cinsi	Kullanım Yüzdesi (Çimento Ağırlığına Oranla) (%)
0.26	Hiperakışkanlaştırıcı	1.2
0.30	Hiperakışkanlaştırıcı	0.8
0.34	Hiperakışkanlaştırıcı	0.6
0.38	Süperakışkanlaştırıcı	1.5
0.42	Süperakışkanlaştırıcı	1.5

3.2 Beton Karışım Hesapları

3.2.1 Kabul edilen esaslar

Yapılan bu çalışmada 7, 14, 28 ve 365 günlük deneyler için 5 değişik su/çimento oranında ve karışım granülometri eğrisi A16-B16, B16, B16-C16 ve C16 olan 4 değişik granülometriye sahip beton üretilmiştir. Üretilen betonlarda işlenebilme ile ilgili herhangi bir değer sabit tutulmamış, betonların kalıplara yerleştirilebilmesinin yeterli şekilde sağlanabilmesi için en az 1 cm çökme elde edilmesi yeterli görülmüştür. Betonlarda her su/çimento oranı için çimento ağırlığının Tablo 3.4’de verilen yüzdeleri kadar akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Üretilen betonlara ait agrega karışım oranları Tablo 3.5’ de ve karışım granülometri eğrileri Şekil 3.1, Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmektedir.

Tablo 3.5. Agrega karışım oranları

Agrega Cinsi	Karışım Oranları, %			
	A16-B16	B16	B16-C16	C16
Kırmataş 1	55	45	33	20
Silis Unu	12	20	24	33
Kırmataş Kumu	33	35	43	47
Toplam	100	100	100	100

Üretilen betonların isimleri, çalışma içerisindeki tablo ve metinlerde karışım özelliklerini ve deney yaşlarını ifade edecek şekilde kodlanarak gösterilmiştir. Örneğin, AB26-7’ nin ifade ettiği beton gurubu, A16-B16 granülometrisinde, 0.26 su/çimento oranına sahip ve deney günü 7 olan betonları ifade etmektedir. Sadece

365 günlük numunelerde, kodlamadaki deney yaşının ifade edildiği son terim “S” ile gösterilmiştir.

3.2.2 Beton karışım hesapları

Beton karışımlarının hesaplanmasında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemle göre beton karışımları aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

C: 1m³ yerleşmiş betondaki çimento ağırlığı, kg,

W: 1m³ yerleşmiş betondaki su ağırlığı, kg,

K: 1m³ yerleşmiş betondaki katkı ağırlığı, kg,

δ_c : Çimento özgül ağırlığı, kg/m³,

δ_k : Katkı maddesi özgül ağırlığı, kg/m³,

δ_i : (i) agregasının özgül ağırlığı, kg/m³,

P_i: (i) agregasının karışım yüzdesi, %,

V_a: Toplam agrega hacmi,

a: 1m³ yerleşmiş betondaki hava boşluğu, % ve

G_i: (i) agregasının ağırlığı, kg

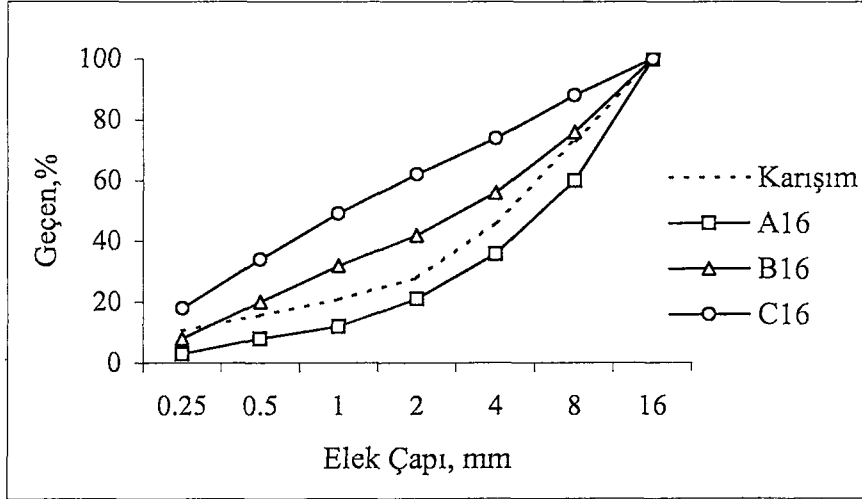
olmak üzere,

$$V_a = 1 - \left(\frac{C}{\delta_c} + W + \frac{K}{\delta_k} + a \right) \quad (3.1)$$

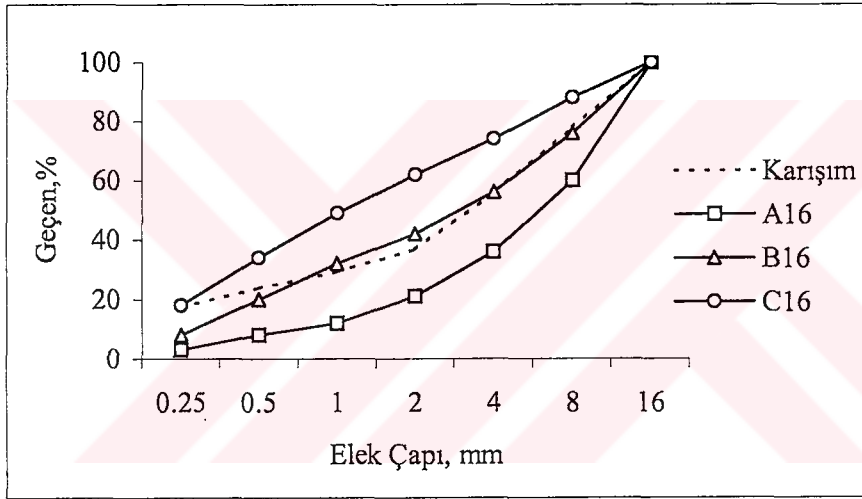
formülü ile toplam agrega hacmi bulunur. 1 m³ beton için gerekli herbir agregamiktari,

$$G_i = V_a \cdot P_i \cdot \delta_a \quad (3.2)$$

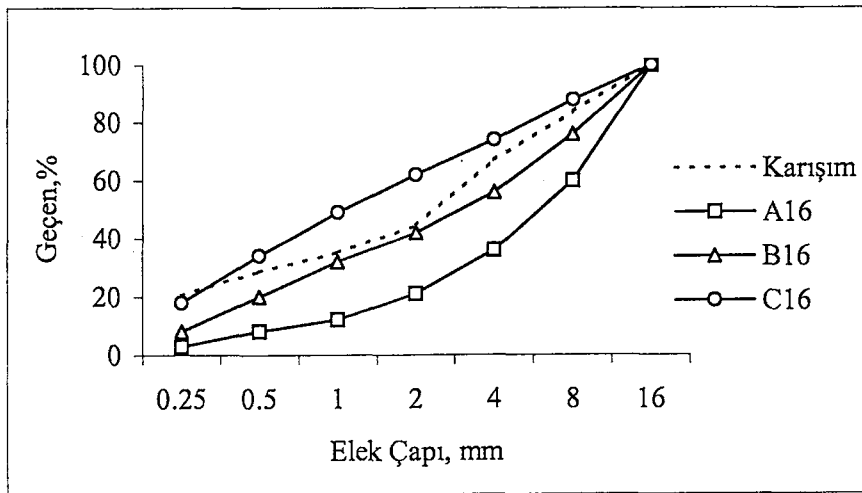
formülü ile hesaplanır.



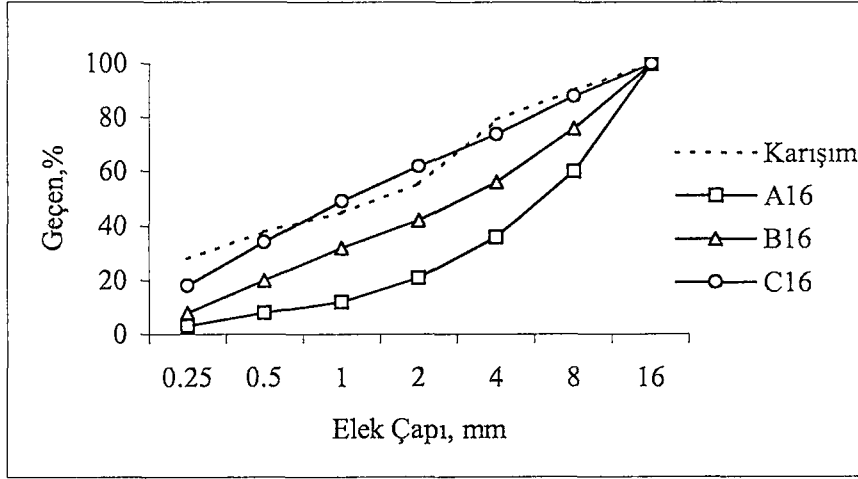
Şekil 3.1 A16-B16 karışım granülometrisi



Şekil 3.2 B16 karışım granülometrisi



Şekil 3.3 B16-C16 karışım granülometrisi



Şekil 3.4 C16 karışım granülometrisi

3.2.3 Beton üretimi, karıştırma, yerleştirme ve kür koşulları

Bu çalışmada, beton üretimleri için eksenel zorlamalı karıştırıcı 45 lt. kapasiteli betonyer kullanılmıştır. Her seri beton üretiminde doldurulması gereken toplam kalıp hacminin betonyerin bir seferde üretebileceği hacimden büyük olmasından dolayı kalıplar arka arkaya yapılan 30' ar litrelik iki üretim ile doldurulmuştur. Numunelerin kalıplara yerleştirilmeleri vibrasyon masasında yapılmış ve ard arda yapılan iki üretim sırasında karıştırma süreleri ile vibrasyon süreleri aynı tutulmuştur. Sertleşmiş beton deneyleri sırasında arka arkaya yapılan iki üretimden doğabilecek farklılıkları ve bunların oluşturabileceği hataları her seri içerisinde dağıtabilmek için numuneler karıştırılarak kullanılmıştır. Bütün numuneler üretimden 1 gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 20 ± 2 °C sıcaklıkta, kirece doymun su ile dolu kür havuzları içerisinde saklanmıştır. Numuneler deney gününden 4~5 gün önce havuzdan çıkartılmıştır.

3.2.4 Numune boyutları ve sayıları

Üretilen betonlardan 6 adet 150 mm çapında , 300 mm yüksekliğinde silindir ve 6 adet 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Herbir deney için 3 adet numune kullanılmıştır.

3.3 Deneylerin Tanımlanması ve Uygulanan Yöntemler

3.3.1 Sertleşmiş beton deneyleri

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde deney günlerinde tek eksenli basınç, yarma, ultrases ve Schmidt çekici geri tepme deneyleri yapılmıştır. Bu bölümde genel olarak uygulanan bu deneyler hakkında bilgi verilecek ve uygulanan yöntemler tanıtılacaktır.

3.3.1.1 Tek eksenli basınç deneyleri

Üretilen betonlardan 3 adet küp ve 3 adet silindir numune üzerinde 7, 14, 28 ve 365. günlerde tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler sırasında 500 ton kapasiteli, Amsler marka basınç presisi kullanılmıştır. Silindir numunelerde uygulanan kuvvet altında numunede oluşan gerilmenin en düzgün şekilde dağılabilmesi için deneylerden 4-5 gün önce numunelerin üst yüzeylerine çimento+kum karışımından harç hazırlanarak başlık yapılmıştır. Basınç deneyleri sırasında silindir numuneler üzerine düşey ve yanal şekildeğiştirmeleri ölçebilmek amacı ile iki adet deney çerçevesi takılmıştır. Bu çerçeveler üzerine takılan bir adet komparatör ve LVDT yardımı ile artan yük altında numunede oluşan deformasyonlar 0.001 mm hassasiyet ile kırılma anına kadar kaydedilmiştir. Yüklemeler sırasında deformasyon hızları sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bunun için düşey deformasyonları okuduğumuz komparatörün ibresinin devir sayısından faydalanılmış, yaklaşık 1 dakikada 1 devri tamamlayacak şekilde yüklemelere devam edilmiştir. Bu durumda $1\mu D=10^{-6}$ (mikro deformasyon) ise, yükleme hızının değeri yaklaşık 11 $\mu D/sn$ olmuştur. Bütün numunelerde şekil değıştirmeler 2.5 ton' da bir ve numune kırılıncaya kadar ölçülmüştür.

3.3.1.2 Yarma deneyleri

Üretilen silindir numunelerden 3 adedi üzerinde deney günlerinde yarma deneyleri yapılmıştır. Bu deneye ait uygulanan yöntem ve hesaplarda izlenilen yol Bölüm 4, paragraf 4.2.3' de verilmektedir.

3.3.1.3 Ultrases hızı ölçümleri

Üretilen beton numunelerden 3 adet küp ve 3 adet silindir numune üzerinde ultrases hızı ölçümleri yapılmıştır. Bu deney tek eksenli basınç deneyine tabi tutulacak numunelere uygulanmıştır. Deney için PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) marka ultrases hızı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Silindir numunelerin boyları deneyden önce mm hassasiyetinde ölçülmüş ve daha sonra elde edilen ses geçiş hızları ölçüm yapılan bu boylardan faydalanarak bulunmuştur. Hem küp ve hem de silindir numunelerde ölçümler direkt transmisyon (direct transmission) metoduna göre, deney aletlerinin problemleri karşılıklı gelecek şekilde yerleştirilerek yapılmıştır. Ölçüm sırasında problemlerin numuneye temas eden yüzeylerine temas yüzeyinde boşluk kalmasını engellemek üzere gres yağı sürülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda ultrases geçiş süreleri 0.1 µsn (mikro saniye) hassasiyet ile ölçülmüş, geçiş hızları ses geçiş boyunun ses geçiş zamanına bölünmesi ile km/sn cinsinden bulunmuştur. Herbir karışıma ait hızlar üçer adet deney numunesindeki sonuçların ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

3.3.1.4 Schmidt çekici geri tepme değerlerinin bulunması

Deneyler tek eksenli basınç deneyine tabi tutulacak küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler deney sırasında basınç presinin altında 2.2 Mpa'lık bir gerilme ile sıkıştırılmış ve Schmidt çekici numune üzerine yatay bir şekilde uygulanmıştır. Deneyler için Proceq marka N tipi bir Schmidt çekici kullanılmıştır. Bir numune üzerinde 10 okuma alınmış ve üç numune için bu okumaların aritmetik ortalamaları hesaplarda kullanılmıştır. Schmidt çekicinin kalibrasyon deneyleri N tipi Schmidt çekici için kullanılan bir kalibrasyon örsü ile yapılmıştır.

3.3.2 Çimento hidratasyon ısılarının ve hidratasyon derecelerinin Belirlenmesi

Yapılan bu çalışmada, sertleşmiş betonun çimento hamuru boşluk yapısına duyarlı ve duyarsız özelliklerinin ve duyarlılık katsayılarının belirlenebilmesi için değişik su/çimento oranlarında ve değişik yaş guruplarına üretilen betonların hidratasyon derecelerinin belirlenmesi zorunluluktur. Bunun için çimento hidratasyon ısılarından faydalanılabileceği düşünülmüş fakat hazırlanan çimento hamurlarının nihai hidratasyon ısılarını belirlemek mümkün olmadığından, bu çalışmalar yalnız hidratasyon ısılarının belirlenmesi ile sınırlı kalmıştır. 7, 14, 28 ve 365 günlük deney

yaşları için hazırlanan numunelerin hidratasyon ısılarının belirlenmesinde TS687 [65] ve ASTM C186-98 (Standart Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement) [64] standartında belirtilen yöntemler esas alınmıştır. 5 değişik su/çimento oranı ve 4 değişik deney yaşı için hazırlanan 20 adet karışım üzerinde hidratasyon ısıları ölçülmüştür. Deneylerin ve hesapların nasıl yapıldığına dair daha geniş açıklamalar ve deney sonuçları Bölüm 4, paragraf 4.3' de verilmektedir.

Hesaplar sırasında kullanılacak olan α hidratasyon derecelerinin belirlenmesinde ise “Buharlaşamayan Su Miktarı”nın hesaplanması esas alınmıştır. Bu konuda yapılan deneyler, deneylere ait hesap metodları ve deney sonuçları Bölüm 4, paragraf 4.4' de verilmektedir.

3.3.3 Civalı porozimetre deneyleri

Bu deneyler için su/çimento oranları 0.26, 0.34 ve 0.42 olan 3 değişik çimento hamuru numunesi üzerinde 7., 28. ve 365. günlerde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Civalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir hazne içerisine yerleştirildikten sonra hazneye civa doldurulmuş ve bu civanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz ettirilmesi sağlanmıştır. Deney sistemine ait bir yazılımdan faydalanılarak numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden civa hacmine bağlı olarak (ml/gr) tesbit edilmiştir. Boşluk dağılımı tayini Autopore II 9220 civalı porozimetre cihazı ile yapılmıştır. Deney sonuçları ve daha detaylı bilgiler Bölüm 4, paragraf 4.5' de verilmektedir.

4. DENEY SONUÇLARI

Bölüm 3 ' de yöntemleri ve ayrıntıları açıklanan deneylerden elde edilen sonuçlar bu bölümde grafikler ve tablolar halinde verilecektir.

4.1 Taze Beton Deney Sonuçları

Beton üretimi sırasında taze beton birim ağırlık deneyleri ve işlenebilirlik deneyleri yapıldı. Birim ağırlık deneyleri sertleşmiş beton deneyleri için alınan 6 adet 150x150x150 mm. boyutlarındaki küp numuneler üzerinde uygulandı. Numuneler üretimden hemen sonra 20 ± 2 °C derece sıcaklıktaki odada üzerleri naylon ve ıslak telis ile tamamen sarılarak kalıp söküm zamanına kadar bekletildi. Numuneler kalıplardan söküldükten hemen sonra 10 gr. hassasiyetli tartı ile tartıldı ve daha sonra numune boyutları özellikle mala ile düzeltilmiş üst yüzeylerinden 0.05 mm hassasiyetli bir kumpas ile ölçüldü. Bu şekilde 6 adet numune üzerinde yapılan birim ağırlık değerlerinin ortalaması alındı.

İşlenebilirlik deneyleri için çökme veya yayılma deneyleri yapıldı. Hangi deneyin yapılacağına üretilen betonun kıvamına göre karar verildi. Özellikle su/çimento oranları 0.26, 0.30 ve 0.34 olan betonlarda kullanılan katkının özelliğinden dolayı yayılma meydana geldiğinden bu betonlarda yayılma deneyleri yapıldı. Yayılma deneyleri için alt çapı 20 cm, üst çapı 13 cm ve yüksekliği 20 cm olan kesik koni şeklindeki yayılma konisi kullanıldı. Çökme deneyleri için alt çapı 20 cm, üst çapı 10 cm ve yüksekliği 30 cm olan çökme konisi kullanıldı. İşlenebilme ile ilgili deneyler, her yaş gurubundaki malzeme miktarları ve cinsleri değişmediğinden sadece 7. günde denenecek betonlarda yapıldı. Bütün üretimlerde betonların karıştırma ve vibrasyon süreleri aynı tutulmaya çalışıldı.

Üretilen betonlara ait birim ağırlık, kompasite ve işlenebilme değerleri EKA, Tablo A1, A2, A3 ve A4' de verilmektedir.

4.2 Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

Bölüm 3, paragraf 3.3.1' de genel olarak bu çalışmada yapılan sertleşmiş beton deneylerinden ve uygulanan yöntemlerden bahsedilmiştir. Bu bölümde, bu deneylerin nasıl yapıldıkları, uygulanan hesap tarzları ve elde edilen deney sonuçları verilecektir.

4.2.1 Kılcal boşlukları kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlıklar

Bu deney için 3 adet 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numunelerden faydalanılmıştır. Bu numuneler her beton karışımı için deney günü geldiğinde 110 ± 5 °C derece sıcaklıktaki etüv içerisinde 4-5 gün boyunca sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmişlerdir. Etüvden çıkartılan numuneler bekletilmeden 10 gr hassasiyetli terazi ile tartılmışlar ve bulunan ağırlıklar numunelerin hacimlerine bölünerek betonlara ait kılcal boşlukları kurutulmuş haldeki birim ağırlıklar hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar Tablo 4.1 ' de verilmektedir.

Tablo 4.1. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelere ait kılcal boşlukları kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlıklar

Numune Kodu	Birim Ağırlık, (kg/m ³)			
	7 Gün	14 Gün	28 Gün	365 Gün
AB26	2430	2435	2416	2387
B26	2380	2403	2403	2382
BC26	2349	2375	2369	2370
C26	2261	2271	2314	2301
AB30	2398	2371	2386	2405
B30	2376	2350	2388	2360
BC30	2318	2183	2323	2324
C30	2233	2111	2238	2252
AB34	2367	2357	2358	2371
B34	2357	2305	2353	2339
BC34	2285	2243	2310	2295
C34	2143	2191	2207	2222
AB38	2331	2337	2362	2358
B38	2290	2308	2327	2334
BC38	2240	2269	2287	2307
C38	2176	2186	2208	2251
AB42	2343	2342	2362	2342
B42	2289	2294	2328	2315
BC42	2237	2263	2282	2270
C42	2194	2221	2201	2214

4.2.2 Küp ve silindir basınc dayanımları ile elastiklik modülü, poisson oranı, süreksizlik ve c z lme sınırları

Üretilen betonlarda 7., 14., 28. ve 365. günlerde 150x150x150 mm boyutlarında küp ve çapı 150 mm, yüksekliği 300mm olan silindir numuneler üzerinde tek eksenli basınc deneyleri yapılmıştır. Silindir basınc deneyleri sırasında numuneler üzerine düşey ve yanal şekildeğiştirmeleri ölçebilmek için iki farklı deney  er evesi takılmıştır. Numunelerdeki artan yük altındaki şekildeğiştirmeler 0.001 mm hassasiyetli ölçüm cihazları ile ölçülmüştür. şekildeğiştirme ölçümleri numuneler kırılıncaya kadar devam etmiştir. Elde edilen verilerden yararlanarak üretilen betonlara ait gerilme (σ) – şekildeğiştirme (ϵ), gerilme – hacimsel şekildeğiştirme ($\Delta V/V$) ve gerilme – poisson oranı (ν) ilişkileri hesaplanmış ve bu bağıntılara ait diyagramlar çizilmiştir.

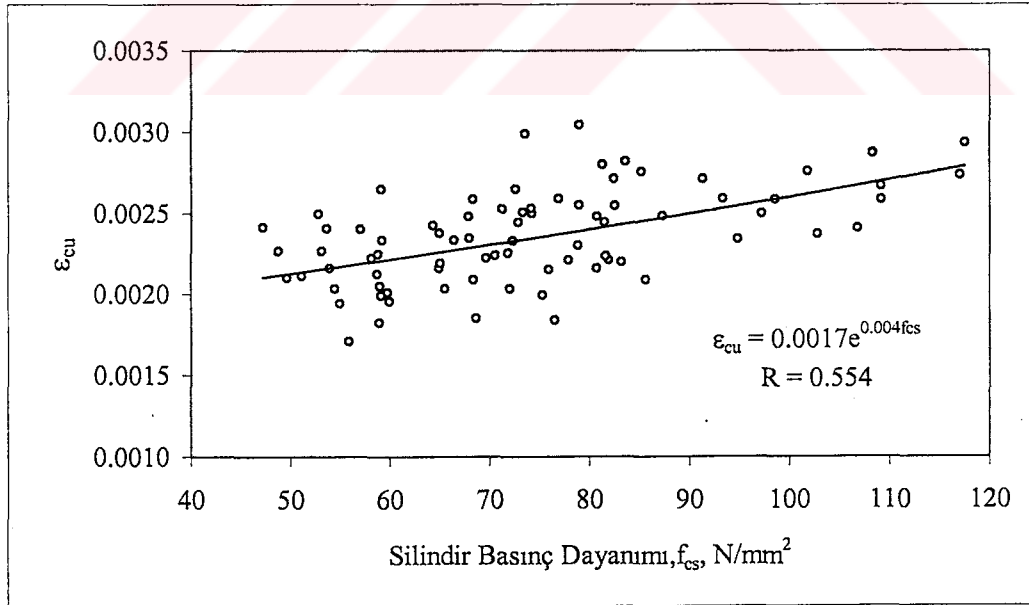
Silindir numuneler üzerinde yapılan tek eksenli basınc deneylerinde elde edilen maksimum y kdeki birim şekildeğiştirme miktarları (ϵ_{cu}) 3'er numunenin ortalaması olarak Ek B, Tablo B1' de ve basınc dayanımları ile (ϵ_{cu})' lar arasındaki ilişki de şekil 4.1' verilmektedir.

Tablo 4.2. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde süreksizlik sınırlarındaki Poisson oranları

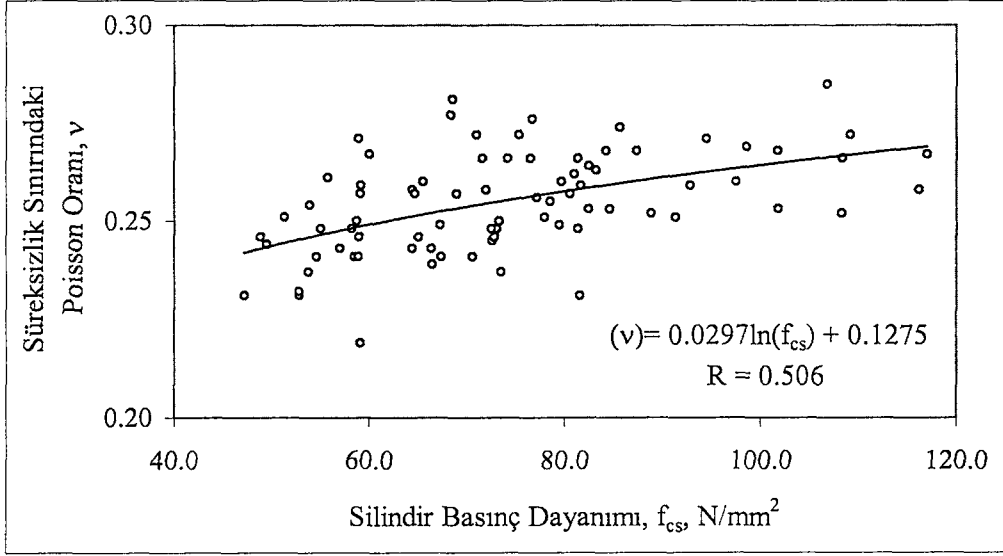
Numune Kodu	Süreksizlik Sınırlarındaki Poisson Oranı			
	7 Gün	14 Gün	28 Gün	365 Gün
AB26	0.264	0.272	0.274	0.285
B26	0.268	0.266	0.269	0.272
BC26	0.257	0.263	0.268	0.267
C26	0.249	0.253	0.251	0.258
AB30	0.248	0.276	0.281	0.268
B30	0.256	0.259	0.266	0.266
BC30	0.248	0.249	0.252	0.252
C30	0.237	0.239	0.253	0.253
AB34	0.258	0.272	0.277	0.271
B34	0.245	0.266	0.266	0.260
BC34	0.241	0.246	0.260	0.259
C34	0.219	0.241	0.250	0.231
AB38	0.241	0.257	0.271	0.262
B38	0.231	0.260	0.257	0.251
BC38	0.237	0.243	0.250	0.255
C38	0.232	0.241	0.248	0.248
AB42	0.251	0.259	0.267	0.258
B42	0.244	0.246	0.261	0.246
BC42	0.246	0.241	0.248	0.257
C42	0.231	0.243	0.254	0.243

Elastiklik modüllerinin (E) hesaplanmasında gerilme – şekildeğiştirme diyagramlarının ilk 1/3’ lük kısmının doğrusal olduğu kabul edilmiş ve bu bölgedeki değerlerden faydalanılmıştır. Yükleme sırasında kaydedilen okumalardan ilk iki veya üçü hatalı olabileceğinden bu okumalar hesaba katılmamıştır. Bu bölgedeki noktalardan geçen doğrunun eğimi elastisite modülü olarak alınmıştır.

Süreksizlik (f_{cs}) ve çözülme ($f_{cs\phi}$) sınırlarının belirlenmesinde gerilme – hacimsel şekildeğiştirme ve gerilme – Poisson oranı değişimi diyagramlarından faydalanılmıştır. Gerilme – Poisson oranı diyagramında, Poisson oranının düzenli olarak küçük aralıklarla arttığı veya azaldığı, veya sabit kaldığı bir aralıktan sonra birden artmaya başladığı nokta betonların süreksizlik sınırları olarak belirlenmiştir. Deneyler sırasında yanal şekildeğiştirmelere ait ard arda yapılan okumalar arasında düzensizlik olduğundan gerilme – Poisson oranı diyagramları ayrı ayrı çizilmiş ve süreksizlik sınırlarının grafik metod ile tesbit edilmesinin daha doğru olacağı kararına varılmıştır. Bütün karışımların süreksizlik sınırındaki Poisson oranının 0.23-0.29 arasında değerler aldığı görülmüştür. Süreksizlik sınırlarındaki Poisson oranlarının değerleri Tablo 4.2’ de ve silindir basınç dayanımları ile süreksizlik sınırındaki Poisson oranları arasındaki ilişki Şekil 4.2’ de verilmektedir.



Şekil 4.1 Silindir basınç dayanımları ile maksimum yükteki birim deformasyon (ϵ_{cu}) arasındaki ilişki.



Şekil 4.2 Silindir basınç dayanımları ile süreksizlik sınırındaki Poisson oranları arasındaki ilişki.

Çözülme sınırlarının belirlenmesinde hacimsel birim şekildeğiştirme eğrilerinden ($\Delta V/V$) faydalanılmıştır. Çözülme sınırı betonda basınç yükleri altında hacim artmasının başladığı noktadır. ε_b , boyuna ve ε_e , enine birim şekil değiştirmeleri göstermek üzere, gerilme – hacimsel şekildeğiştirme diyagramları aşağıdaki şekilde tesbit edilmiştir:

$$\frac{\Delta V}{V} = 1 - (1 - \varepsilon_b)(1 + \varepsilon_e)(1 + \varepsilon_e) \quad (4.1)$$

Bu ifadedeki ikinci ve üçüncü dereceden terimleri ihmal edecek olursak hacimsel şekildeğiştirme;

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_b - 2\varepsilon_e \quad (4.2)$$

olacaktır. Bu ifadeden faydalanarak çizilen gerilme - hacimsel şekildeğiştirme diyagramlarında, deney numunelerine ait $\Delta V/V$ değerlerinin düzenli olarak artarken azalmaya başladığı noktalar çözülme sınırı olarak alınmıştır.

7, 14, 28 ve 365 günlük küp ve silindir basınç dayanımları ile süreksizlik sınırı, çözülme sınırı ve elastiklik modülleri değerleri her beton gurubu için 3 er numunenin ortalaması olarak Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 'da gösterilmektedir.

Tablo 4.3. 7 günlük mekanik özellikler

Numune Kodu	f_{cc} (N/mm ²)	f_{cs} (N/mm ²)	f_{css} (N/mm ²)	$f_{cs\phi}$ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	T_s (N/mm ²)
AB26-7	85.1	82.5	60.1	73.5	47140	5.1
B26-7	85.3	84.2	57.9	74.6	48560	4.1
BC26-7	81.7	80.5	58.2	73.7	46990	3.3
C26-7	74.6	79.4	55.0	73.0	40950	3.2
AB30-7	80.3	73.0	50.6	65.5	43900	4.0
B30-7	80.2	77.1	58.7	69.4	44950	4.0
BC30-7	79.3	81.3	60.4	76.3	41340	3.5
C30-7	71.9	73.5	55.5	67.7	38230	3.4
AB34-7	72.7	64.5	44.4	55.1	45160	3.9
B34-7	75.7	72.6	50.6	66.6	42960	4.1
BC34-7	73.8	70.6	51.3	67.0	42360	4.1
C34-7	55.0	59.1	44.9	56.9	33700	3.0
AB38-7	62.5	54.6	40.9	49.4	40750	3.6
B38-7	61.6	52.8	38.1	49.0	39310	3.9
BC38-7	60.1	53.8	39.7	49.0	37900	3.6
C38-7	58.6	52.8	38.8	49.0	35710	3.5
AB42-7	59.0	51.3	36.8	47.5	41650	3.6
B42-7	53.7	49.5	36.5	45.5	39510	3.6
BC42-7	54.4	48.9	37.0	44.9	38350	3.7
C42-7	53.0	47.2	33.8	43.7	34510	3.9

Tablo 4.4. 14 günlük mekanik özellikler

Numune Kodu	f_{cc} (N/mm ²)	f_{cs} (N/mm ²)	f_{css} (N/mm ²)	$f_{cs\phi}$ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	T_s (N/mm ²)
AB26-14	82.1	75.3	57.3	70.3	49970	4.1
B26-14	88.8	81.3	62.4	75.3	48490	4.8
BC26-14	91.3	83.2	69.4	-	48130	4.3
C26-14	83.7	84.6	61.4	80.8	41450	4.5
AB30-14	84.4	76.7	56.2	74.9	47490	5.5
B30-14	83.1	81.6	64.7	-	46150	5.1
BC30-14	62.6	67.3	46.5	62.4	37470	4.4
C30-14	65.7	66.5	50.4	62.8	35480	3.5
AB34-14	71.5	71.0	50.8	63.1	45120	4.6
B34-14	70.2	71.6	50.6	65.6	42830	4.0
BC34-14	73.7	72.8	52.4	68.5	38820	4.0
C34-14	67.4	67.4	55.1	65.9	38200	3.9
AB38-14	69.7	64.7	49.3	59.7	42990	4.3
B38-14	68.1	65.6	47.2	59.0	42605	3.8
BC38-14	66.5	64.5	48.2	57.9	38480	3.9
C38-14	62.9	58.5	44.1	54.5	38140	3.8
AB42-14	68.3	59.2	43.0	54.1	43570	4.0
B42-14	65.8	59.0	43.0	53.2	41910	4.2
BC42-14	65.3	58.9	40.7	53.6	38010	3.9
C42-14	64.0	57.0	41.3	53.4	37320	3.4

Tablo 4.5. 28 günlük mekanik özellikler

Numune Kodu	f_{cc} (N/mm ²)	f_{cs} (N/mm ²)	f_{css} (N/mm ²)	$f_{csç}$ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	T_s (N/mm ²)
AB26-28	96.5	85.6	69.4	77.5	51330	5.0
B26-28	89.4	98.5	74.2	92.3	49020	6.0
BC26-28	83.6	87.3	61.9	80.2	49550	5.1
C26-28	86.0	91.3	72.6	87.4	44240	5.3
AB30-28	75.7	68.6	48.5	56.4	48160	4.8
B30-28	82.7	76.5	73.5	-	49550	4.8
BC30-28	83.2	88.8	65.2	79.0	46890	4.4
C30-28	81.5	82.4	60.6	75.8	42380	5.0
AB34-28	74.6	68.4	51.8	60.1	46890	4.7
B34-28	77.0	74.1	53.2	65.2	46590	5.0
BC34-28	73.6	79.7	57.4	74.9	42860	4.0
C34-28	70.1	73.3	56.4	69.3	40810	5.2
AB38-28	58.7	58.9	49.4	55.5	45650	3.9
B38-28	68.2	59.1	48.1	55.5	44580	3.7
BC38-28	63.4	58.7	46.2	54.5	40850	4.0
C38-28	64.1	58.2	45.8	55.0	38730	3.6
AB42-28	64.3	60.0	46.4	55.5	47550	4.0
B42-28	62.0	55.8	47.1	52.5	46100	4.0
BC42-28	62.7	55.0	41.1	49.8	42110	3.8
C42-28	60.1	53.9	43.0	49.5	39840	3.6

Tablo 4.6. 365 günlük mekanik özellikler

Numune Kodu	f_{cc} (N/mm ²)	f_{cs} (N/mm ²)	f_{css} (N/mm ²)	$f_{csç}$ (N/mm ²)	E (N/mm ²)	T_s (N/mm ²)
AB26-S	102.0	106.8	86.7	99.2	55960	4.2
B26-S	114.5	109.2	83.3	101.3	55160	4.7
BC26-S	105.0	117.0	93.4	110.0	52400	4.6
C26-S	103.7	116.2	93.7	-	48910	5.0
AB30-S	104.3	101.7	78.0	97.1	52430	4.7
B30-S	100.6	108.4	89.7	103.3	49430	4.7
BC30-S	105.5	108.3	88.8	104.7	46970	5.4
C30-S	94.2	101.8	80.4	95.7	46370	5.4
AB34-S	94.4	94.4	74.2	88.1	50160	4.8
B34-S	93.1	97.5	76.7	92.6	47440	4.5
BC34-S	95.3	92.8	67.3	87.4	46440	4.5
C34-S	80.0	81.5	61.0	75.4	42300	3.9
AB38-S	84.0	81.0	61.7	74.9	50530	4.3
B38-S	79.3	77.9	59.6	73.0	47590	4.2
BC38-S	77.3	78.5	59.2	73.5	46500	4.0
C38-S	73.1	72.5	54.6	67.5	42800	4.6
AB42-S	74.0	72.0	53.8	66.6	48330	4.0
B42-S	73.5	65.1	50.6	60.0	45560	4.3
BC42-S	72.2	69.0	54.1	63.8	45490	3.3
C42-S	70.0	66.4	50.4	59.6	40940	3.7

4.2.3 Yarma-çekme deneyi sonuçları

Deneyler her beton serisi için çapı 150 mm ve yüksekliği 300 mm olan silindirik numuneler üzerinde yapılmıştır. Numuneler basınç presinin tablaları arasına yatay şekilde yerleştirilmiş ve numunenin basınç presine temas eden noktaları ile numune arasına gerilme yayılımının homojen olmasını sağlamak amacı ile numune çapının 1/12 si genişliğinde ve 3 mm kalınlığında ahşap çıtalar yerleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan düzenekte numuneye basınç kuvveti uygulanmıştır. Bu durumda yükleme düzlemine dik doğrultuda çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Kuvvet sıfırdan başlayarak artırıldığında gerilmeler gittikçe büyük değerler almakta ve nihayet kuvvet kırılma değerine ulaştığında numune yükleme eksenini boyunca ikiye yarılmaktadır. Bu durumda numunenin yarma çekme dayanımı, T_s ,

$$T_s = \frac{2P_k}{\pi dh} \quad (4.3)$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada P_k , kırılma yükünü, d , numune çapını ve h , numune yüksekliğini göstermektedir.

Her beton gurubunda 7., 14., 28. ve 365. günlerde 3'er adet numune üzerinde elde edilen sonuçların ortalamaları olarak Tablo 4.3, Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da görülmektedir.

4.2.4 Ultrases hızı ölçümleri ve Schmidt çekici geri tepme değerleri

Bölüm 3, paragraf 3.1.1.3 ve 3.1.1.4'de sırası ile ultrases hızı ölçümü ve Schmidt çekici geri tepme deneylerinin nasıl yapıldığı konusundaki gerekli açıklamalar ve kullanılan deney aletleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. 7, 14, 28 ve 365 günlük deney sonuçları 3'er numunenin ortalaması olarak sırası ile Tablo 4.7, Tablo 4.8, Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da görülmektedir.

Tablo 4.7. 7 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri

Numune Kodu	Ultrases Hızı, Km/sn		Schmidt Çekici
	Küp Numune	Silindir Numune	
AB26-7	5.34	5.19	49.7
B26-7	5.24	5.13	49.1
BC26-7	5.09	4.99	49.2
C26-7	4.88	4.83	47.5
AB30-7	5.27	5.08	47.9
B30-7	5.16	5.03	49.5
BC30-7	5.07	4.90	48.6
C30-7	4.83	4.75	45.7
AB34-7	5.25	5.07	48.0
B34-7	5.16	4.99	47.3
BC34-7	5.02	4.81	48.0
C34-7	4.75	4.59	42.3
AB38-7	5.18	5.00	45.1
B38-7	5.13	4.95	45.7
BC38-7	5.00	4.84	44.5
C38-7	4.91	4.75	44.4
AB42-7	5.16	5.05	45.4
B42-7	5.11	4.95	43.9
BC42-7	4.91	4.79	42.2
C42-7	4.81	4.71	42.2

Tablo 4.8. 14 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri

Numune Kodu	Ultrases Hızı, Km/sn		Schmidt Çekici
	Küp Numune	Silindir Numune	
AB26-14	5.37	5.21	53.5
B26-14	5.25	5.19	51.7
BC26-14	5.21	5.02	51.4
C26-14	4.98	4.87	50.2
AB30-14	5.34	5.11	50.8
B30-14	5.23	5.03	51.3
BC30-14	4.89	4.75	43.3
C30-14	4.84	4.69	43.3
AB34-14	5.27	5.10	50.1
B34-14	5.18	5.00	48.4
BC34-14	5.01	4.88	47.9
C34-14	4.89	4.77	47.4
AB38-14	5.26	5.10	49.8
B38-14	5.13	5.08	49.4
BC38-14	5.04	4.92	49.1
C38-14	4.87	4.81	46.7
AB42-14	5.24	5.12	48.2
B42-14	5.15	5.03	48.1
BC42-14	5.01	4.92	46.5
C42-14	4.89	4.79	45.2

Tablo 4.9. 28 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri

Numune Kodu	Ultrases Hızı, Km/sn		Schmidt Çekici
	Küp Numune	Silindir Numune	
AB26-28	5.46	5.24	54.2
B26-28	5.34	5.21	53.5
BC26-28	5.26	4.98	51.6
C26-28	5.08	4.98	50.7
AB30-28	5.38	5.16	52.5
B30-28	5.26	5.06	52.0
BC30-28	5.17	5.04	50.9
C30-28	4.97	4.84	47.8
AB34-28	5.35	5.11	49.7
B34-28	5.07	4.98	49.9
BC34-28	5.15	5.01	47.6
C34-28	4.98	4.87	47.4
AB38-28	5.25	5.15	50.3
B38-28	5.16	5.03	50.2
BC38-28	5.03	4.88	49.1
C38-28	4.94	4.83	47.3
AB42-28	5.29	5.10	50.4
B42-28	5.17	5.00	48.7
BC42-28	5.04	4.89	48.0
C42-28	4.92	4.81	47.5

Tablo 4.10. 365 günlük ultrases hızı ve Schmidt çekici geri tepme değerleri

Numune Kodu	Ultrases Hızı, Km/sn		Schmidt Çekici
	Küp Numune	Silindir Numune	
AB26-S	5.56	5.40	58.8
B26-S	5.46	5.32	57.4
BC26-S	5.38	5.28	57.3
C26-S	5.22	5.13	55.3
AB30-S	5.53	5.35	57.1
B30-S	5.39	5.24	55.2
BC30-S	5.26	5.16	54.5
C30-S	5.12	5.07	53.6
AB34-S	5.44	5.33	55.8
B34-S	5.31	5.19	54.0
BC34-S	5.21	5.09	53.7
C34-S	5.03	4.94	53.1
AB38-S	5.42	5.31	53.9
B38-S	5.31	5.19	52.8
BC38-S	5.23	5.09	53.7
C38-S	5.05	4.97	51.7
AB42-S	5.37	5.28	54.0
B42-S	5.25	5.12	53.0
BC42-S	5.15	5.08	52.3
C42-S	4.99	4.94	50.3

4.3 Çimento Hidratasyon Isıları

Hidratasyon ısılarının belirlenmesinde ASTM C186-98 [64] ve TS 687 [65] standartları esas alınmıştır. Deneyler için 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 su/çimento oranlarında beş değişik çimento hamuru numunesi hazırlanmıştır. Bu numuneler hazırlanırken aynı su/çimento oranına sahip betonlarda kullanılan akışkanlaştırıcı katkı yüzdeleri kadar katkı ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar cam deney tüpleri içerisine konulmuş ve beton numunelerin bulunduğu havuzlar içerisinde deney günlerine kadar bekletilmiştir. Numuneler deney günlerinde deney tüplerinden kırılarak çıkartılmıştır. Bütün deneyler 21⁰C sıcaklıktaki odada yapılmıştır. Deneyler sırasında kullanılan cihazlar ve malzemeler şu şekilde özetlenebilir.

- Kalorimetre Kabı: Yalıtılmış bir kutu içerisine yerleştirilmiş, üst mantar kapağında bir cam huni ve Beckman termometresinin girebileceği genişlikte delikleri bulunan bir cam termos kaptır.
- Beckman Termometresi: Ayarlanabilen, 6 °C'lik bir aralıkta 0.01 °C duyarlılıkta ölçüm yapabilen bir termometredir.
- Karıştırıcı: Kalorimetre kabı içerisine konulan çözeltiyi sabit dönme hızı ile karıştıran cihazdır.
- Huni: Kalorimetre kabına numune dökmek amacıyla kullanılmıştır.
- Çinko Oksit: Kalorimetre kabının ısı kapasitesinin tayininde kullanılmıştır.
- Nitrik Asit Çözeltisi: 127 ml derişik nitrik asit damıtık su ile bir litreye tamamlanacak şekilde hazırlanmıştır. Bütün deneyler boyunca çözeltinin özelliğinin değişmemesi amacı ile deneylerden önce yaklaşık 40 lt 'lik çözelti hazırlanmıştır.
- Hidroflorik Asit: Derişik hidroflorik asit kullanılmıştır.
- Parafin: Kullanılan hidroflorik asit bilindiği gibi cama zarar verir. Bu çözeltinin kalorimetre kabına zarar vermemesi için kabın içerisi parafin ile yalıtılmıştır.

Çimentonun hidratasyon ısısı, anhidr çimentonun asitte çözünme ısısı ile hidrate çimentonun asitte çözünme ısısı arasındaki farktan hesaplanmıştır.

Hazırlanan çimento numuneleri kalorimetre kabındaki asit çözeltisine konulmadan önce asit karışımı 20 dakika boyunca karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Beckman termometresindeki sıcaklık yükselişi bir büyüteçten faydalanılarak 0.001 °C hassasiyette her dakikada bir kaydedilmiştir. 20. dakikanın sonunda yapılan okuma (θ_0) belirlenmiştir. Daha sonra hazırlanan çimento numunesi kap içerisine dökülmüş ve 20 dakika boyunca ve bir dakika ara ile sıcaklık yükselişleri tekrar kaydedilmiştir. Numune asit çözeltisi içine karıştırıldıktan 20 dakika sonraki sıcaklık (θ_{20}) belirlenmiştir. Kalorimetre kabında deney sırasındaki ısı kaçaklarını tesbit edebilmek amacı ile sıcaklık okumaları 20 dakika daha devam ettirilmiş ve 40. dakikanın sonunda yapılan okuma (θ_{40}) kaydedilmiştir. Sonuç olarak kalorimetre kabındaki sıcaklık yükselişi,

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 \quad (4.4)$$

$$R = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) \quad (4.5)$$

Bağıntıları ile belirlenmiştir. Burada, R_0 ve R sırası ile gözlenen sıcaklık yükselişini ve düzeltilmiş sıcaklık yükselişini ifade etmektedir.

Anhidr çimentonun asitte çözünme ısısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$H_1 = \frac{R.C}{W_k} - 0.20(T - t) \quad (4.6)$$

Burada H_1 anhidr çimentonun asitte çözünme ısısı olmak üzere;

R = Düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, °C,

C = Kalorimetre kabının ısı kapasitesi, cal/°C,

T = Numune kalorimetre kabına konulduğu andaki oda sıcaklığı, °C,

t = Kalorimetre kabının son sıcaklığı, °C ve

W_k = Numunenin kızdırılmış haldeki kütlesi, gr

ni göstermektedir. Bu bağıntıdaki 0.20 katsayısı, cal/gr.°C cinsinden anhidr çimentonun yaklaşık özgül ısını ifade etmektedir [64].

Hidrate çimento cam deney tüpleri içerisinden çıkartıldıktan hemen sonra bir havan içerisinde öğütülmüş, 250 μ göz açıklıklı elekten elenmiş ve küçük bir cam kap içerisine konulmuştur. Daha sonra standartta belirtilen ağırlıkta alınan bu numune anhidr çimento üzerinde yapılan deneyde olduğu gibi kalorimetre kabı içerisine

konularak sıcaklık yükselişleri kaydedilmiş ve düzeltilmiş sıcaklık yükselişi hesaplanmıştır. Hidrate çimentonun asitte çözünme ısısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$H_2 = \frac{R.C}{W_k} - 0.4(T - t_h) - 0.3(t - t_h) \quad (4.7)$$

Burada H_2 hidrate çimentonun asitte çözünme ısısı olmak üzere;

R, C, W_k , T= Anhidr çimentonun asitte çözünme ısısının saptanmasında tanımlanan değerlerin hidrate çimento için karşılıkları,

t_h =Hidrate çimentonun asitte çözünme ısısının tayininde kalorimetre kabının son sıcaklığı, °C ve

t= Anhidr çimentonun asitte çözünme ısısının tayininde kalorimetre kabının son sıcaklığı, °C,

nı göstermektedir. Bu bağıntıdaki 0.40 katsayısı, kısmen hidrate olmuş çimento numunesinde, kızdırılmış numunenin yaklaşık özgül ısısını (cal/gr.°C) ve 0.30 katsayısı, çözelti ısısının ölçümü sırasında, sıcaklıktaki 1 °C'lık artış nedeni ile yaklaşık çözelti ısısında meydana gelen azalmayı (cal/gr.°C) ifade etmektedir [64].

Hidrate olmuş çimentonun hidratasyon ısısı, H, (cal/gr)

$$H = H_1 - H_2 - 0.1(t_h - 25.0) \quad (4.8)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Hidratasyon ısıları, 5 değişik su/çimento oranında hazırlanan numuneler üzerinde 7, 14, 28 ve 365. günlerde belirlenmiştir. Deney sonuçları Tablo 4.11' de ve hidratasyon ısıları ile su/çimento oranları arasındaki ilişkiler Şekil 4.3' de gösterilmektedir.

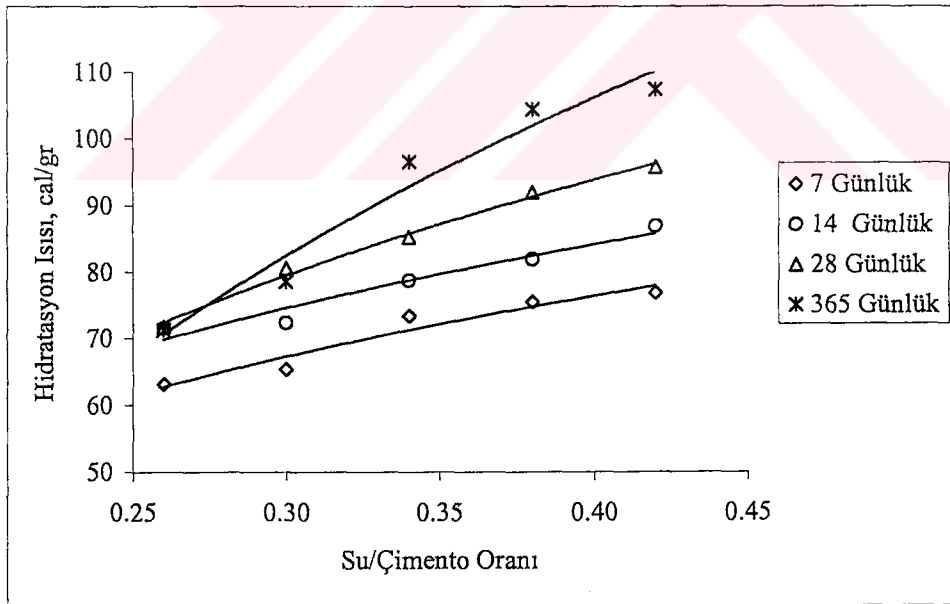
Tablo 4.11. 7., 14., 28. ve 365. günlerde ölçülen hidratasyon ısıları

Su/Çimento Oranı	Hidratasyon Isıları, cal/gr			
	7 gün	14 gün	28 gün	365 gün
0.26	63.0	71.6	71.8	71.3
0.30	65.3	72.3	80.6	78.6
0.34	73.4	78.8	85.3	96.6
0.38	75.5	81.9	92.0	104.4
0.42	76.8	86.9	95.7	107.4

Verbeck ve arkadaşları [66], değişik çimento tiplerinde, üç değişik su/çimento oranında (0.40, 0.60 ve 0.80) ve 3 günden 6.5 yıla kadar değişik yaşlarda hidratasyon ısıları ölçümleri yapmıştır. Bu çalışmada kullanılan 0.42 su/çimento oranına sahip karışımdan bulunan hidratasyon ısıları Verbeck' in 0.40 su/çimento oranına sahip numuneler üzerinde yaptığı ölçümler ile karşılaştırılmış, sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Tablo 4.12'de Verbeck ve arkadaşlarının Portland tipi (Tip 1) çimento üzerinde yaptığı deneylerin sonuçları 8'er numunenin ortalaması olarak gösterilmektedir.

Tablo 4.12. Verbeck ve arkadaşlarının Portland tipi çimento üzerinde ölçtükleri hidratasyon ısıları [66].

Su/Çimento Oranı	Hidratasyon Isıları, cal/gr						
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün	1 yıl	6.5 yıl	13 yıl
0.40	60.9	79.2	95.6	103.8	108.6	116.8	118.2
0.60	65.8	87.7	107.1	114.7	120.0	123.1	-
0.80	66.3	89.4	111.6	119.5	122.2	125.0	-



Şekil 4.3 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde su/çimento oranı ile hidratasyon ısıları arasındaki ilişkiler.

Bu çalışmada deneysel olarak bulunan hidratasyon ısıları ile su/çimento oranları arasındaki ilişkilerin ne kadar güçlü olduğunu görebilmek amacı ile bu büyüklükler arasındaki bağıntılar incelenmiş ve korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Aradaki

bağıntıları logaritmik fonksiyonlar en iyi şekilde ifade etmektedir. Bu bağıntılar ve korelasyon katsayıları Tablo 4.13' de verilmektedir. Tablodaki değerler incelendiğinde hidrasyon ısıları ile su/çimento oranları arasındaki bağıntıların oldukça güçlü olduğu görülmektedir.

Tablo 4.13. Su/çimento oranları (w/c) ile hidrasyon ısıları (H) arasındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları

Numune Yaşı	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı, r
7	$H = 31.82 \ln(w/c) + 105.6$	0.966
14	$H = 33.18 \ln(w/c) + 114.6$	0.970
28	$H = 49.68 \ln(w/c) + 139.4$	0.996
365	$H = 82.42 \ln(w/c) + 181.7$	0.978

4.4 Hidrasyon Derecelerinin Belirlenmesi

Hidrasyon, çimentoyu oluşturan bileşenlerin su ile birleştiğinde zamanın bir fonksiyonu olarak ilerleyen ve bu süre içerisinde hidrate elemanların olduğu bir fizikokimyasal olaydır. Hidrasyon olayı çimento tanelerinin dış yüzeyinden başlayarak merkeze doğru ilerlemekte ve hidrate olan kısım jel yapıyı oluşturmaktadır. Bu açıklamalar altında hidrasyon derecesi, çimento tanelerinin hidrate olan kısımlarının toplam çimento hacmine oranı olarak ifade edilebilir. Başka bir deyişle hidrasyon derecesi, çimento tanelerinin ne oranda hidrate olduğunu gösteren bir büyüklüktür. Hidrasyon derecelerinin belirlenmesinde buharlaşmayan su miktarının tesbit edilmesi yöntemi kullanılmıştır. Hidrasyon dereceleri (α) sertleşmiş çimento hamuru numunelerinde saptanan buharlaşmayan su miktarının, çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmeleri için gerekli su miktarına oranlanmasıyla hesaplanmıştır. Bilindiği gibi çimento tanelerinin tamamen hidrate olabilmesi için çimento ağırlığının 0.23' ü oranında suya gereksinim vardır.

Deneylerde hidrasyon ısılarının ölçülmesinde kullanılan numunelerden faydalanılmıştır. Numuneler havan içerisinde öğütüldükten ve elekten elendikten sonra deney için gerekli olan miktar 0.001 gr hassasiyetle tartılmışlardır. Bunlar 105°C sıcaklıktaki etüv içerisinde 1 saat kurutulmaya bırakılmışlardır. 1 saat sonunda etüvden çıkartılan numuneler 1000 °C sıcaklıktaki fırın içerisinde yaklaşık 4 saat

boyunca kızdırılmışlardır. Bu zaman sonunda numuneler fırından çıkartılmış ve bir desikatör içerisinde 15-20 dakika soğutulmaya bırakılmışlardır. Oda sıcaklığına gelen numuneler tekrar 0.0001 gr hassasiyetli tartı ile tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Bu işlemler her su/çimento oranına sahip numuneler için 7., 14., 28. ve 365. günlerde tekrarlanmıştır. Buharlaşamayan su miktarının çimento ağırlığına oranı aşağıdaki bağıntıdan faydalanarak hesaplanmıştır ,

$$\left(\frac{w_n}{c} \right) = 100 \left[\frac{w_k - w_{hi}}{w_{hi}} - W_i \right] \quad (4.9)$$

Burada w_n , buharlaşamayan su miktarını göstermek üzere, w_k , hidrate çimentonun 105 °C lik etüvden çıktıktan sonraki kuru ağırlığı, w_{hi} , hidrate çimentonun kızdırma işlemi sonundaki ağırlığı ve W_i , hidrate olmamış çimentonun kızdırma kaybını ifade etmektedir. Bu değerler bulunduktan sonra , α hidratasyon dereceleri,

$$\alpha = 100 \cdot \left[\frac{w_n / c}{0.23} \right] \quad (4.10)$$

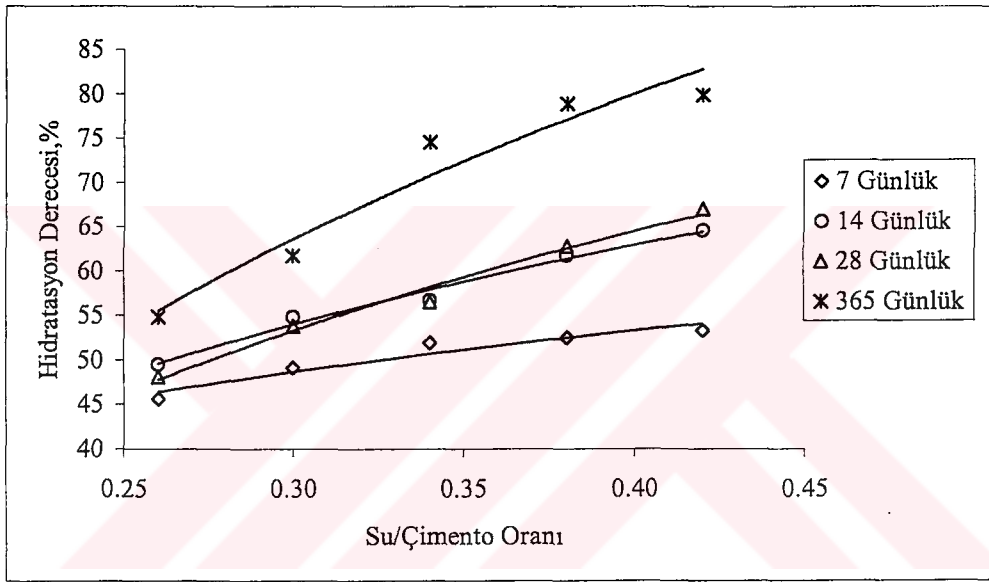
bağıntısı ile hesaplanmıştır. Deneyler her su/çimento oranı ve her deney yaşı için üçer numune üzerinde tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda bulunan w_n/c oranları Tablo 4.14' de ve hidratasyon dereceleri Tablo 4.15' de verilmektedir. Su/çimento oranı ile hidratasyon dereceleri arasındaki ilişki grafik olarak Şekil 4.4' de gösterilmiştir.

Tablo 4.14. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde bulunan buharlaşamayan su miktarı oranları (w_n/c)

Su/Çimento Oranı	w_n/c			
	7 gün	14 gün	28 gün	365 gün
0.26	0.1049	0.1139	0.1106	0.1260
0.30	0.1129	0.1260	0.1228	0.1419
0.34	0.1194	0.1304	0.1300	0.1716
0.38	0.1208	0.1419	0.1444	0.1815
0.42	0.1226	0.1486	0.1491	0.1840

Tablo 4.15. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerin hidrasyon dereceleri

Su/Çimento Oranı	Hidrasyon Derecesi, α , (%)			
	7 gün	14 gün	28 gün	365 gün
0.26	45.8	49.5	48.1	54.8
0.30	49.1	54.8	53.4	61.7
0.34	51.9	56.7	56.5	74.6
0.38	52.5	61.7	62.8	78.9
0.42	53.3	64.6	64.8	80.0



Şekil 4.4 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde su/çimento oranı –hidrasyon dereceleri arasındaki ilişki.

Tablo 4.16. Su/çimento oranları (w/c) ile hidrasyon dereceleri (α) aralarındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları

Numune Yaşı	Bağıntı	Korelasyon Katsayısı, r
7	$\alpha = 16.03 \ln(w/c) + 68.0$	0.963
14	$\alpha = 30.97 \ln(w/c) + 91.3$	0.992
28	$\alpha = 35.78 \ln(w/c) + 96.2$	0.992
365	$\alpha = 57.06 \ln(w/c) + 132.4$	0.969

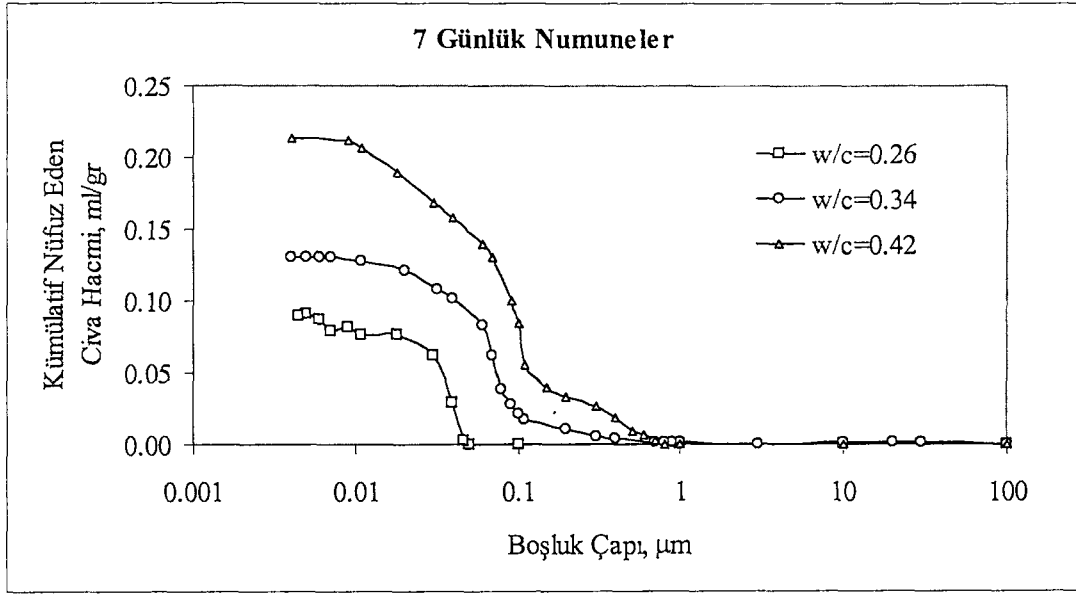
Deneyssel olarak bulunan hidratasyon dereceleri ile su/çimento oranları arasındaki ilişkilerin ne kadar güçlü olduğunu görebilmek amacı ile bu özellikler arasındaki bağıntılar incelenmiş ve korelasyon katsayıları belirlenmiştir. Aradaki bağıntıları hidratasyon ısılarında olduğu gibi logaritmik fonksiyonlar en iyi şekilde ifade etmektedir. Bu bağıntılar ve korelasyon katsayıları Tablo 4.16' de verilmektedir. Tablodaki değerler incelendiğinde hidratasyon dereceleri ile su/çimento oranları arasındaki bağıntıların oldukça güçlü olduğu görülmektedir.

4.5 Civalı Porozimetre Deneyi ile Sertleşmiş Çimento Hamurundaki Boşluk Dağılımlarının Ölçülmesi

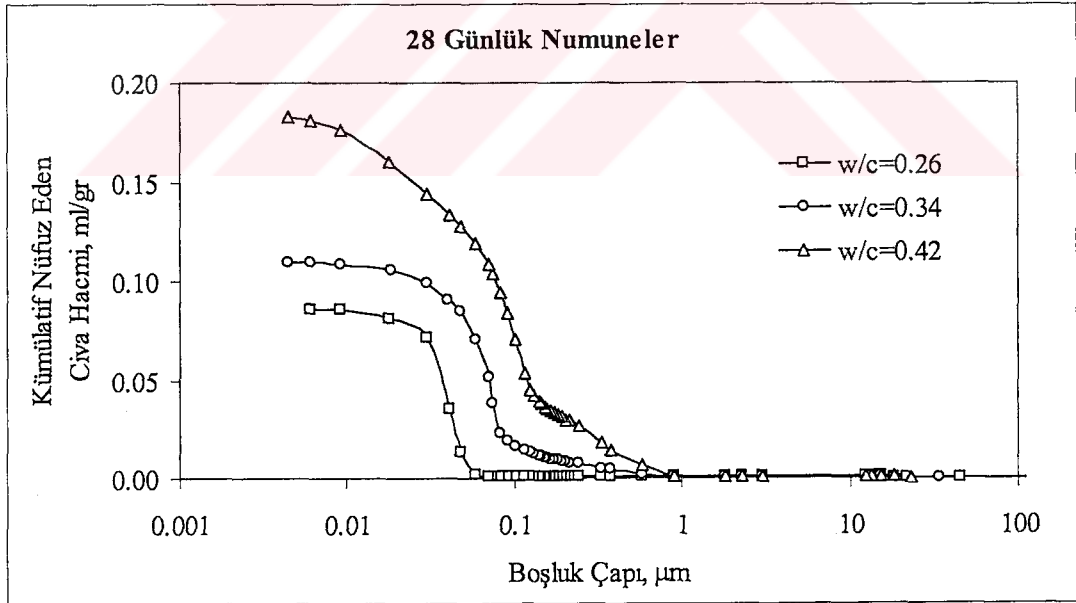
Bu deneyler için su/çimento oranları 0.26, 0.34 ve 0.42 olan 3 değişik çimento hamuru numunesi üzerinde 7., 28. ve 365. günlerde TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır. Numuneler hazırlanırken her bir çimento hamuruna, aynı su/çimento oranına sahip betonlarda kullanılan katkı yüzdeleri kadar katkı ilave edilmiştir. Deney numuneleri üretildikten sonra cam deney tüpleri içerisinde ağızları parafin ile izole edilerek saklanmış, deney günlerinde numuneler cam tüpler içerisinden kırılarak çıkartılmıştır. Civalı porozimetre deneyinde, deney için hazırlanan numune kapalı bir hazne içerisine yerleştirildikten sonra hazneye civa doldurulmuş ve bu civanın giderek artan basınç ile numuneye nüfuz etmesi sağlanmıştır. Deney sistemine ait bir yazılımdan faydalanılarak numune içerisindeki boşluk dağılımları numuneye nüfuz eden civa hacmine bağlı olarak (ml/gr) tesbit edilmiştir. Boşluk dağılımı tayini Autopore II 9220 civalı porozimetre cihazı ile yapılmış olup, deneyler aşağıda belirtilen sabit deney koşullarında yapılmıştır:

- i. Islatma açısı 130°
- ii. Civa yüzey gerilmesi= 485 dyn/cm
- iii. Maksimum civa basıncı= 40000psi (~276 Mpa)

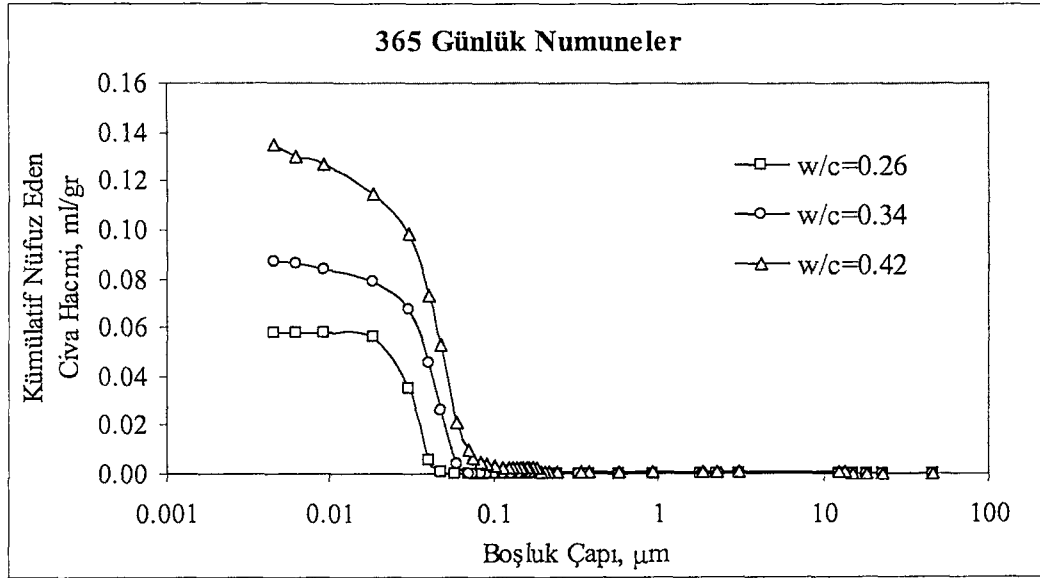
7, 28 ve 365 günlük numunelere ait boşluk çapı (μm) ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi (ml/gr) arasındaki değişimler 3 değişik su/çimento oranı için sırası ile Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 7 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.



Şekil 4.6 28 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.



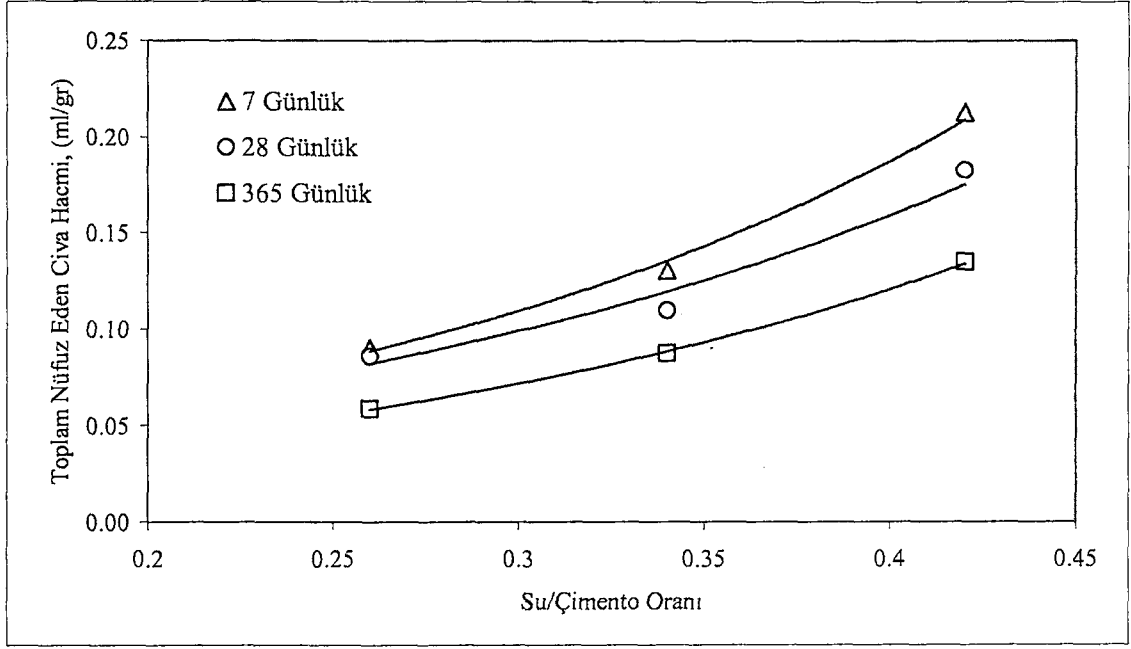
Şekil 4.7 365 günlük, 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.

Bu şekiller incelendiğinde, tüm deney yaşlarında su/çimento oranının azalması ile numunenin içine nüfuz eden toplam civa hacminin de azaldığı görülmektedir. Bunun nedenini, su/çimento oranının artması ile numune içerisindeki toplam kılcal boşluk hacminin de artması olarak açıklayabiliriz. Tablo 4.17' de 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip 7, 28 ve 365 günlük numunelere nüfuz eden toplam civa hacimleri ml/gr olarak verilmiştir.

Tablo 4.17. 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde toplan nüfuz eden civa hacimleri.

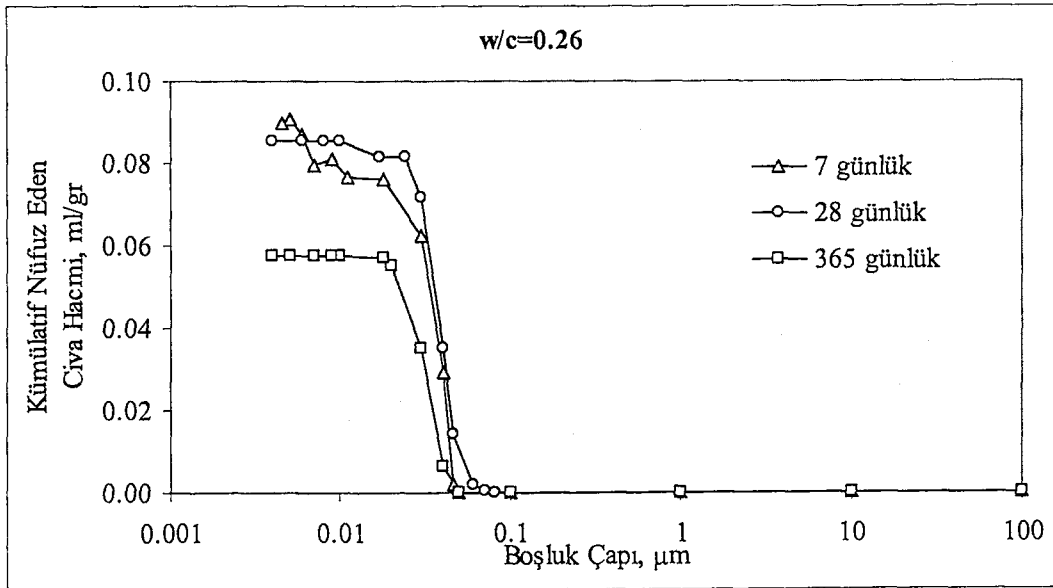
Su/Çimento Oranı	Toplam Nüfuz Eden Civa Hacmi, ml/gr		
	7 gün	28 gün	365 gün
0.26	0.0901	0.0856	0.0587
0.34	0.1307	0.1098	0.0873
0.42	0.2127	0.1825	0.1348

Bu tabloda verilen değerlerden faydalanarak su/çimento oranına bağlı olarak toplam nüfuz eden civa hacmindeki değişimi grafik olarak görebiliriz (Şekil 4.8).

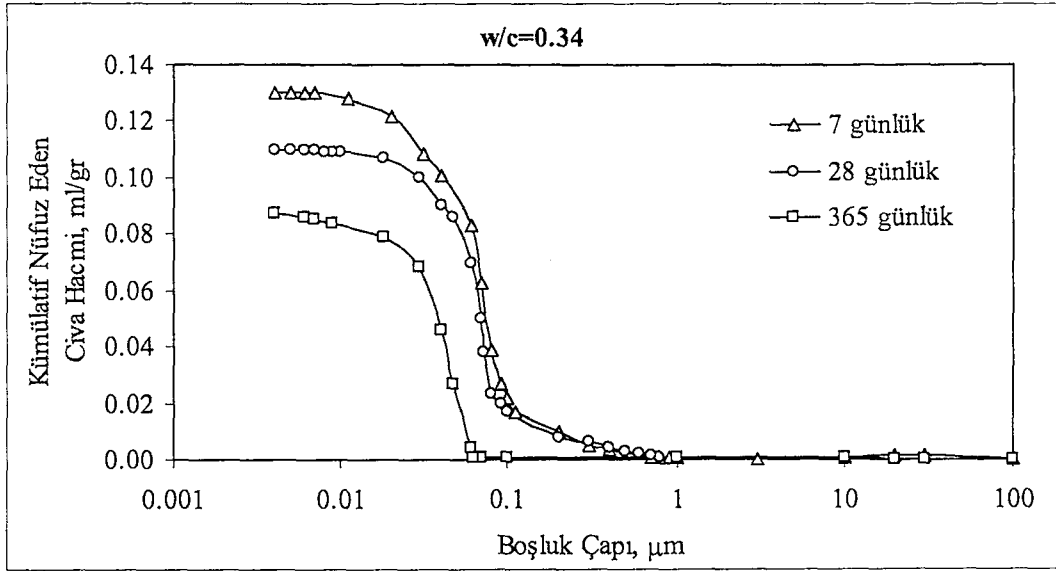


Şekil 4.8 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde su/çimento oranı ile toplam nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.

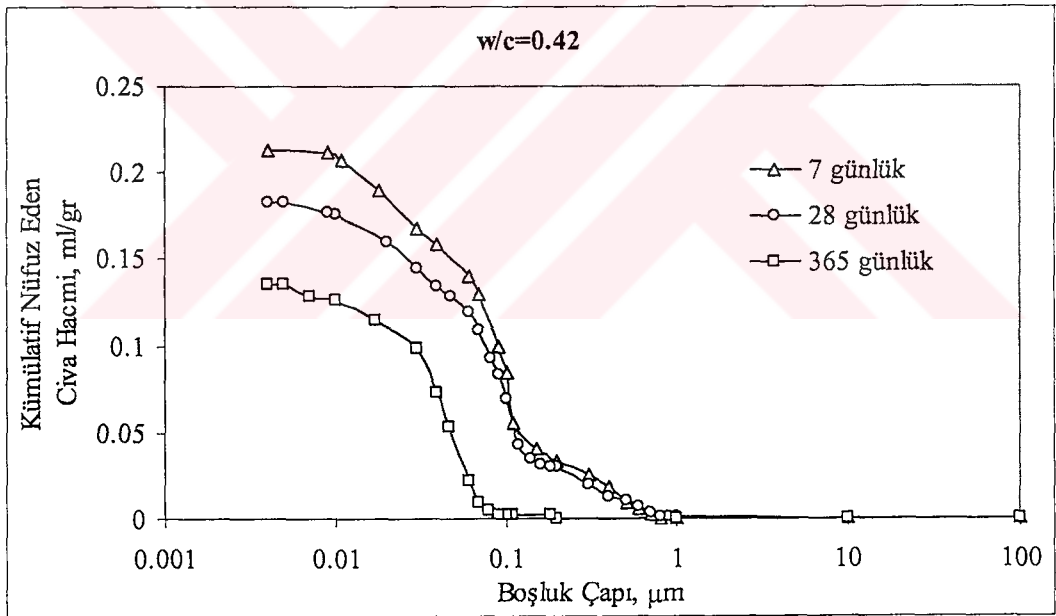
Şekil 4.9, 4.10 ve 4.11' de sırası ile su/çimento oranları 0.26, 0.34 ve 0.42 olan çimento hamuru numunelerine ait boşluk çapı dağılımı ile toplam nüfuz eden civa hacmi arasındaki değişimler 3 değişik kür süresi için (7, 28 ve 365 gün) gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Su/çimento oranı 0.26 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.



Şekil 4.10 Su/çimento oranı 0.34 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.

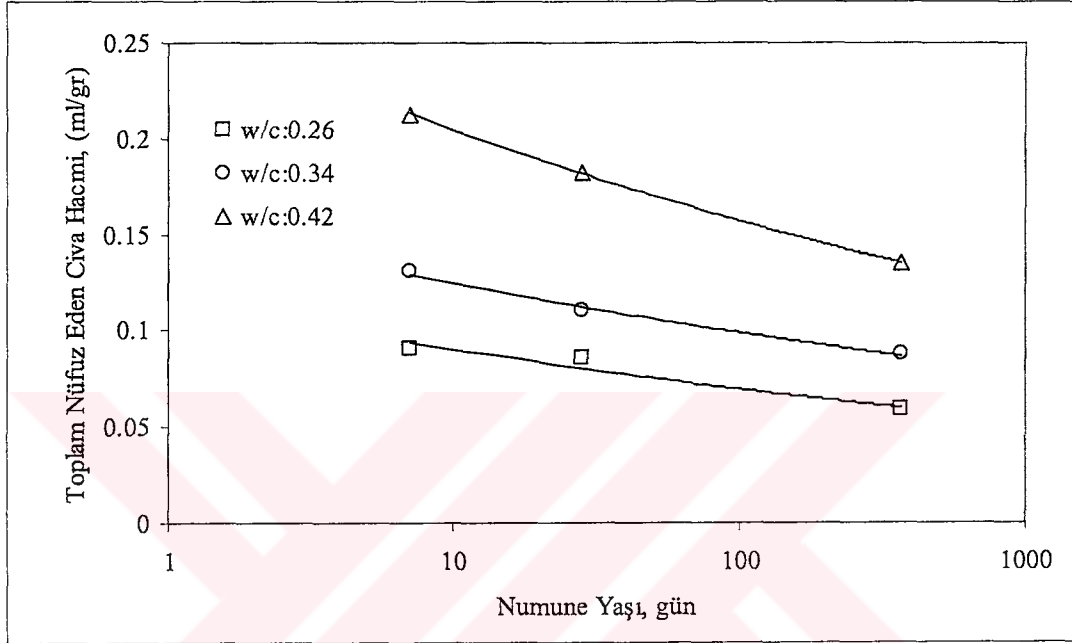


Şekil 4.11 Su/çimento oranı 0.42 olan 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi arasındaki ilişki.

Bu şekiller incelendiğinde herhangi bir su/çimento oranına sahip çimento hamurunda kür süresinin artması ile birlikte toplam nüfuz eden civa hacminin azaldığı görülmektedir. Hidratasyon olayı zamanla devam eden fiziko-kimyasal bir olaydır.

Hidratasyon derecesinin artması ile birlikte numune içerisindeki kılcal boşluklar daralmakta, dolayısıyla bu boşlukların hacimleri azalmaktadır.

Sadece toplam nüfuz eden civa hacimlerini dikkate alacak olursak Tablo 4.17’ de verilen değerlerden faydalanarak toplam nüfuz eden civa hacminin numunenin kür süresine bağlı olarak nasıl değiştiğini bir şekil üzerinde gösterebiliriz (Şekil 4.12).



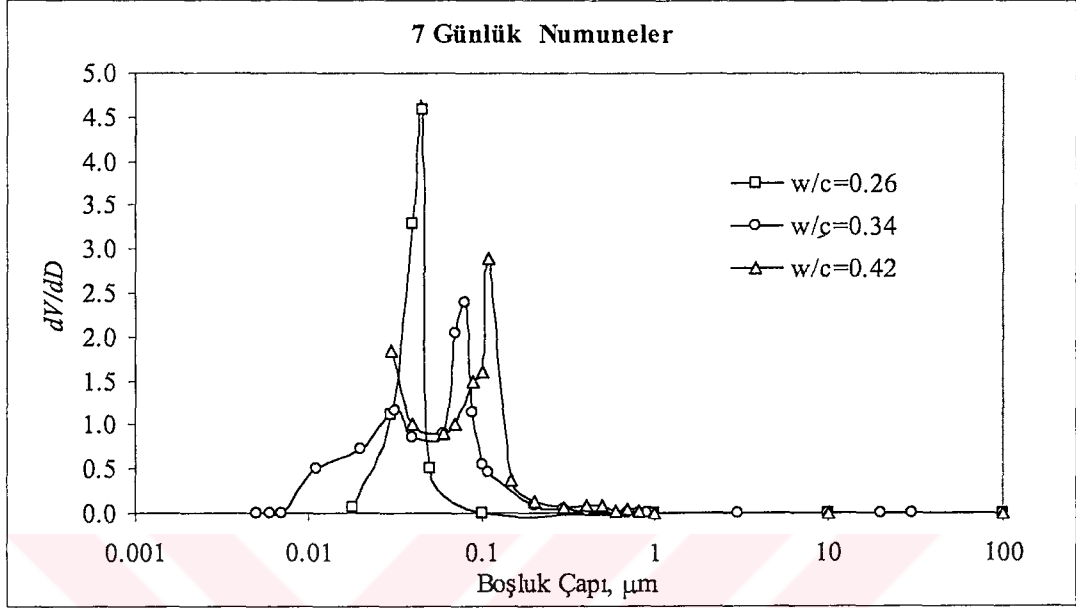
Şekil 4.12 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamuru numunelerinde toplam nüfuz eden civa hacminin numunenin kür süresine bağlı olarak değişimi.

Numune içerisindeki boşluklar birbirleri ile bağlantılı, sürekli bir sisteme sahip ise, basıncın artması ile birlikte civa numunenin tüm boşluklarına dolabilir. Bunun yanında eğer boşluk sistemi sürekli bir sisteme sahip değil ise, öyle ki bu durum hidratasyon sonucunda hidrate ürünlerin birbirleri ile bağlantılı olan boşluk sistemlerini tıkaması ile mümkün olur, bu tıkanıklıklar civanın basıncıyla kırılacak ve civa numunenin içlerine doğru ilerlemeye devam edecektir. Deney sırasındaki basınç ve nüfuz eden civa hacmi değişimlerini takip ederek, sürekli bir ağa sahip boşluk sistemlerinde, boşluklar arasındaki geçiş bölgelerini ve sürekli olmayan bir ağa sahip olan boşluk sistemlerinde ise civanın tıkanmış bölgeleri kırarak yoluna devam ettiği basınç seviyelerini tesbit etmek mümkündür [25]. Basıncıdaki birim değişiklik sonucu oluşan civa penetrasyonundaki en yüksek hıza karşılık gelen çap

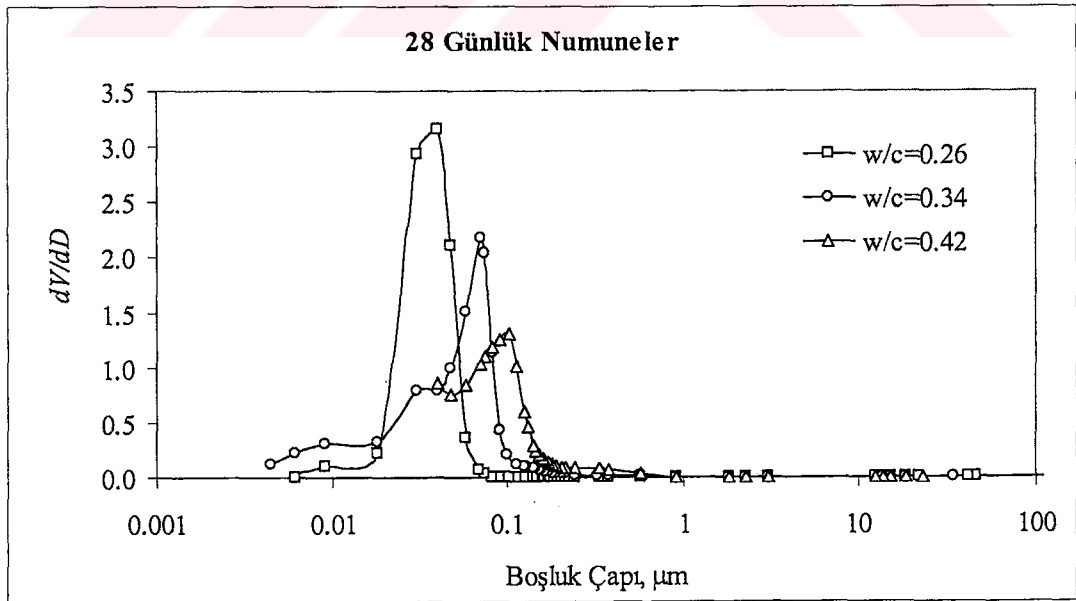
“kritik boşluk çapı” olarak anılır. Bu eşik aşıldıktan sonra civa numunenin iç boşluklarına doğru ilerlemeye başlar.

Cook ve diğ. [25], su/çimento oranları 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 ve 0.70 olan 5 değişik çimento hamuru numuneleri üzerinde 1., 3., 7., 14., 28. ve 56. günlerde civalı porozimetre deneyleri yapmışlardır. Araştırmacılar bu çalışmalarında çimento hamurunun kür süresine bağlı olarak porozimetre eğrilerinin değişik karakter gösterdiklerini belirtmişlerdir. Kısa süreli küre tabi tutulan numunelerin diferansiyel eğrilerine ($dV/dD - D$) bakıldığında keskin bir 1. tepenin olduğu, bununla beraber kür süresinin artması ile birlikte 1. tepeden sonra daha küçük boşluk çaplarına karşılık gelen ve daha yuvarlatılmış bir tepe noktasına sahip olan bir 2. tepenin de olduğunu belirtmişlerdir. Kür süresinin artması ile birlikte, 1. tepenin belirginliğinin azaldığını ve 0.70 su/çimento oranına sahip numuneler haricinde diğer bütün numunelerde 1. tepenin sonunda kaybolduğunu, su/çimento oranının düşmesi ile birlikte, 1. tepenin olduğu noktaya karşılık gelen boşluk çapının da düştüğünü söylemişlerdir. Diferansiyel eğrilerindeki ($dV/dD - D$) 1. tepe noktası, civanın, numune yüzeyine açık kılcal boşluk ağına geçtiği noktayı, diğer bir deyiş ile, birbirleri ile bağlantılı olan bir kılcal boşluk ağının, numune yüzeyi ile bağlantısını kuran minimum boşluk boyutunu ifade etmektedir. Hidratasyonun devam etmesi ile birlikte kılcal boşlukların çapları da daralacağından, 1. tepe noktasına karşılık gelen boşluk çapları da hidratasyonun artması ile azalacaktır. Aynı araştırmacılar, diferansiyel eğrilerinde görünen 2. tepenin, 1. tepeden farklı bir mekanizmayı ifade edebileceğini belirtmişlerdir. Bunun açıklamasını ise iki farklı olasılığa dayandırmışlardır. Birinci olasılığa göre 2. tepe noktası, civanın daha küçük boyutlu farklı bir boşluk ağına geçtiği noktayı ifade etmektedir. 2. tepenin daha yuvarlatılmış bir tepe noktasına sahip olması ise, bu bölge için, boşluk boyutlarının geniş bir dağılıma sahip olduğu anlamına geleceği şeklinde açıklanmıştır. İkinci olasılığa göre ise 2. pik bir boşluk çapını ifade etmeyip, kılcal boşlukları tıkayıp civanın nüfuz etmesine engel olan hidratasyon ürünlerinin kırıldığı dayanımları ifade etmektedir. Hidratasyon süresi boyunca boşluklar arasındaki bağlantılar hidratasyon ürünleri tarafından tamamen tıkanmış olabilir. Bu da, 1. tepenin kaybolmasına neden olacaktır. Eğer boşluk hala mevcut ise ve hidratasyon ürünleri ile bloke edilmiş durumda ise, civa, ya bu boşluk içerisine hidratasyon ürünlerinin arasından bulacağı bir yoldan , ya da, hidratasyon ürünlerini kırarak bloke edilmiş boşluğa ulaşacaktır.

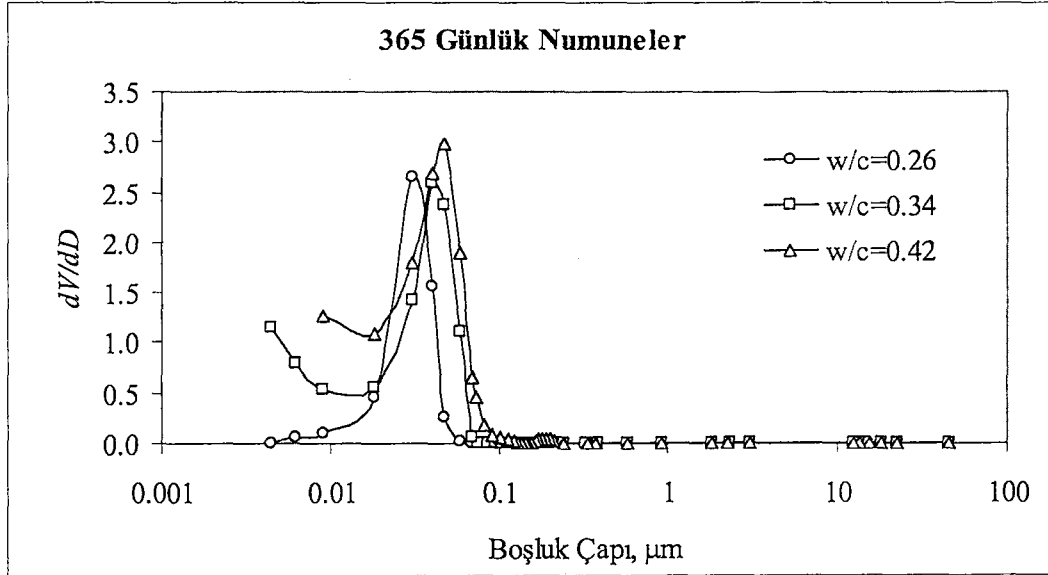
Eğer mekanizma bu şekilde çalışıyor ise, 2. tepe bağlantılı boşlukların boyutlarını ifade etmeyip, ya hidratasyon ürünlerinin karakteristik boşluk genişliğini, ya da bu ürünlerin kırıldığı basıncı ifade edecektir.



Şekil 4.13 7 günlük numunelerde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.



Şekil 4.14 28 günlük numunelerde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.



Şekil 4.15 365 günlük numunelerde boşluk çapı dağılımı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.

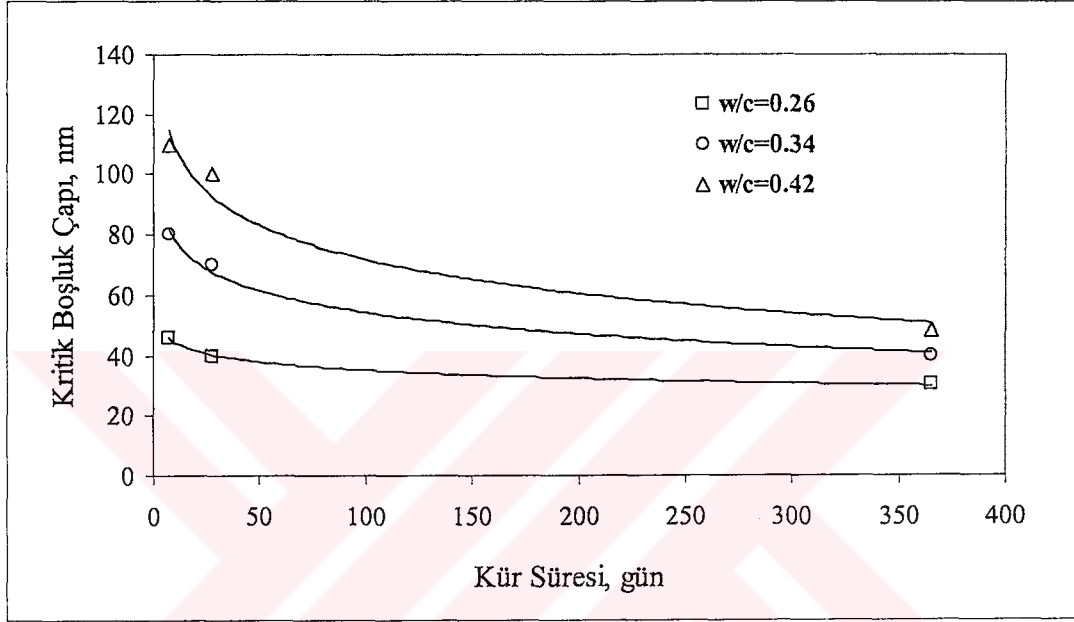
Çalışmamızdaki 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi ($dV/dD - D$) arasındaki grafikler 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranları için birlikte çizilmiş ve Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15’ de verilmiş ve bu grafiklerdeki pik noktaları “kritik boşluk çapı” olarak belirlenmiştir. Ayrıca EkB, Şekil B1-B9 arasında, her deney yaşı ve her su/çimento oranı için boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi ($dV/dD - D$) arasındaki grafikler ayrı ayrı gösterilmiştir.

Tablo 4.18. 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip 7, 28 ve 365 günlük çimento hamuru numunelerinde kritik boşluk çapları.

Su/Çimento Oranı	Kritik Boşluk Çapı, nm		
	7 gün	28 gün	365 gün
0.26	46	40	30
0.34	80	70	40
0.42	110	100	48

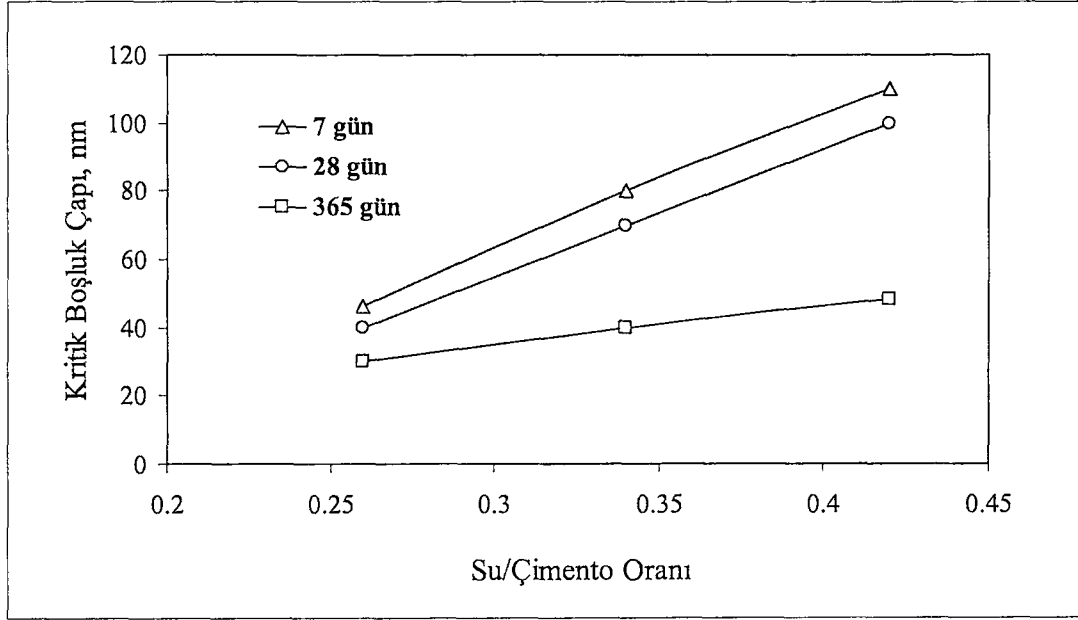
Tablo 4.18’ de verilen kritik boşluk çaplarındaki değişimleri kür süresi ve su/çimento oranına bağlı olarak gösteren grafikler Şekil 4.16 ve 4.17’ de verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde, her su/çimento oranında kür süresinin artması ile birlikte kritik

boşluk çaplarının azaldığı, 1 yıl kür süresini dolduran numunelerde ise kritik boşluk çaplarının birbirine yaklaştığı görülmektedir. Kritik boşluk çapları arasındaki fark 7. ve 28. günlerde oldukça belirgindir. Su/çimento oranı 0.26 olan numunelerde ise 28. ve 365. günlerde belirlenen kritik boşluk çapları arasında kayda değer bir değişim görülmemekte, hatta 7. gün ve 28 ve 365. günlerdeki ölçümler arasında da önemli bir fark olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.16 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip çimento hamurlarında kritik boşluk çapı ile kür süresi arasındaki değişim.

0.26 su/çimento oranı çimentonun hidratasyonunu devam ettirebilmesi için oldukça düşük bir orandır. Bu orana sahip hamurlarda kılcal boşluk hacmi oldukça az olduğundan hidratasyon sonucunda ortaya çıkacak hidrate ürünlerin oluşabileceği hacim azalmakta ve dolayısıyla ilerleyen yaşlarda hidratasyon devam edememektedir. Bundan dolayı 0.26 su/çimento oranına sahip çimento hamurlarında, su/çimento oranı 0.34 ve 0.42 olan hamurlara göre kritik boşluk çapının değişimi kür süresine bağlı olarak belirgin bir şekilde ortaya çıkmamaktadır. Şekil 4.17' de ise kritik boşluk çapındaki değişim, su/çimento oranına göre verilmiştir. Su/çimento oranının artması ile birlikte kritik boşluk çapları da artmaktadır. Yukarıda su/çimento oranı 0.26 olan çimento hamuru için yapılan açıklamayı bu şekil üzerinde daha net görebilmek mümkündür.



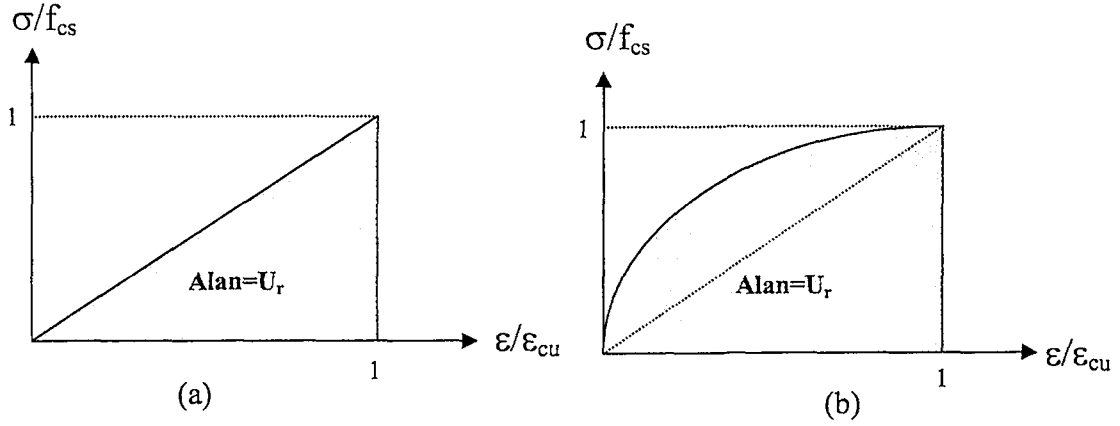
Şekil 4.17 7, 28 ve 365 günlük çimento hamurlarında kritik boşluk çapı ile su/çimento oranı arasındaki değişim.

4.6 Bağlı Kırılma Enerjileri

Yüksek mukavemetli betonların normal mukavemetli betonlara göre daha gevrek bir davranış gösterdiği bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen 4 değişik granülometri, 5 değişik su/çimento oranı ve 4 farklı deney yaşına sahip silindirik deney numuneleri üzerinde yapılan tek eksenli basınç deneylerinin sonuçlarından faydalanarak, bu betonlara ait gevrek davranışın belirlenmesine çalışılmıştır. Bunun için deney numunelerine ait gerilme boyuna şekil değiştirme eğrilerinin basınç dayanımına kadar olan kısmı altındaki alanlardan (kırılma şekil değiştirme enerjileri) faydalanılmıştır. $(KE)_{maks}$ kırılma şekil değiştirme enerjisi, f_{cs} , betonun basınç dayanımı, ϵ_{cu} , betonun kırılma anındaki birim boy kısalması olmak üzere, σ/f_{cs} ile ϵ/ϵ_{cu} arasındaki ilişkiyi gösteren grafiğin altında kalan alanı bağlı kırılma enerjisini (U_r ile göstereceğiz) verir. U_r ' leri hesaplamakla, gevrekliği sayısal olarak tanımlayabilen değerler bulabiliriz.

Şekil 4.18 incelendiğinde lineer elastik davranış gösteren malzemede bağlı kırılma enerjisinin (U_r) 0.5 olduğu görülmektedir. İnelastik davranış gösteren malzemede ise bu değer,

$$U_r = \frac{1}{f_{cs} \varepsilon_{cu}} \int_0^{\varepsilon_{cu}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (4.11)$$



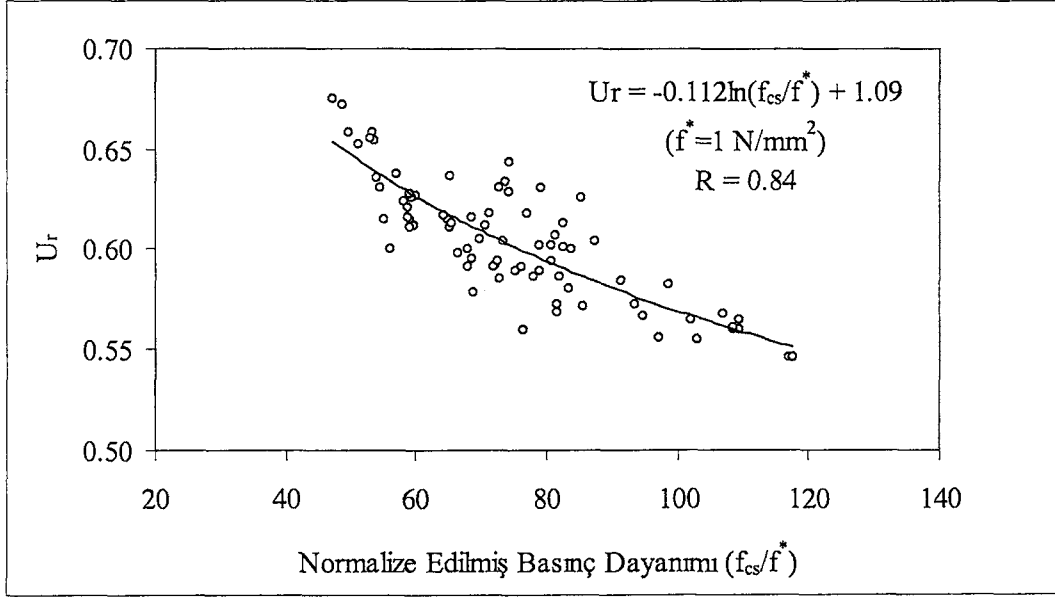
Şekil 4.18 (a) Lineer elastik ve (b) inelastik davranış gösteren malzemede bağıl kırılma enerjileri.

olup, 0.5' den daha büyük değerler alacaktır ($0.5 < U_r < 1$). Bu ifadenin integral kısmı, gerilme şekildeğiştirme grafiğinin basınç dayanımına kadar olan bölümünün altında kalan alanı, yani kırılma şekil değıştirme enerjisini vermektedir. Bu alana “S” dersek, bağıl kırılma enerjisi, U_r ,

$$U_r = \frac{S}{f_{cs} \varepsilon_{cu}} \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir.

20 değışik karışım ve 4 değışik yağıdaki 80 betona ait basınç dayanımları ile bağıl kırılma enerjileri arasındaki bağıntı Şekil 4.19' da gösterilmektedir. Ayrıca Ek B, Tablo B2' da bu betonlara ait hesaplanan kırılma şekil değıştirme enerjileri üçer numunenin ortalaması olarak verilmektedir.



Şekil 4.19 Normalize edilmiş basınç dayanımları ile bağıl kırılma enerjileri arasındaki ilişki.

5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Çimento Hamuru Boşluk Yapısına Duyarlılık Derecelerinin Belirlenmesi

Çalışmada, aşağıda belirtilen 10 adet sertleşmiş beton özeliğinin SD1 ve SD2 duyarlılık dereceleri bulunmuştur:

- f_{cc} : 150x150x150 mm boyutlu küp basınç dayanımı,
- f_{cs} : 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silindir basınç dayanımı,
- f_{css} : Süreksizlik sınırı,
- $f_{csç}$: Çözülme sınırı,
- Δ : Kılcal boşlukları tamamen kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlık,
- V_c : Küp numune üzerinde ölçülen ultrases hızı,
- V_s : Silindir numune üzerinde ölçülen ultrases hızı,
- E : Elastiklik modülü,
- S : Schmidt çekici geri tepme değeri,
- T_s : Yarma dayanımı.

5.1.1 Anhidr çimento tanelerinin jele dönüşmesi sonucu oluşan hacim artış oranlarının bulunması

Bölüm 2, Paragraf 2.5' de Powers [15,31]' ın çalışmalarına göre 1 cm³ çimentonun tamamen hidrate olması sonucunda 2.06 cm³ çimento jeli oluştuğu söylenmişti. Bu bölümde bu büyüklüğün bu araştırmadaki betonlarda hangi değerleri aldığını belirlemek için yaptığımız çalışmalar anlatılacaktır. Bunun için duyarlılık derecesini bildiğimiz bir özellik olan kılcal boşlukları tamamen kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlıklardan (Δ) faydalanılmıştır. Birim ağırlık için boşlukların kılcal veya hapsolmuş hava boşlukları mı olduğu değil, bunların miktarı belirleyicidir.

Dolayısıyla birim ağırlığın duyarlılık katsayısı $n_i^* = 1$ dir. Hidrate olmamış çimento taneleri jele dönüştüğünde hacimleri “p” katına çıkacak dersek, kılcal boşluklardaki azalma, $p\alpha c - \alpha c = (p-1)\alpha c$ olup, çimento hamurundaki toplam boşluk hacmi de,

$$[w - (p-1)\alpha c] + a \quad (5.1)$$

kadar olacaktır. Bundan sonra (5.1) ifadesi kısaca D1 değişkeni olarak isimlendirilecektir.

Yukarıda kılcal boşlukları tamamen kurutulmuş durumda ölçülen birim ağırlıklar için duyarlılık katsayısı n_i^* değerinin 1 olduğunu söylemiştik. Bunun anlamı, D1 değişkeninin betonun birim ağırlık özeliği üzerinde çimento hamuru boşluk yapısını en iyi şekilde ifade edeceği, yani maksimum korelasyon katsayısının bu şekilde elde edilebileceğidir.

Yapılan hesaplarda ilk önce 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda Δ ile D1 değişkeni arasındaki ilişkiyi en iyi şekilde ifade edecek fonksiyon belirlenerek (lineer) “p” ile ifade edilen büyüklüğe değişik değerler verilmiş ve maksimum korelasyon katsayısını veren “p” değerleri her yaş için belirlenmiştir. D1 değişkenine göre her deney yaşı için 20 adet beton karışımına ait birim ağırlıklardan bulunan “p” değerleri ve bu “p” değerleri kullanıldığında elde edilen (Δ -D1) bağıntılarının korelasyon katsayıları Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. Δ ile D1 değişkeni arasındaki ilişkiden faydalanılarak bulunan “p” değerleri ve (Δ -D1) bağıntılarının korelasyon katsayıları.

Beton Yaşı (Gün)	p	Korelasyon Katsayısı (r)
7	1.80	0.988
14	1.81	0.995
28	1.75	0.980
365	2.14	0.957

Tablo 5.1’ de verilen korelasyon katsayılarının oldukça güvenilir seviyelerde olduğu görülmektedir. Tablo incelendiğinde 7, 14 ve 28 günlük betonlara ait “p” değerlerinin birbirine oldukça yakın değerlere sahip olduğu ve ortalamasının 1.79 olduğu görülmektedir. Fakat 365 günlük betonlarda “p” değeri 2.14 olarak hesaplanmıştır. Buradan Powers tarafından çimento hamurlarında 2.06 olarak ölçülen

mertebedeki bir değere gecikerek varıldığı anlaşılmaktadır. Çalışmamızdaki betonlarda (düşük su/çimento oranına sahip) suyun doldurduğu kılcal boşlukların çapları küçüktür. Muhtemelen bu boşluklara hapsolan su, jelin genleşmesine karşı koyarak belirtilen gecikmeye neden olmaktadır.

5.2 Özellikleri İfade Etmekte Kullanılan Gelişmiş Fonksiyonlar

5.2.1 D2 değişkeni ve Y parametresi

“D1” değişkeni ile birlikte, özellikleri ifade etmekte kulanacağımız ikinci bir değişken de, “D2” ile göstereceğimiz $\frac{p\alpha c + (1-\alpha)c}{[w - (p-1)\alpha c] + a}$ değişkeni olacaktır. D1 değişkeni, sertleşmiş betondaki çimento hamuru toplam boşluk hacmini ifade ederken, D2 ile ifade edilen değişken, jel hacmi ile henüz jele dönüşmemiş (hidrate olmamış) çimento hacmi toplamının toplam boşluk hacmine oranını ifade etmektedir. Özellikle dayanımların bu değişken ile daha iyi ifade edilebileceği düşünülmüştür. Bu değişkenin pay kısmında bulunan ve henüz çimento tanelerinin hidrate olmamış kısımlarının hacmini ifade eden $(1-\alpha)c$ teriminin birim ağırlık üzerindeki etkinliğinin, jel hacmine göre daha farklı olacağı düşünülerek bu terimin önüne bir Y parametresi konulmuştur. Bu durumda D2 değişkeni;

$$\frac{p\alpha c + Y(1-\alpha)c}{[w - (p-1)\alpha c] + a}$$

şeklini almıştır. D2 değişkenindeki bu parametrenin uygun değerinin belirlenebilmesine çalışılmıştır. Bunun için de Δ ile D1 değişkeni arasındaki ilişkilerden faydalanılarak bulunan ve oldukça güvenilir seviyelerde korelasyon katsayılarına sahip olan Tablo 5.1’deki “p” değerleri esas alınmıştır.

Tablo 5.1’deki “p” değerlerinin ortalaması 1.88 dir. Bu ortalama değer Δ ile D2 değişkeni arasındaki ilişki için de esas alınmış ve ortalama 1.88 değerini verecek Y parametresi araştırılmıştır. Yapılan hesaplar sonucunda Y parametresi 0.12 ve bu değere karşılık gelen D2 değişkeninden bulunan “p” değerlerinin ortalaması da 1.87 olarak bulunmuştur. Bu durumda D2 değişkeni;

$$\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{[w - (p-1)\alpha c] + a} \quad (5.2)$$

formunu almıştır. D2 değişkeninin bu formuna göre her deney yaşı için 20 adet beton karışımına ait birim ağırlıklardan faydalanılarak bulunan “p” değerleri ve (Δ-D2) bağıntılarının korelasyon katsayıları Tablo 5.2 de verilmektedir.

Tablo 5.2. Δ ile D2 Değişkeni arasındaki ilişkiden faydalanılarak bulunan “p” değerleri ve (Δ-D2) bağıntılarının korelasyon katsayıları.

Beton Yaşı (Gün)	p	Korelasyon Katsayısı (r)
7	1.96	0.832
14	1.63	0.887
28	1.96	0.842
365	1.94	0.920

Bu “p” değerlerinin ortalaması D1 değişkeni ile bulunanların ortalamasına uymakla birlikte, yaşa bağlı değişimleri farklıdır. İleride, birim ağırlığı belirlemede D2 değişkeninin D1’den daha az başarılı olduğu görülecektir. Bu durumda, buradaki “p” lerin yaşa bağlı değişimi tam göstermediğini düşünmek yerinde olacaktır.

Y ’nin 0.12’ den daha büyük ve daha küçük değerleri dikkate alındığında Δ ile D2 değişkeni arasındaki ($n_i^*=1$) ilişkiler de incelenmiş ve Y’ nin değişik değerlerine karşılık gelen “p” değerleri ve korelasyon katsayılarının nasıl değiştiğine bakılmıştır. Bu hesaplar sonucunda bulunan değerler Tablo 5.3’ de verilmiştir. Bu tablo incelendiğinde Δ ile D2 değişkeni arasındaki ilişkilerde Y parametresine 0.12’ den daha büyük veya daha küçük değerler verildiğinde, her deney yaşı için bulunan “p” değerlerinin ortalamalarını gözönüne alırsak; bu değerler Δ ile D1 değişkeni arasındaki ilişkiden elde ettiğimiz 1.88 değerinden uzaklaşmakta ve bunun yanında 0.12’den büyük değerler için korelasyon katsayıları da düşmektedir. Gerçi Y=0.06 için elde edilen korelasyon katsayıları biraz daha büyüktür, fakat aradaki farklar önemsizdir. Buna karşı Y=0.06 için elde edilen “p” değerleri (1.64) 1.88’den oldukça uzaktır. Bu durumda D2 değişkeninde kullanacağımız Y parametresinin en uygun değerinin 0.12 olacağı sonucuna varılmıştır.

Tablo 5.3. Δ ile D2 değişkeni arasındaki ilişkilerde Y' nin farklı değerleri için bulunan "p" ler ve bunlara ait korelasyon katsayıları

Beton Yaşı (gün)	Y=0.06		Y=0.12		Y=0.50		Y=1.00		Y=5.00	
	p	r	p	r	p	r	p	r	p	r
7	1.73	0.835	1.96	0.832	2.32	0.821	2.45	0.813	2.61	0.794
14	1.38	0.895	1.63	0.887	2.09	0.861	2.25	0.842	2.47	0.795
28	1.71	0.848	1.96	0.842	2.36	0.821	2.49	0.807	2.64	0.772
365	1.73	0.923	1.94	0.920	2.27	0.907	2.37	0.894	2.50	0.851
Ortalama	1.64	0.875	1.87	0.870	2.26	0.853	2.39	0.839	2.56	0.803

5.2.2 "Y" değerlerinin dayanımlar açısından irdelenmesi

D2 değişkeninde birim ağırlıklar esas alınarak bulunan Y=0.12 değeri acaba diğer özellikler için de uygun mu? Bunu anlayabilmek amacı ile D2 değişkeni ile küp ve silindir basınç dayanımları ile silindir yarma dayanımları arasındaki ilişki dikkate alınmış ve Y katsayısına 0.12' den daha büyük ve daha küçük değerler verilerek korelasyonların değişimleri incelenmiştir. D2 değişkeninde, Tablo 5.2' de verilen "p" değerleri kullanılarak n_i^* değiştirilmiş ve dayanımlar için maksimum korelasyon katsayısını veren n_i^* 'a karşılık gelen korelasyon katsayıları bulunmuştur. Y' nin değişik değerleri için bulunan maksimum korelasyon katsayıları küp basınç dayanımları, silindir basınç dayanımları ve yarma dayanımları için Tablo 5.4' de verilmektedir.

Bu tablo incelendiğinde, dayanımlar için Y' nin değişik değerlerine karşılık gelen maksimum korelasyon katsayılarının Y=0.12 için bulunan maksimum korelasyon katsayıları ile aynı ya da çok az farklı olduğu görülmektedir. Genel ortalamalara bakıldığında ise Y=0.06 ve Y=0.12 için en büyük korelasyon katsayıları elde edilmektedir. Dolayısıyla Δ ' lar ile D1 değişkeni arasındaki bağıntılara göre bulunan "p" değerleri dikkate alınarak hesaplanan Y=0.12 değerinin dayanımlar açısından da en iyi bir değer olduğu görülmüş ve bu katsayıyı bağıntılarda kullanmanın uygun olacağı kararına varılmıştır. Bununla birlikte, eğer duyarlılık derecelerinin bulunması amaçlanmıyorsa, dayanım formüllerini basitleştirmek için Y=0 alınabileceği de bulunan sonuçlardan anlaşılmaktadır.

Tablo 5.4. Küp ve silindir basınc dayanımları ve silindir yarma dayanımları dikkate alındığında Y' nin değişik değerleri için bulunan maksimum korelasyon katsayıları

Beton Yaşı (gün)	K�p Basınc Dayanımlarına Göre					
	Y					
	0.00	0.06	0.12	0.24	1.00	10
7	0.977	0.976	0.976	0.976	0.974	0.972
14	0.934	0.934	0.934	0.934	0.933	0.929
28	0.915	0.943	0.943	0.944	0.946	0.947
365	0.962	0.962	0.961	0.960	0.953	0.950
Ortalama	0.947	0.954	0.954	0.954	0.952	0.950
Beton Yaşı (gün)	Silindir Basınc Dayanımlarına Göre					
	Y					
	0.00	0.06	0.12	0.24	1.00	10
7	0.965	0.965	0.965	0.964	0.964	0.963
14	0.927	0.927	0.926	0.925	0.923	0.923
28	0.937	0.928	0.928	0.929	0.930	0.930
365	0.968	0.968	0.969	0.969	0.966	0.966
Ortalama	0.949	0.947	0.947	0.947	0.946	0.946
Beton Yaşı (gün)	Silindir Yarma Dayanımlarına Göre					
	Y					
	0.00	0.06	0.12	0.24	1.00	10
7	0.766	0.767	0.767	0.767	0.769	0.768
14	0.588	0.587	0.585	0.582	0.570	0.549
28	0.850	0.850	0.850	0.850	0.847	0.840
365	0.689	0.682	0.676	0.667	0.632	0.591
Ortalama	0.723	0.722	0.720	0.716	0.704	0.687
Genel Ortalama	0.873	0.874	0.874	0.872	0.867	0.861

5.2.3  zelikleri ifade etmekte kullanılan gelişmiş fonksiyonlar

Duyarlılık dereceleri paragraf 5.1.1 ve 5.2.1' de bahsedilen D1 ve D2 değişkenlerine betonun diğer bileşim özelikleri (agrega konsantrasyonu, agrega karışımı incelik modülü, vb. gibi) katılarak da saptanmıştır. Sonuç olarak betonun P_{hi} sertleşmiş beton özeliklerini ifade etmek için 6 farklı fonksiyon kullanılmıştır.  zelikleri ifade etmekte kullanılan bu fonksiyonlar Tablo 5.5'de verilmektedir. Bu tabloda F5 ve F6 fonksiyonlarındaki "m" değeri agrega karışımının incelik modülünü ifade etmektedir. Tabloda kullanılan değişkenleri,

$$\{c + w + a\} = x_1$$

$$\{n_i^* [w - (p - 1)\alpha c] + a\} = x_2$$

$$\left\{ \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*[w - (p-1)\alpha c] + a} \right\} = x_3 \quad \text{ve}$$

$$\{m\} = x_4$$

ile gösterirsek, özellikleri ifade etmekte kullandığımız fonksiyonların formları Tablo 5.6' da verilmektedir. Tablo 5.6' da verilen ifadeler, özellik ile kullanılan değişken arasındaki ilişkide maksimum korelasyon katsayısını verecek şekilde seçilmiştir.

Tablo 5.5. Özellikleri ifade etmekte kullanılan fonksiyonlar.

Fonksiyon Kodu	P _{hi} Özeliğini İfade Etmekte Kullanılan Fonksiyonlar
F1	$P_{hi} = f\{n_i[w - (p-1)\alpha c] + a\}$
F2	$P_{hi} = f\left\{\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i[w - (p-1)\alpha c] + a}\right\}$
F3	$P_{hi} = f\{(c + w + a) , n_i[w - (p-1)\alpha c] + a\}$
F4	$P_{hi} = f\left\{(c + w + a) , \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i[w - (p-1)\alpha c] + a}\right\}$
F5	$P_{hi} = f\{(c + w + a) , n_i[w - (p-1)\alpha c] + a , m\}$
F6	$P_{hi} = f\left\{(c + w + a) , \frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i[w - (p-1)\alpha c] + a} , m\right\}$

Tablo 5.6. Özellikleri ifade etmekte kullanılan fonksiyonların formları.

Özelik	P _{hi}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ	Ax_2+B	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
V_c	Ax_2+B	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
V_s	Ax_2+B	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
S	Ax_2+B	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
E	$A\ln x_2+B$	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
f_{cc}	$A\ln x_2+B$	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
f_{cs}	$A\ln x_2+B$	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
f_{css}	$A\ln x_2+B$	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
f_{csc}	$A\ln x_2+B$	$A\ln x_3+B$	Ax_1+Bx_2+C	$Ax_1+B\ln x_3+C$	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+B\ln x_3+Cx_4+D$
T_s	Ax_2+B	Ax_3+B	Ax_1+Bx_2+C	Ax_1+Bx_3+C	$Ax_1+Bx_2+Cx_4+D$	$Ax_1+Bx_3+Cx_4+D$

EkC, Tablo C1 - Tablo C24 arasında 6 fonksiyona ait 10 adet özellik için $n_i=n_i^*$ olması durumunda hesaplanan bağıntılar ve korelasyon katsayıları 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlar için ayrı ayrı verilmektedir. Ayrıca EkB, Tablo C25'de $n_i=n_i^*$ için

elde edilen maksimum korelasyon katsayıları toplu olarak gösterilmiştir. Bu tabloda koyu renk ile yazılan sayılar ve karşısındaki fonksiyon isimleri, her özellik için maksimum korelasyon katsayısının elde edildiği fonksiyonu göstermektedir. Bu fonksiyonlar Tablo 5.7, 5.18, 5.9 ve 5.10' da verilmiştir.

Özellikleri ifade etmekte kullanılan 6 değişik fonksiyondan elde edilen (SD1)_i'ler ve (SD2)_i'ler her deney yaşı için Ekler bölümü, EkC, Tablo C26, C27, C28, C29, C30 ve C31' de görülmektedir.

5.3 Özellikleri İfade Etmekte Kullanılan Fonksiyonların Karşılaştırılması

Ek C, Tablo C25 de 6 fonksiyona ve 10 adet özeliğe ait 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlar için elde edilen maksimum korelasyon katsayıları toplu olarak verilmiştir. Tablo C25' de, F1 ve F2 fonksiyonlarına ait korelasyon katsayıları karşılaştırıldığında, Δ , V_c , V_s , S ve E özelliklerinin F1 fonksiyonuyla, dayanımlarla ilgili özellikler olan f_{cc} , f_{cs} , f_{css} , $f_{c\phi s}$ ve T_s ' nin ise F2 fonksiyonuyla genellikle daha iyi ifade edildiği izlenmektedir. Tablo 5.5' den görülebileceği gibi, F1 fonksiyonu D1 değişkeninden, F2 fonksiyonu D2 değişkeninden türetilmiştir. Bu durumda dayanımlarla ilgili özellikleri belirlemede D2 değişkeninin, diğer özelliklerin belirlenmesinde ise D1 değişkeninin daha başarılı olduğu anlaşılmaktadır.

Yine Tablo 5.5' den görülebileceği gibi, F3 ve F4 fonksiyonlarının arasındaki tek fark, F3' de D1, F4' de ise D2 değişkeninin yer almasıdır. Aynı durum F5 ve F6 fonksiyonları için sözkonusudur. F5' de D1, F6'da D2 değişkeni bulunmaktadır. Tablo C25' de, F3 ve F4 fonksiyonlarına ait korelasyon katsayılarının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Aynı durum F5 ve F6 fonksiyonları için de sözkonusudur. Yani D1 ve D2 değişkenlerinin yanına başkalarının girmesi, bu değişkenlerin etkilerinin arasındaki farkı örtmektedir.

Her deney yaşı için maksimum korelasyon katsayılarını veren bağıntılar Tablo 5.7-Tablo 5.10 arasında görülmektedir. Tablolardaki korelasyon katsayılarının güvenilirliğini değerlendirebilmek için, her biri 20 deney noktasında bulunan bağıntılara ait bu katsayıları, 20 noktada %99 güvenlik derecesi için gerekli 0.561 korelasyon katsayısı limiti [67] ile mukayese etmek yeterli olacaktır. Bağıntılarda bulunan korelasyon katsayıları bu limitin çok üzerindedir.

Tablo 5.7. 7 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar

F	Bağıntı	n_i^*	p	(r)
F1	$\Delta = -3.10 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 2725$	1.00	1.80	0.9880
F6	$V_c = -0.0017(c + w + a) + 0.425 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.121m + 5.29$	1.20		0.9853
F3	$V_s = 0.001(c + w + a) - 0.005 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.004m + 6.09$	1.40		0.9838
F5	$V_s = -0.001(c + w + a) - 0.005 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 6.13$	1.41		
F5	$S = 0.039(c + w + a) - 0.097 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.44m + 43.9$	1.05		0.9446
F5	$E = 0.885(c + w + a) - 180.8 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 2522.4m + 81670$	1.39		0.9757
F4	$f_{cc} = 0.003(c + w + a) + 51.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 80.2$	1.67		0.9776
F6	$f_{cc} = 0.014(c + w + a) + 50.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.59m + 72.8$	1.55		
F3	$f_{cs} = 0.263(c + w + a) - 0.381 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 46.9$	1.69		0.9674
F5	$f_{cs} = 0.260(c + w + a) - 0.382 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 0.29m + 49.8$	1.70		
F6	$f_{css} = -0.077(c + w + a) + 52.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 5.25m + 190.2$	9.20		0.9423
F6	$f_{cs\phi} = -0.153(c + w + a) + 73.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 10.4m + 295.0$	10.5		0.9476
F6	$T_s = -0.0071(c + w + a) + 0.180 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 0.533m + 7.29$	0.07		0.8080

Tablo 5.8. 14 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar

F	Bağıntı	n_i^*	p	(r)
F5	$\Delta = 0.132(c + w + a) - 2.73 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 18.1m + 2548$	1.00	1.81	0.9965
F5	$V_c = 0.0001(c + w + a) - 0.0033 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.146m + 5.15$	1.38		0.9902
F5	$V_s = -0.001(c + w + a) - 0.0034 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.04m + 5.85$	1.59		0.9859
F6	$V_s = -0.0031(c + w + a) + 0.609 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.02m + 6.93$	4.22		
F5	$S = 0.035(c + w + a) - 0.104 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 1.42m + 68.8$	1.28		0.9391
F6	$E = -54.4(c + w + a) + 22480 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 449.9m + 75375$	3.16		0.9825
F5	$f_{cc} = 0.087(c + w + a) - 0.35 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 6.83m + 137.8$	1.84		0.9560
F5	$f_{cs} = 0.179(c + w + a) - 0.245 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.91m + 53.4$	1.94		0.9300
F5	$f_{css} = 0.092(c + w + a) - 0.244 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 6.51m + 106.5$	2.50		0.9181
F5	$f_{cs\phi} = 0.145(c + w + a) - 0.219 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] - 2.57m + 81.7$	2.64		0.9164
F5	$T_s = 0.011(c + w + a) - 0.008 \left[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a \right] + 0.865m - 2.51$	0		0.7408

Tablo 5.9. 28 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar

F	Bağıntı	n_i^*	p	(r)
F5	$\Delta = 0.135(c+w+a) - 2.91[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 11.9m - 2609$	1.00	1.75	0.9804
F5	$V_c = 0.001(c+w+a) - 0.0029[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.180m + 4.90$	2.17		0.9633
F5	$V_s = 0.001(c+w+a) - 0.0007[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.168m + 4.84$	8.92		0.9504
F5	$S = 0.01(c+w+a) - 0.100[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.814m + 66.4$	1.43		0.9434
F5	$E = -12.56(c+w+a) - 170.5[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 2670.3m + 93980$	1.74		0.9663
F5	$f_{cc} = 0.281(c+w+a) - 0.228[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 5.83m + 16.8$	2.59		0.9445
F5	$f_{cs} = 0.233(c+w+a) - 0.264[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 7.16m + 140.8$	4.58		0.9429
F6	$f_{css} = -0.412(c+w+a) + 153.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w-(p-1)\alpha c\}} \right] - 22.7m + 202.6$	∞		0.9015
F5	$f_{cs\phi} = 0.117(c+w+a) - 0.266[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 17.2m + 232.9$	5.31		0.9356
F6	$T_s = -0.019(c+w+a) + 4.74 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w-(p-1)\alpha c\}} \right] - 0.97m + 6.64$	∞		0.8670

Tablo 5.10. 365 günlük betonlarda özellikleri ifade etmede maksimum korelasyonları veren fonksiyonlar

F	Bağıntı	n_i^*	p	(r)
F5	$\Delta = 0.572(c+w+a) - 2.05[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 63.7m + 2040$	1.00	2.14	0.9795
F5	$V_c = 0.0005(c+w+a) - 0.0047[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.138m + 5.29$	2.57		0.9964
F5	$V_s = 0.002(c+w+a) - 0.0045[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.06m + 5.68$	2.76		0.9903
F5	$S = 0.023(c+w+a) - 0.058[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 1.06m + 53.5$	3.90		0.9600
F1	$E = 24610 \ln[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 174465$	3.41		0.9730
F5	$f_{cc} = 0.323(c+w+a) - 0.234[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 12.7m - 20.4$	4.79		0.9660
F5	$f_{cs} = 0.391(c+w+a) - 0.305[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 9.86m - 15.3$	5.07		0.9761
F5	$f_{css} = 0.344(c+w+a) - 0.342[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 7.30m - 18.8$	3.77		0.9611
F5	$f_{cs\phi} = 0.419(c+w+a) - 0.245[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 14.5m - 60.9$	5.18		0.9664
F5	$T_s = 0.004(c+w+a) - 0.005[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.173m + 5.95$	11.2		0.6874

5.4 1. Tip (SD1)_i ve 2. Tip (SD2)_i Duyarlılık Derecelerinin Karşılaştırılması

EkB, Tablo C26-Tablo C31' de 6 fonksiyona ait, 1. ve 2. tip duyarlılık dereceleri görülmektedir. Bu tablolar incelendiğinde herhangi bir sertleşmiş beton özeliği için bulunan (SD1)_i değerlerinin, kullanılan fonksiyona göre her deney yaşı için birbirinden çok farklı görülmekle birlikte, tüm fonksiyonlarda (SD1)_i değerleri genel olarak yaşın artması ile birlikte artmakta ve hatta F1, F2, F4 ve F6 fonksiyonlarına ait 1. tip duyarlılık derecelerinin verildiği Tablo C26, C27, C29 ve C31 incelendiğinde, özellikle 28 ve 365 günlük numunelerde, dayanımlara ait (SD1)_i değerlerinin ∞ çıktığı görülmektedir. Bunun anlamı, kılcal boşluk hacminin $[w-(p-1)\alpha c]$ ' nin yanında, hapsolmuş hava boşluğu hacminin (a) betonun o özeliğini etkilemede ihmal edilebilir bir etkiye sahip olmasıdır. Nitekim böyle durumlarda en büyük korelasyon (a)' yı hiç gözönüne almadan, yani $[w-(p-1)\alpha c]+a$ yerine, $w-(p-1)\alpha c$ kullanılarak elde edilmektedir.

(SD2)_i olarak belirtilen 2. tip duyarlılık derecesinin, duyarlılığı dikkate almakla, herhangi bir özeliğe ait korelasyon katsayısının ne oranda yükseldiğini gösteren bir büyüklük olduğunu daha önceki bölümlerde söylemiştik. Dolayısıyla herhangi bir beton özeliği için (SD2)_i değerinin, (SD2)_i>1 olmak üzere, 1 değerinden uzaklaşması, o beton özeliği için duyarlılığı gözönüne almanın yararının büyük olduğu anlamına gelecektir. Tablo C26-C31 incelendiğinde (SD2)_i değerlerindeki dağılımların, (SD1)_i değerlerindeki dağılımlara göre çok az olduğu görülebilmektedir. Gerek (SD1)_i, gerekse (SD2)_i lerin incelenmesinden, dayanımlarla ilgili özelliklerin, diğer özelliklere göre çimento hamuru boşluk yapısına belirgin olarak daha duyarlı olduğu görülmektedir. Özellikle dayanımlar için duyarlılık dereceleri, deney yaşının artması ile birlikte belirgin bir şekilde artmaktadır. Dayanımları daha iyi ifade eden F2 formülündeki, silindir basınç dayanımlarına ait (SD2)_i değerlerini örnek vermek gerekirse, 7. günde bu değer 1.11, 14. günde 1.28, 28. günde 1.42 ve 365. günde ise 1.75 olarak bulunduğu Tablo C27' de görülebilir. Benzer şekilde F1 fonksiyonunda da özellikle dayanımları ifade eden bağıntıların, (SD2)_i 2. tip duyarlılık dereceleri, numune yaşının artması ile birlikte artmaktadır. Buna karşı, F1 ve F2 fonksiyonlarında (SD2)_i değerlerinde görülen bu artış, diğer fonksiyonlar için aynı durumda değildir. F3, F4, F5 ve F6 fonksiyonlarında tüm özellikler için bulunan (SD2)_i değerleri 1 değerine oldukça yakın olup, belirgin bir

artış veya azalma görülmemektedir. Bunun nedeni olarak ise F3, F4, F5 ve F6 fonksiyonlarının, F1 ve F2 fonksiyonlarına göre daha fazla değişken içermelerini söyleyebiliriz. Bu yeni değişkenlerin etkileri duyarlılığın etkisini örtmektedir.

5.5 Beton Özellikleri Arasındaki Korelasyonları Belirleyen Nedenler

Çalışmanın bu bölümünde beton özellikleri arasındaki korelasyonların kuvvetli ya da zayıf olmasını belirleyen nedenler araştırılmıştır. Aralarındaki korelasyonların kuvvetli olduğu özellikler arasında bazı yakınlıkların olması gerektiği düşünülerek bu yakınlıkların neler olduğu araştırılmıştır [8].

5.5.1 Özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Bu çalışmada sonuçları Bölüm 4, paragraf 4.2’ de verilen 4 farklı deney yaşı için elde edilmiş 10 adet sertleşmiş beton özeliği ikişer ikişer eşlenerek 45 adet bağıntı kurulmuştur.

$$P_{hi} = f\{P_{hj}\} \quad (5.3)$$

P_{hi} ve P_{hj} özellikleri arasındaki bağıntılar belirlenirken bu iki özellik arasında maksimum korelasyon katsayısını veren fonksiyonlar seçilmiştir. Özellik çiftleri arasındaki bağıntılar ve bunlara ait korelasyon katsayıları (r_{ij}) EkC, Tablo C32, C33, C34 ve C35’ de sırası ile 7, 14, 28 ve 365 günlük numuneler için ayrı ayrı verilmektedir.

5.5.2 Çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılık bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi

5.5.2.1 Duyarlılık yakınlığı oranı

Herhangibir P_{hi} sertleşmiş beton özeliğinin çimento hamuru boşluk yapısına 1. Tip duyarlılık derecesini $(SD1)_i$ ve 2. Tip duyarlılık derecesini $(SD2)_i$ tanımlamıştık. $(SD)_i$ 1. Tip veya 2. Tip duyarlılık derecesini ifade eden daha genel bir sembol olsun. Buna göre $t_{ij} \leq 1$ olmak üzere,

$$t_{ij} = \frac{(SD)_i}{(SD)_j} \quad (5.4)$$

ile tanımlayacağımız ve herhangi iki özellik arasındaki duyarlılık derecelerinin yakınlılığını ifade eden t_{ij} değerine “Duyarlılık Yakınlığı Oranı” diyeceğiz. Sıfır ile bir arasında değerler alan t_{ij} ’nin 1 civarında olması P_{hi} ve P_{hj} özelliklerinin çimento hamuru boşluk yapısına duyarlılık bakımından birbirine yakın olduğu ve 0 civarında olması ise duyarlılık bakımından yakın olmadıkları anlamına gelecektir.

Beton özelliklerinin iç yapı etkenlerine bağlılığı 4 deney yaşı için paragraf 5.2’ de 6 değişik fonksiyona göre incelenmişti. Bu 6 fonksiyondan elde edilen 1. Tip ve 2. Tip duyarlılık dereceleri değerleri kullanılarak her bir özellik çifti için t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları elde edilmiştir. $(SD1)_i$ ’lerden elde edilen yakınlık oranları EkC Tablo C36, C37, C38 ve C39’ da ve $(SD2)_i$ ’lerden elde edilen yakınlık oranları EkC Tablo C40, C41, C42 ve C43’ de sırası ile 7, 14, 28 ve 365 günlük numuneler için verilmektedir.

5.5.2.2 Duyarlılık bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara Etkisi

Beton özelliklerinin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkların birbirine yakın olması, bunlar arasındaki korelasyonların kuvvetli olmasında bir etkiye sahipse, özellikler arasındaki bağıntılara ait r_{ij} korelasyon katsayıları ile t_{ij} yakınlık oranları arasındaki ilişkilerin de kuvvetli olması gerekmektedir. Bu düşünceden yola çıkarak EkC, Tablo C32, C33, C34 ve C35’ de verilen r_{ij} ’ ler ile $(SD1)_i$ ’lerden bulunan t_{ij} ’ ler (EkC, Tablo C36, C37, C38 ve C39) ve $(SD2)_i$ ’lerden bulunan t_{ij} ’ ler (EkC, Tablo C40, C41, C42 ve C43) arasındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları incelenmiştir.

$(SD1)_i$ ’lerden bulunan t_{ij} ’ ler ile r_{ij} ’ ler arasındaki bağıntılar Tablo 5.11’ de ve $(SD2)_i$ ’lerden bulunan t_{ij} ’ ler ile r_{ij} ’ ler arasındaki bağıntılar da Tablo 5.12’ de verilmektedir.

Tablo 5.11 ve 5.12’ de her bir deney yaşı için elde edilen en büyük korelasyon katsayıları, hangi fonksiyondan ve hangi duyarlılık derecesinden elde edildiklerini de belirterek, Tablo 5.13’ de gösterilmiştir.

Tablo 5.11. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (SD1)_i' lere göre 6 değişik fonksiyon için bulunan t_{ij} değerleri ile r_{ij} ' ler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Fonksiyon (F)	Bağıntı	Korelasyon Katsayıları (r)
	7 Günlük Betonlar	
F1	$t_{ij}=0.8715r_{ij}-0.3512$	0.6625
F2	$t_{ij}=0.5619r_{ij}-0.2128$	0.6109
F3	$t_{ij}=0.6735r_{ij}-0.1602$	0.5245
F4	$t_{ij}=0.6602r_{ij}-0.0195$	0.5336
F5	$t_{ij}=0.6690r_{ij}-0.0738$	0.5386
F6	$t_{ij}=0.5834r_{ij}-0.0430$	0.5394
(F)	14 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=0.8467r_{ij}-0.2662$	0.6195
F2	$t_{ij}=0.6852r_{ij}-0.2053$	0.5951
F3	$t_{ij}=-0.0776r_{ij}-0.7012$	0.0949
F4	$t_{ij}=0.0267r_{ij}-0.2862$	0.0245
F5	$t_{ij}=0.5517r_{ij}-0.1888$	0.3878
F6	$t_{ij}=0.5352r_{ij}-0.0442$	0.4027
(F)	28 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=1.6266r_{ij}-0.6706$	0.8738
F2	$t_{ij}=0.8452r_{ij}-0.3420$	0.5664
F3	$t_{ij}=0.4076r_{ij}-0.1523$	0.4134
F4	$t_{ij}=0.3305r_{ij}-0.0896$	0.1918
F5	$t_{ij}=0.3158r_{ij}-0.2714$	0.3467
F6	$t_{ij}=0.3697r_{ij}-0.0745$	0.2107
(F)	365 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=1.3084r_{ij}-0.6024$	0.6666
F2	$t_{ij}=1.1008r_{ij}-0.5396$	0.8143
F3	$t_{ij}=0.7795r_{ij}-0.0165$	0.6008
F4	$t_{ij}=0.9265r_{ij}-0.2982$	0.6524
F5	$t_{ij}=0.7423r_{ij}-0.0393$	0.6387
F6	$t_{ij}=0.5848r_{ij}-0.1469$	0.4345

Tablo 5.12. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (SD2)_i' lere göre 6 değişik fonksiyon için bulunan t_{ij} değerleri ile r_{ij} ' ler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları

Fonksiyon (F)	Bağıntı	Korelasyon Katsayıları (r)
	7 Günlük Betonlar	
F1	$t_{ij}=0.2921r_{ij}-0.6224$	0.5409
F2	$t_{ij}=0.0998r_{ij}-0.8164$	0.3302
F3	$t_{ij}=0.0408r_{ij}-0.9565$	0.4787
F4	$t_{ij}=0.0609r_{ij}-0.9356$	0.4817
F5	$t_{ij}=0.0445r_{ij}-0.9541$	0.4672
F6	$t_{ij}=0.0576r_{ij}-0.9384$	0.4706
(F)	14 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=0.5576r_{ij}-0.3879$	0.6586
F2	$t_{ij}=0.1851r_{ij}-0.7406$	0.4080
F3	$t_{ij}=0.0133r_{ij}-0.9703$	0.1849
F4	$t_{ij}=0.0526r_{ij}-0.9166$	0.2604
F5	$t_{ij}=0.0238r_{ij}-0.9735$	0.6142
F6	$t_{ij}=0.0509r_{ij}-0.9439$	0.7357
(F)	28 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=0.7282r_{ij}-0.2239$	0.8404
F2	$t_{ij}=0.3227r_{ij}-0.6260$	0.7605
F3	$t_{ij}=0.0411r_{ij}-0.9379$	0.4260
F4	$t_{ij}=0.0394r_{ij}-0.9347$	0.3674
F5	$t_{ij}=0.0651r_{ij}-0.9209$	0.5708
F6	$t_{ij}=0.0846r_{ij}-0.8996$	0.6164
(F)	365 Günlük Betonlar	(r)
F1	$t_{ij}=0.9652r_{ij}-0.0547$	0.9397
F2	$t_{ij}=0.8227r_{ij}-0.1292$	0.9327
F3	$t_{ij}=0.0456r_{ij}-0.9412$	0.5108
F4	$t_{ij}=0.1035r_{ij}-0.8833$	0.6631
F5	$t_{ij}=0.0297r_{ij}-0.9648$	0.4829
F6	$t_{ij}=-0.0032r_{ij}-0.9942$	0.0922

Tablo 5.13' ün incelenmesiyle şu sonuçlara varılabilir:

- i. Bu korelasyon katsayıları 45 adet değer çifti için hesaplanmıştır. Bu adetteki değer çifti için kritik korelasyon katsayıları, %95 güvenilirlik derecesi için 0.296 ve %99 güvenilirlik derecesi için de 0.383 dür. Tablodaki katsayılar bu son değerlerin de çok üstündedir. Öyleyse özellikler arasındaki korelasyon katsayıları ile, bu özelliklerin duyarlılık yakınlığı arasındaki güvenilir bir ilgi vardır. Çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılıkları birbirine yakın olan özellikler arasında kuvvetli korelasyonlar mevcuttur (ve tersi).
- ii. En büyük ($t_{ij}-r_{ij}$) korelasyonları, bazı yaşlar için SD1' lerden, bazı yaşlar için ise SD2' lerden elde edilmiştir.

Tablo 5.13. Her deney yaşı için ($t_{ij}-r_{ij}$) bağıntılarına ait en büyük korelasyon katsayıları

Beton Yaşı	($t_{ij}-r_{ij}$) Bağıntılarının En Büyük Korelasyon Katsayıları		
	Elde Edildiği Fonksiyon	Elde Edildiği Duyarlılık Derecesi	Korelasyon Katsayısı
7 Gün	F1	SD1	0.6625
14 Gün	F6	SD2	0.7357
28 Gün	F1	SD1	0.8738
1 Yıl	F1	SD2	0.9397
Ortalama:			0.803

- iii. En büyük ($t_{ij}-r_{ij}$) korelasyonları, genellikle F1 fonksiyonundan elde edilmiştir. Bu korelasyon yalnız 14. günde F6 fonksiyonundan elde edilmiş olup, korelasyon katsayısı 0.7357 dir. Ancak bu yaşta da F1 fonksiyonundan elde edilen korelasyon katsayısı 0.6586 olup, bu yaş için az bir farkla ikinci sırada gelmektedir.
- iv. Betonun yaşı arttıkça, duyarlılık yakınlığı ile özellikler arasındaki korelasyonların gücü atasındaki ilgi giderek daha belirgin hale gelmektedir. Bu husus Tablo 5.13' ün son sütununa yukarıdan aşağıya doğru bakmakla kolayca görülebilir.

5.5.3 Bileşim faktörlerinin değişiminden etkilenme bakımından yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlara etkisi

Paragraf 5.5.2' de beton özelliklerinin çimento hamuru boşluk yapısına duyarlılık bakımından yakınlıkları ile bu özellikler arasındaki bağıntılara ait korelasyon katsayıları arasındaki ilişkiler incelenmişti. Bu paragrafta özellikler arasındaki korelasyon katsayıları (r_{ij}) ile özelliklerin başka açılardan yakınlıkları arasındaki bağıntılar incelenecektir. Bunu yapabilmek için de özelliklerin bu çalışmada gözönüne alınan bileşim faktörlerindeki değişimlerden etkilenme dereceleri gözönüne alınmış ve bu etkilenme derecelerindeki yakınlık ile özelliklere ait korelasyonların arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Bahsedilen bu inceleme yapılırken en çok değişken içeren F5 ve F6 fonksiyonları kullanılmış ve aşağıda anlatılan yöntem uygulanmıştır.

F5 ve F6 fonksiyonunu sırası ile,

$$(P_{hi})' = f\left\{(c+w+a)', \left(n_i^*[w-(p-1)\alpha c]+a\right)', (m)'\right\} \quad (5.5)$$

$$(P_{hi})' = f\left\{(c+w+a)', \left(\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^*[w-(p-1)\alpha c]+a}\right)', (m)'\right\} \quad (5.6)$$

şekline getirelim. Burada parantez içerisinde (') ile ifade edilen değişkenler, parantez içindeki değişkenin, o değişkenin seri içerisindeki ortalamasına oranını gösterebilir. Bu durumda her iki fonksiyon için de elde edilen bağıntılardaki değişkenlerin önündeki katsayılar, gözönüne alınan P_{hi} özeliğinin bu değişkenlerin değişiminden ne derecede etkilendiğini ifade edecektir. P_{hi} beton özeliği ile değişkenler arasındaki ifadeler Tablo 5.6' da verilen şekilde kullanılmıştır. Yani yukarıdaki ifadeler (F5)' fonksiyonu için,

$$(P_{hi})' = A(x_1)' + B(x_2)' + C(x_4)' + D \quad (5.7)$$

(F6)' fonksiyonu için,

$$(P_{hi})' = A(x_1)' + B \ln(x_3)' + C(x_4)' + D \quad (5.8)$$

$$(T_s)' = A(x_1)' + B(x_3)' + C(x_4)' + D \quad (\text{Yalnız yarma-çekme dayanımları için}) \quad (5.9)$$

şekillerinde olacaktır. Çalışmadaki beton karışımlarından elde edilen sonuçlar kullanılarak yukarıdaki bağıntılar herbir özellik için hesaplanmış ve (F5)' fonksiyonu kullanıldığında elde edilen A, B, C ve D katsayıları EkC, Tablo C44' de ve (F6)' fonksiyonu kullanıldığında elde edilen A, B, C ve D katsayıları EkC, Tablo C45' de verilmiştir.

Bu tablolarda değerleri verilen A, B ve C katsayılarına gözönüne alınan doğrusal bağıntıların eğimleri olarak bakılabilir. Herhangi iki özellikte bu eğimlerin ne derecede birbirine yakın olduğunu anlamak için bunların farklarının mutlak değerlerinin hesaplanmasının uygun olacağı düşünülmüş ve böylece herhangi iki farklı i ve j özeliği için,

$$T(A)_{ij} = |A_i - A_j| \quad (5.10)$$

$$T(B)_{ij} = |B_i - B_j| \quad (5.11)$$

$$T(C)_{ij} = |C_i - C_j| \quad (5.12)$$

değerleri hesaplanmıştır. Bu durumda T değerleri ne kadar büyük ise i ve j özellikleri için gözönüne alınan A, B veya C katsayıları da okadar farklı olacaktır. Bu durumda i ve j özelliklerinin ilgili bileşim faktöründeki değişimlerden o derecede farklı etkilendiği veya tam tersine T değerleri küçük ise i ve j özelliklerinin ilgili bileşim faktöründeki değişimlerden birbirine yakın derecede etkilendiği anlaşılabacaktır. Her özellik çifti için elde edilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri (F5)' fonksiyonu için EkC, Tablo C46 ve (F6)' fonksiyonu için EkC, Tablo C47' de verilmektedir.

Bu tablolarda verilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile EkC, Tablo C32, C33, C34 ve C35'de verilen r_{ij} değerleri arasındaki bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları incelenmiştir.

$$T(A)_{ij} - r_{ij} \quad (5.13)$$

$$T(B)_{ij} - r_{ij} \quad (5.14)$$

$$T(C)_{ij} - r_{ij} \quad (5.15)$$

bağıntıları ve bunların korelasyon katsayıları ise Tablo 5.14 ve 5.15'de verilmektedir.

Tablo 5.14. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F5)' fonksiyonundan elde edilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile $(r_{ij})'$ ler arasındaki bağıntılar

Değişkenler	Bağıntılar	Korelasyon Katsayısı
	7 Günlük Numuneler	
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.382r_{ij} + 1.699$	0.5808
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -1.087r_{ij} + 1.320$	0.6547
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = 0.044 r_{ij} + 0.165$	0.0781
	14 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.179r_{ij} + 1.301$	0.7729
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -1.031r_{ij} + 1.234$	0.6315
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.248r_{ij} + 0.490$	0.1985
	28 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.108r_{ij} + 1.329$	0.5962
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -0.768r_{ij} + 1.873$	0.1828
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.427r_{ij} + 0.699$	0.3491
	365 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.353r_{ij} + 1.896$	0.4066
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -0.427r_{ij} + 0.739$	0.3153
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.236r_{ij} + 0.466$	0.2563

Tablo 5.15. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F6)' fonksiyonundan elde edilen $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile $(r_{ij})'$ ler arasındaki bağıntılar

Değişkenler	Bağıntılar	Korelasyon Katsayısı
	7 Günlük Numuneler	
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = 0.1641 r_{ij} + 0.355$	0.1249
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -1.784 r_{ij} + 2.249$	0.5125
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = 0.876 r_{ij} + 0.270$	0.1794
	14 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -0.164 r_{ij} + 0.592$	0.1054
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -3.271 r_{ij} + 3.555$	0.6270
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.329 r_{ij} + 0.562$	0.2858
	28 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.896 r_{ij} + 2.594$	0.4762
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = -42.752 r_{ij} + 46.57$	0.6488
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.584 r_{ij} + 1.320$	0.1794
	365 Günlük Numuneler	r
$T(A)_{ij} - r_{ij}$	$T(A)_{ij} = -1.489 r_{ij} + 1.864$	0.6006
$T(B)_{ij} - r_{ij}$	$T(B)_{ij} = 0.973 r_{ij} + 1.684$	0.0583
$T(C)_{ij} - r_{ij}$	$T(C)_{ij} = -0.635 r_{ij} + 0.797$	0.5814

Tablo 5.14 ve 5.15’ de verilen bağıntılara ait en büyük korelasyon katsayıları ve bunların hangi fonksiyonlardan elde edildiği Tablo 5.16’ da gösterilmiştir.

Tablo 5.16. Her beton yaşı için $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri ile $(r_{ij})'$ ler arasındaki bağıntılara ait en büyük korelasyon katsayıları ve elde edildikleri fonksiyonlar.

Beton Yaşı	En büyük Korelasyon Katsayıları					
	$T(A)_{ij}-r_{ij}$	Fonksiyon	$T(B)_{ij}-r_{ij}$	Fonksiyon	$T(C)_{ij}-r_{ij}$	Fonksiyon
7 Gün	0.5808	(F5)'	0.6547	(F5)'	0.1794	(F6)'
14 Gün	0.7729	(F5)'	0.6315	(F5)'	0.2858	(F6)'
28 Gün	0.5962	(F5)'	0.6488	(F6)'	0.3491	(F5)'
1 Yıl	0.6006	(F6)'	0.3153	(F5)'	0.5814	(F6)'
Ortalama:	0.638		0.563		0.349	

Tablo 5.16’ nın incelenmesinden şu sonuçlar çıkarılabilir:

- Özelikler arasındaki korelasyonlara bileşim faktörlerinden etkilenme yakınlığının etkisini gösterme bakımından (F5)' veya (F6)' fonksiyonlarının birbirine belirgin bir üstünlüğü yoktur. En büyük korelasyon katsayılarından bazıları (F5)', bazıları (F6)' fonksiyonu kullanılarak elde edilmiştir.
- Tablodaki ortalamalar incelendiğinde, bileşim etkenlerinden etkilenmedeki yakınlığın korelasyonları belirlemede $T(A)$ ve $T(B)$ ' lerin arasında büyük bir fark bulunmadığı, buna karşı, $T(C)$ ' lerin bu konuda bunlardan daha az önem taşıdığı görülmektedir. Yani özellikler arasındaki korelasyonların belirlenmesinde, çimento hamuru miktarından ve çimento hamurunun boşluk yapısından etkilenmedeki yakınlıklar, agrega granülometrisinden etkilenmedeki yakınlığın önüne geçmektedir.
- Paragraf 5.5.2.2' de, duyarlılık yakınlığı oranları (t_{ij}) ile özellikler arasındaki korelasyon katsayıları (r_{ij}) arasındaki bağıntıların korelasyon katsayılarının ortalaması 0.803 olarak bulunmuştu. Bu tablodaki ortalamaların hiçbirisi bu düzeye ulaşmamaktadır. Yani tek tek ele alındıklarında, bileşim etkenlerinin hiçbirinden etkilenmedeki yakınlık, duyarlılıkların yakınlığı kadar özellikler arasındaki korelasyonları etkilememektedir.

- iv. $T(A)_{ij}-r_{ij}$ ve $T(B)_{ij}-r_{ij}$ 'lerin ortalama korelasyon katsayısı %99, $T(C)_{ij}-r_{ij}$ 'lerin ortalama korelasyon katsayısı ise %95 güvenlik derecesinin üzerindedir.

Bileşim faktörlerinin değişimlerinden etkilenme yakınlıklarının birarada gözönüne alınması durumunda özellikler arasındaki korelasyonları belirleyen nedenlerin ne ölçüde aydınlanabileceğini görebilmek amacı ile özellikler arasındaki korelasyon katsayıları (r_{ij}) ile $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri arasındaki çok değişkenli bağıntılar incelenmiştir. Bu bağıntılar ve bunların korelasyon katsayıları Tablo 5.17' de verilmektedir. Bu tablo incelendiğinde, tüm deney yaşları için, (F5)' ve (F6)' fonksiyonlarına göre bulunan bağıntıların korelasyon katsayıları %99 güvenlik derecesi için gerekli olan limitin üzerindedir. Her iki fonksiyonu birbiri ile mukayese etmek gerekirse, 7 ve 14 günlük numunelerde (F5)', 28 ve 365 günlük numunelerde ise (F6)' fonksiyonunun daha başarılı olduğu görülmüştür.

Tablo 5.17. (F5)' ve (F6)' fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (r_{ij})' ler ile $T[A,B,C]_{ij}$ ' ler arasındaki bağıntılar

Beton Yaşı (Gün)	$r_{ij} - [T(A)_{ij}, T(B)_{ij}, T(C)_{ij}]$	Korelasyon Katsayısı
	(F5)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = -0.109T(A)_{ij} - 0.314 T(B)_{ij} + 0.305T(C)_{ij} + 0.883$	0.7111
14	$r_{ij} = -0.435T(A)_{ij} - 0.302 T(B)_{ij} + 0.035T(C)_{ij} + 1.047$	0.9030
28	$r_{ij} = -0.304T(A)_{ij} + 0.008T(B)_{ij} - 0.228T(C)_{ij} + 0.917$	0.6541
365	$r_{ij} = -0.115T(A)_{ij} - 0.113 T(B)_{ij} + 0.063T(C)_{ij} + 0.848$	0.4352
	(F6)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = 0.302T(A)_{ij} - 0.183 T(B)_{ij} - 0.025T(C)_{ij} + 0.746$	0.5946
14	$r_{ij} = 0.301T(A)_{ij} - 0.105 T(B)_{ij} - 0.463T(C)_{ij} + 0.830$	0.6691
28	$r_{ij} = 0.024T(A)_{ij} - 0.013T(B)_{ij} + 0.071T(C)_{ij} + 0.791$	0.6840
365	$r_{ij} = -0.072T(A)_{ij} + 0.012T(B)_{ij} - 0.426T(C)_{ij} + 0.887$	0.6237

Tablo 5.17' deki korelasyon katsayılarının en büyükleri ile, Paragraf 5.5.2.2' de verilmiş olan ($t_{ij}-r_{ij}$) bağıntılarının en büyük korelasyon katsayıları Tablo 5.18' de biraraya getirilmiştir.

Tablo 5.18. r_{ij} -[$T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$, $T(C)_{ij}$] bağıntıları ile $(t_{ij}-r_{ij})$ bağıntılarının en büyük korelasyon katsayıları.

Beton Yaşı	r_{ij} -[$T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$, $T(C)_{ij}$] Bağıntılarının En Büyük Korelasyon Katsayıları	$(t_{ij}-r_{ij})$ Bağıntılarının En Büyük Korelasyon Katsayıları
7 Gün	0.7111	0.6625
14 Gün	0.9030	0.7357
28 Gün	0.6840	0.8738
1 Yıl	0.6237	0.9397

Tablo 5.18’ de 7 ve 14. günler için sol taraftaki, 28. gün ve 1 yıl için sağ taraftaki korelasyon katsayıları daha yüksektir. Yani özellikler arasındaki korelasyonları belirlemede 7. ve 14. günlerde bileşim etkenlerinden (tümünü bir arada gözönüne almak şartıyla) etkilenmedeki yakınlık birinci derecede önemliyken, 28. günden itibaren duyarlılıkların yakınlılığı korelasyonların belirlenmesinde öne çıkmaktadır.

Bu bölümde son olarak hem duyarlılık bakımından yakınlıklar (t_{ij}) , hem de bileşim faktörlerinden etkilenme bakımından yakınlıklar birarada gözönüne alınarak özellikler arasındaki korelasyonların aydınlatılmasında ne ölçüde başarılı olunabileceğini görebilmek amacı ile (r_{ij}) ’ ler (t_{ij}) ve $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$, $T(C)_{ij}$ lere lineer katlı regresyon hesabı ile bağlanmışlardır. (t_{ij}) ’ ler hesaba katılırken F5 ve F6 fonksiyonlarından elde edilen $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ duyarlılık katsayılarından bulunan (t_{ij}) değerleri ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Bu durumda elde edilen bağıntılar Tablo 5.19 ve 5.20’ de verilmektedir.

Bu tablolar incelendiğinde, tüm deney yaşları için (F5)’ ve (F6)’ fonksiyonlarına göre bulunan bağıntıların korelasyon katsayılarının, %99 güvenlik derecesinin çok üzerinde olduğu görülmektedir. Gerek $(SD1)_i$ ler ve gerekse $(SD2)_i$ ler dikkate alınarak yapılan hesaplar sonucunda bulunan bağıntılarda, tüm deney yaşları için (F5)’ fonksiyonunun daha yüksek korelasyon katsayıları verdiği görülmektedir. Sonuç olarak, beton özelliklerinin, hem çimento hamuru boşluk yapısına duyarlılık, hem de bileşim faktörlerinden etkilenme bakımından benzeşimlerinin bir arada göz önünde tutulması, bu özellikler arasındaki korelasyonların kuvvetli ya da zayıf olmasını çok güvenilir derecede açıklamaktadır.

Tablo 5.19. (F5)' ve (F6)' fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 fñnlük betonlarda $(r_{ij})'$ ler ile $(SD1)_i$ ler dikkate alınarak bulunan $(t_{ij})'$ ler ve $T[A,B,C]_{ij}'$ ler arasındaki bağıntılar

Beton Yaşı (Gün)	$r_{ij} - [T(A)_{ij}, T(B)_{ij}, T(C)_{ij}, t_{ij}^{SD1}]$	Korelasyon Katsayısı
	(F5)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = -0.149T(A)_{ij} - 0.280T(B)_{ij} + 0.244T(C)_{ij} + 5.311t_{ij} - 4.322$	0.8647
14	$r_{ij} = -0.385T(A)_{ij} - 0.323T(B)_{ij} + 0.187T(C)_{ij} + 0.169t_{ij} - 0.889$	0.9128
28	$r_{ij} = -0.282T(A)_{ij} - 0.007T(B)_{ij} - 0.223T(C)_{ij} + 0.343t_{ij} - 0.759$	0.7219
365	$r_{ij} = -0.112T(A)_{ij} - 0.123T(B)_{ij} + 0.124T(C)_{ij} + 0.535t_{ij} - 0.528$	0.7564
	(F6)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = 0.298T(A)_{ij} - 0.127T(B)_{ij} - 0.033T(C)_{ij} + 0.317t_{ij} - 0.585$	0.6576
14	$r_{ij} = 0.295T(A)_{ij} - 0.129T(B)_{ij} - 0.428T(C)_{ij} + 0.112t_{ij} - 0.899$	0.6751
28	$r_{ij} = 0.028T(A)_{ij} - 0.014T(B)_{ij} + 0.087T(C)_{ij} - 0.066t_{ij} - 0.813$	0.6911
365	$r_{ij} = -0.249T(A)_{ij} + 0.021T(B)_{ij} + 0.098T(C)_{ij} + 0.112t_{ij} - 0.365$	0.7361

Tablo 5.20. (F5)' ve (F6)' fonksiyonlarına göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda $(r_{ij})'$ ler ile $(SD2)_i$ ler dikkate alınarak bulunan $(t_{ij})'$ ler ve $T[A,B,C]_{ij}'$ ler arasındaki bağıntılar

Beton Yaşı (Gün)	$r_{ij} - [T(A)_{ij}, T(B)_{ij}, T(C)_{ij}, t_{ij}^{SD2}]$	Korelasyon Katsayısı
	(F5)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = -0.161T(A)_{ij} - 0.216T(B)_{ij} + 0.346T(C)_{ij} + 0.411t_{ij} - 0.642$	0.8694
14	$r_{ij} = -0.417T(A)_{ij} - 0.254T(B)_{ij} + 0.029T(C)_{ij} + 3.205t_{ij} - 2.158$	0.9075
28	$r_{ij} = -0.288T(A)_{ij} + 0.026T(B)_{ij} - 0.028T(C)_{ij} + 4.375t_{ij} - 3.415$	0.7714
365	$r_{ij} = -0.279T(A)_{ij} - 0.059T(B)_{ij} + 0.638T(C)_{ij} + 11.81t_{ij} - 1084$	0.7765
	(F6)' Fonksiyonu	
7	$r_{ij} = 0.241T(A)_{ij} - 0.167T(B)_{ij} - 0.024T(C)_{ij} + 3.203t_{ij} - 2.374$	0.7079
14	$r_{ij} = 0.109T(A)_{ij} + 0.144T(B)_{ij} - 0.224T(C)_{ij} + 20.17t_{ij} - 19.22$	0.7830
28	$r_{ij} = 0.060T(A)_{ij} - 0.010T(B)_{ij} + 0.057T(C)_{ij} + 2.204t_{ij} - 1.399$	0.6932
365	$r_{ij} = -0.155T(A)_{ij} + 0.018T(B)_{ij} - 0.409T(C)_{ij} - 13.02t_{ij} - 13.85$	0.7412

6. SONUÇLAR

Bu çalışmanın sınırları içinde, başlıca şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 su/çimento oranına sahip sertleşmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde 7, 14, 28 ve 365. günlerde bulunan hidratasyon dereceleri su/çimento oranı ve yaşı artması ile belirgin bir şekilde arttı. Üretilen çimento hamuru numunelerine ait hidratasyon derecelerinin %45.8 ile %80.0 arasında değişen değerler aldığı görüldü. Maksimum hidratasyon derecesi, su/çimento oranı 0.42 olan 365 günlük numunelerde, minimum hidratasyon derecesi ise su/çimento oranı 0.26 olan 7 günlük numunelerde elde edildi.
2. 0.26, 0.30, 0.34, 0.38 ve 0.42 su/çimento oranına sahip sertleşmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde 7, 14, 28 ve 365. günlerde yapılan hidratasyon ısı ölçümlerinde, hidratasyon ısılarının numune yaşı ve su/çimento oranının artması ile belirgin şekilde arttığı görüldü. Üretilen çimento hamuru numunelerine ait hidratasyon ısıları 63.0 ile 107.4 cal/gr arasında değişen değerler aldı. Maksimum hidratasyon ısı, su/çimento oranı 0.42 olan 365 günlük numunelerde, minimum hidratasyon ısı ise su/çimento oranı 0.26 olan 7 günlük numunelerde elde edildi.
3. 0.26, 0.34 ve 0.42 su/çimento oranına sahip sertleşmiş çimento hamuru numuneleri üzerinde 7, 28 ve 365. günlerde yapılan civalı porozimetre deneyleri sonucunda tüm deney yaşlarında su/çimento oranının azalması ve numune yaşının artması ile birlikte numune içine nüfuz eden toplam civa hacminin azaldığı görüldü. Toplam nüfuz eden civa hacmi ile boşluk çapları arasındaki ilişkilerden faydalanarak hesaplanan kritik boşluk çaplarının su/çimento oranının azalması ve numune yaşının artması ile birlikte azaldığı ve 30nm ile 110nm arasında değişen değerler aldığı görüldü. Minimum kritik

boşluk çapı su/çimento oranının azalması ve numune yaşının artması ile elde edildi.

4. Düşük su/çimento oranlı betonlarda, çimentonun hidratasyonu sırasında oluşan jelleşmenin doğurduğu hacim artışı gecikerek meydana gelmektedir. Bu betonlarda suyun doldurduğu kılcal boşlukların çapları küçüktür. Muhtemelen bu boşluklara hapsolan su, jelin genişlemesine karşı koyarak belirtilen gecikmeye neden olmaktadır.

5. Hidratasyon ilerledikçe kılcal boşluklar daralır. Hava boşluklarının boyutları ise pratik olarak değişmez. Bu durum aşağıdaki sonuçları doğurmaktadır:

a- Beton yaşı arttıkça özelliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığı yükselmektedir.

b- Özellikler arasındaki korelasyon katsayılarını belirlemede 7 ve 14. günlerde bileşim etkenlerinden etkilenmedeki yakınlık birinci derecede önemli iken; yaşla duyarlılığın artması sonucunda 28. günden itibaren duyarlılıkların yakınlığı korelasyonlarının belirlenmesinde öne çıkmaktadır.

c- Betonun yaşı arttıkça, duyarlılık yakınlığı ile özellikler arasındaki korelasyonların gücü arasındaki ilgi giderek daha belirgin hale gelmektedir.

6. Duyarlılıklarının yakınlığının özellikler arasındaki korelasyon katsayılarının belirlenmesindeki etkisi hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

a- Özellikler arasındaki korelasyon katsayıları ile, bu özelliklerin duyarlılık yakınlığı arasında güvenilir bir ilgi vardır.

b- Bu ilginin kurulmasında bazı hallerde 1. tip (SD1), bazı hallerde ise 2. tip (SD2) duyarlılık derecesi daha başarılı olmaktadır.

c- Özelliklerin F1 fonksiyonuyla ifade edilmesi halinde yukarıda belirtilen ilgi daha kuvvetli bir şekilde kurulabilmektedir.

7. Bileşim etkenlerinden etkilenmedeki yakınlığın özellikler arasındaki korelasyonlarla ilgisi hakkında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

a- Bu ilgiyi gösterme bakımından (F5)' ve (F6)' fonksiyonlarının birbirine belirgin bir üstünlüğü yoktur.

b- Özellikler arasındaki korelasyonların belirlenmesinde, çimento hamuru miktarından ve çimento hamurunun boşluk yapısından etkilenmedeki yakınlıklar, agrega granülometrisinden etkilenmedeki yakınlıklardan daha önemlidir.

c- Tek tek ele alındıklarında, bileşim etkenlerinin hiçbirinden etkilenmedeki yakınlık, özellikler arasındaki korelasyonları belirlemede, duyarlılıkların yakınlığı kadar etkili değildir.

8. Dayanımlarla ilgili özelliklerin (f_{cc} , f_{cs} , f_{css} , $f_{cçs}$, T_s) diğer özelliklere (Δ , V_c , V_s , S , E) göre çimento hamurunun boşluk yapısına belirgin olarak daha fazla duyarlı olduğu bulunmuştur. Duyarlılığı yüksek olan bu özellikleri çimento hamurunun boşluk yapısına bağlı olarak ifade etmek için F2 fonksiyonunun daha başarılı olduğu saptanmıştır. Duyarlılığı düşük olan diğer özellikler için ise F1 fonksiyonunun kullanılmasıyla daha yüksek korelasyonlar elde edilmiştir.
9. Düşük su/çimento oranlı betonlarda duyarlılık dereceleri, su/çimento oranının daha yüksek olduğu betonlardakine göre daha büyüktür. Bundan dolayı özelliklerin çimento hamurunun boşluk yapısına duyarlılığını gözönüne almak, düşük su/çimento oranlı betonlarda daha büyük yarar sağlamaktadır. Örneğin, betonların sınıflandırılmasında esas alınan 28 günlük silindir basınç dayanımında (SD2) değeri, 1.42 olarak bulunmuştur. Yani duyarlılığı gözönünde tutmakla bu dayanımı ifade eden formülde korelasyon katsayısı 1.42 kat büyümektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Taşdemir, C., Taşdemir, M.A., Mills, N., Barr, B.I.G., and Lydon, F.D.,** 1999. Combined effects of silica fume and aggregate type and size on post-peak response of concrete bending, *ACI Materials Journal*, **96**, 1-10.
- [2] **Taşdemir, C, Taşdemir, M.A., Lydon, F.D., and Barr, B.I.G.,** 1995. Effects of silica fume and aggregate size on the brittleness of concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, No.1, 63-68.
- [3] **Taşdemir, M.A., Grimm, R., Taşdemir, C., and Konig, G.,** 1995. Microstructural effects on the brittleness of high strength concrete, *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, **1**, 125-134, Wittmann, F.H. (Ed.), Aedificatio Publishers, Freiburg.
- [4] **Taşdemir, C, Taşdemir, M.A., Lydon, F.D., and Barr, B.I.G.,** 1994. Some observations on the strain softening response on concrete, *Localized Damage III*, pp.140-156, Computational Mechanics, Southampton.
- [5] **Malhotra, V.M. (Ed.),** 1992. Advances in concrete technology, CANMET, Ottawa.
- [6] **CEB-FIB Model Code 1990.** *Bulletin D' Information*, No.23, July 1991, CEB, Laussane, Switzerland.
- [7] **Oktar, O.N., Moral, H., and Taşdemir, M.A.,** 1996. Sensitivity of concrete properties to the pore structure of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, **26**, No.11, 1619-1627.
- [8] **Oktar, O.N., Moral, H., and Taşdemir, M.A.,** 1996. Factors determining the correlations between concrete properties, *Cement and Concrete Research*, **26**, 1629-1637.
- [9] **Winslow, D., and Liu, D.,** 1990. The pore structure of paste in concrete, *Cement and Concrete Research*, **20**, 227-235.
- [10] **Jennings, H.M.,** 1988. Design of high strength cement based materials: Part 2 Microstructure, *Material Science and Technology*, **4**, 285-290.

- [11] **Escalante-Garcia, J.I., and Sharp, J.H.**, 2001. The microstructure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, *Cement and Concrete Research*, **31**, 695-702.
- [12] **Zhang, B.**, 1998. Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue, *Cement and Concrete Research*, **28**, No.5, 699-711.
- [13] **Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Akyüz, S., Jefferson, A.D. and Lydon, F.D.**, 1998. Evaluation of strains at peak stresses in concrete: a three-phase composite model approach, *Cement and Concrete Research*, **20**, 301-318.
- [14] **Oktar, O.**, 1977. Bağlayıcı hamur yapısının betonun kısa süreli inelastik davranışındaki işlevi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi.
- [15] **Powers, T.C.**, 1964. The physical structure in portland cement paste, *The Chemistry of Cements*, T.C.Powers (Ed.), Academic Press, London and New York, **1**, 391-416.
- [16] **Postacıoğlu, B.**, 1986. Beton: Bağlayıcı maddeler, agregalar, beton, Cilt 1, İstanbul.
- [17] **Jennings, H.M., and Lange, D.A.**, 1988. Toward high performance cement based materials, *New Horizons in Construction Materials*, Proceedings of Session/ASCE National Convention St. Louis, MO/October 26, 4-25.
- [18] **Jennings, H.M., Dalglish, B.J., and Pratt, P.L.**, 1981. Morphological development of hydrating C_3S as examined by electron microscopy Techniques, *Journal of the American Ceramic Society*, **64**, 567.
- [19] **Growes, G.W., LeSueur, P.J., and Sinclair, W.**, 1986. Transmission electron microscopy and microanalytical studies on oil-beam thinned sections of C_3S paste, *Journal of the American Ceramic Society*, **69**, 353.
- [20] **Jennings, H.M., and Parrot, L.J.**, 1986. Microstructure analyses of hardened alite paste, *Journal of Material Science*, **21**, 4048.
- [21] **Neville, A.M.**, 1997. Properties of concrete, 4th Edition, John Wiley & Sons Inc., New York.

- [22] **Richardson, I.G.**, 2000. The nature of the hydration products in hardened cement paste, *Cement and Concrete Composites*, **22**, 97-113.
- [23] **Okpala, D.C.**, 1989. Pore structure of hardened cement paste, *The International Journal of Cement Composites and Lighweight Concrete*, **22**, No.4, 245-254.
- [24] **Renhe, Y., Baoyuan, L., and Zhongwei, W.**, 1990. Study on the pore structure of hardened cement paste by small angle X ray scattering (SAXS) , *Cement and Concrete Research*, **20**, 385-393.
- [25] **Cook, R.A, and Hover, K.C.**, 1999. Mercury porosimetry of hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, **29**, 933-943.
- [26] **Khatib, J.M., and Mangat, P.S.**, 1999. Influence of superplasticizer and curing on porosity and pore structure of cement paste, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 431-437.
- [27] **Powers, T.C. and Brownyard, T.L.**, 1947. Studies of the physical properties of hardened portland cement paste, (in nine parts), *Journal of the American Concrete Institute*, **43**.
- [28] **Odler, I., and Rössler, M.**, 1985. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes: II. Effects of pore structure and degree of hydration, *Cement and Concrete Research*, **15**, 401-410.
- [29] **Jennings, H.M.**, 1988. Design of high strength cement based materials: Part 3 State of art, *Material Science and Technology*, **4**, 291-299.
- [30] **Taylor, H.F.W.**, 1964. Introduction Part, *The Chemistry of Cements*, T.C.Powers (Ed.), Academic Press, London and New York, **1**, 1-24.
- [31] **Powers, T.C.**, 1960. Physical properties of cement paste, *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington D.C., **1**, 577-609.
- [32] **Hansen T.C.**, 1960. Strength, elasticity and creep as related to the internal structure of concrete, *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington D.C., **1**, 709-723.

- [33] **Akman, M.S.**, 1990. Yapı Malzemesi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [34] **Seki, S., Kasahara, K., Kuriyama, T., and Kawasumi, M.**, 1968. Effects of hydration of cement on compressive strength, modulus of elasticity and creep of concrete, *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Tokyo, **3**, 175-185
- [35] **Neville, A.M.**, 1971. Hardened concrete: physical and mechanical aspect, *American Concrete Institute Monograph Series*, No.6.
- [36] **Wittmann, F.H., Roelfstra, P.E, Mihashi, H., and Zhang, X.H.**, 1987. Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete, *Journal of Materials and Structures*, **20**, 103-110.
- [37] **Lam, L., Wong, Y.L., and Poon, C.S.**, 2000. Degree of hydration and gel/space ratio of high volume fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Research*, **30**, 747-756.
- [38] **Feldman, R.F., and Beaudoin, J.J.**, 1976. Microstructure and strength of hydrated cement, *Cement and Concrete Research*, **6**, 389-400.
- [39] **Popovics, S.**, 1990. Analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship , *ACI Materials Journal*, **87**, No.5, 517-529.
- [40] **Popovics, S.**, 1985. New formulas for the prediction of the effect of porosity on concrete strength, *ACI Materials Journal*, **82**, 136-146.
- [41] **Rössler, M., and Odler, I.**, 1985. Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes: I. Effects of porosity, *Cement and Concrete Research*, **15**, 320-330.
- [42] **Hansen, T.C.**, 1986. Physical structure of hardened cement paste: A classical approach, *Materials and Constructions*, **19**, 423-436.
- [43] **Winslow, D.N., Cohen, M.D., Bentz, D.P., Sydner, G.A., and Garbozci, E.J.**, 1994. Percolation and pore structure in mortars and Concrete, *Cement and Concrete Research*, **24**, 25-37.
- [44] **Nilsen, A.U., and Monteiro, P.L.K.**, 1993. Concrete: a three phase material, *Cement and Concrete Research*, **23**, 147-151.

- [45] **Keru, W., and Jianhua, Z.**, 1988. The influence of the matrix-aggregate bond on the strength and brittleness of concrete, *Bonding in Cementitious Composites*, S. Mindness and S.P. Shah (Eds.), Materials Research Society Pittsburgh, 29-34.
- [46] **Popovics, S.**, 1992. Strength and related properties of concrete: a quantitative approach, John Wiley and Sons.
- [47] **Barnes, B.D., Diamond, S., and Dolch, W.L.**, 1978. The contact zone between portland cement paste and glass aggregate surfaces, *Cement and Concrete Research*, **8**, 233-244.
- [48] **Zimbelmann, R.**, 1989. A contribution to the problem of cement-aggregate bond, *Cement and Concrete Research*, **15**, 801-808.
- [49] **Ping, X., Beaudoin, J.J., and Brousseau, R.**, 1991. Effect of aggregate size on transition zone properties at the portland cement paste interface, *Cement and Concrete Research*, **21**, 999-1005.
- [50] **Şengül, Ö.**, 2000. Agregat türünün normal ve yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışına etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [51] **Bremner, T.W., and Holm, T.A.**, 1986. Elastic compatibility and behaviour of concrete, *ACI Materials Journal*, **83**, 244-250.
- [52] **Monterio, P.J.M., Maso, J.C., and Olliver, J.P.**, 1985. The aggregate-mortar interface, *Cement and Concrete Research*, **15**, 953-958.
- [53] **Glasser, F.P.**, 1992. Progress in the immobilization of radioactive wastes in cement, *Cement and Concrete Research*, **22**, 201-16.
- [54] **Powers, T.C., Copeland, L.E., and Mann, H.M.**, 1959. Capillary continuity or discontinuity in cement pastes, *Journal of Portland Cement Association*, Research and Development Laboratory, **1**, No.2, 325-344.
- [55] **Bentz, D.P., and Garbozci, E.J.**, 1991. Percolation of the phases in a three dimensional cement paste microstructural model, *Cement and Concrete Research*, **21**, 325-344.

- [56] **Garbozci, E.J.**, 1993. Computational materials science of cement based materials, *Journal of Materials and Structures*, **26**, 191-195.
- [57] **Chiristensen, B.J., Mason, T.O., and Jennings, H.M.**, 1996. Comparison of measured and calculated permeabilites of hardened cement pastes, *Cement and Concrete Research*, **26**, 1325-1334.
- [58] **Cui, L., and Cahyadi, J.H.**, 2001. Permeabilty and pore structure of ordinary portland cement paste, *Cement and Concrete Research*, **31**, 277-282.
- [59] **Garbozci, E.J.**, 1990. Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review, *Cement and Concrete Research*, **20**, 591-601.
- [60] **Reinhard, H.W., and Gaber, K.**, 1990, From pore size distribution to an equivalent pore size of cement mortar, *Journal of Materials and Structures*, **23**, 3-15.
- [61] **Jambar, J.**, 1976. Influence of water-cement ratio on the structure and strength of hardened cement paste, *Proceedings of Hydraulic Cement Pastes: Their Structure and Properties*, Cement and Concrete Association, University of Sheffield, 175-188.
- [62] **TS 706**, 1980. Beton agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [63] **TS 24**, 1985. Çimentoların fiziki ve mekanik deney metodları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [64] **ASTM C186-98**, Standard test method for heat of hydration of hydroulic cement.
- [65] **TS-687**, 1985. Çimentonun kimyevi analiz metodları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [66] **Verbeck, G.**, 1960. Energetics of the hydration of portland cement, *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington D.C., **1**, 453-465.
- [67] **Akman, S.**, 1978. Deney ve ölçme tekniğine giriş, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

EK A



Tablo A.1. A16-B16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.

A16-B16 Granülometrisi	Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı			
	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365
w/c	0.26				0.30				0.34				0.38			
Çimento, kg	613	615	613	609	554	550	555	554	504	499	505	502	417	417	419	421
Su, kg	159	160	159	158	166	165	167	166	171	170	172	171	159	159	160	160
Katki, kg	7.4	7.4	7.4	7.3	4.4	4.4	4.4	4.4	3.0	3.0	3.0	3.0	6.3	6.3	6.3	6.3
Kırmataş1, kg	942	946	942	935	957	951	960	958	978	969	979	974	1012	1012	1018	1022
Silis Unu, kg	198	199	198	198	202	201	203	202	207	205	207	206	213	213	215	215
Kırmataş Kumuu, kg	565	567	564	561	575	571	577	575	587	581	587	584	607	607	611	613
Hava, %	1.0	0.5	1.0	1.6	1.4	2.0	1.0	1.4	1.2	1.0	1.0	1.6	2.5	2.5	2.1	1.8
Taze Birim Ağırlık, kg/m ³	2486	2495	2484	2468	2459	2441	2466	2460	2451	2427	2452	2439	2414	246	2429	2437
Kompasite, m ³ /m ³	0.824	0.828	0.824	0.819	0.816	0.811	0.819	0.816	0.814	0.814	0.806	0.817	0.810	0.808	0.813	0.816
Çökne, cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-
Yayılma, %	300	-	-	-	250	-	-	-	280	-	-	-	-	-	-	-

Tablo A.2. B16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.

B16 Granülometrisi	Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı			
	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365
w/c	0.26				0.30				0.34				0.38			
Çimento,kg	635	637	635	633	577	573	580	573	520	506	516	508	450	450	452	453
Su, kg	165	166	165	164	173	172	174	172	177	172	175	173	171	171	172	172
Katkı, kg	7.6	7.6	7.6	7.6	4.7	4.6	4.6	4.6	3.2	3.1	3.1	3.1	6.8	6.8	6.8	6.8
Kırmataş1,kg	748	750	748	745	760	755	765	755	789	767	782	770	796	796	799	802
Silis Unu, kg	321	322	321	320	327	325	329	325	339	330	336	331	342	342	343	344
Kırmataş Kumu, kg	581	583	581	579	591	587	595	587	613	596	608	598	619	619	621	623
Hava, %	1.6	1.2	1.5	1.9	1.8	2.4	1.2	2.3	1.1	3.8	1.9	3.4	3.0	3.0	2.6	2.4
Taze Birim Ağırlık, kg/m ³	2458	2464	2459	2449	2432	2416	2448	2417	2442	2375	2420	2439	2384	2386	2394	2403
Kompasite,m ³ /m ³	0.819	0.822	0.820	0.817	0.809	0.804	0.814	0.805	0.812	0.790	0.806	0.793	0.799	0.799	0.802	0.804
Çökme, cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
Yayılma, %	300	-	-	-	280	-	-	-	300	-	-	-	-	-	-	-

Tablo A.3. B16-C16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.

B16-C16 Granülometrisi	Deney Yaşı					Deney Yaşı					Deney Yaşı					Deney Yaşı				
	7	14	28	365		7	14	28	365		7	14	28	365		7	14	28	365	
	0.26					0.30					0.34					0.38				
w/c																				
Çimento,kg	662	667	668	661		596	560	599	592		524	513	520	516		477	477	480	480	
Su, kg	172	173	174	172		179	168	180	178		178	174	177	176		181	181	182	183	
Katki, kg	7.9	8.0	8.0	7.9		4.7	4.5	4.8	4.7		3.1	3.1	3.1	3.1		7.2	7.2	7.2	7.2	
Kırmataş I,kg	527	530	531	526		536	503	538	532		557	544	552	548		560	561	564	565	
Silis Unu, kg	371	373	374	370		377	354	379	374		391	382	388	385		394	395	397	397	
Kırmataş Kumu, kg	686	691	693	686		698	655	701	694		725	709	719	714		730	731	734	736	
Hava, %	2.3	1.6	1.3	2.4		3.0	8.9	2.5	3.6		3.3	5.4	4.0	4.7		3.7	3.6	3.1	2.9	
Taze Birim Ağırlık, kg/m ³	2426	2444	2447	2424		2391	2244	2401	2375		2379	2325	2360	2342		2351	2353	2364	2369	
Kompasite, m ³ /m ³	0.805	0.811	0.813	0.804		0.791	0.743	0.795	0.786		0.789	0.772	0.783	0.777		0.782	0.783	0.787	0.788	
Çökme, cm	-	-	-	-		-	-	-	-		-	-	-	-		3	-	-	-	
Yayılna, %	250	-	-	-		220	-	-	-		180	-	-	-		-	-	-	-	

Tablo A.4. C16 granülometrisine sahip betonların karışım oranları ve taze beton özellikleri.

C16 Granülometrisi	Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı				Deney Yaşı			
	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365	7	14	28	365
	0.26				0.30				0.34				0.38			
w/c																
Çimento,kg	669	669	682	678	594	565	595	598	510	517	524	520	508	503	507	510
Su, kg	174	174	177	176	178	169	178	179	173	176	178	177	193	191	193	194
Katkı, kg	8.0	8.0	8.2	8.1	4.7	4.5	4.8	4.8	3.1	3.1	3.2	3.1	7.6	7.6	7.7	7.7
Kırmataş I,kg	297	297	303	302	309	294	309	311	313	317	321	319	323	321	323	325
Silis Unu, kg	475	475	484	481	493	469	494	497	499	507	513	509	516	511	515	518
Kırmataş Kummu, kg	699	699	713	709	626	691	727	732	736	747	756	750	759	753	759	763
Hava, %	5.8	5.8	4.0	4.7	6.0	10.6	5.9	5.3	8.7	7.3	6.1	6.8	4.5	5.3	4.5	4.0
Taze Birim Ağırlık, kg/m ³	2323	2322	2368	2354	2305	2193	2308	2321	2234	2267	2295	2276	2307	2288	2306	2318
Kompasite, m ³ /m ³	0.768	0.768	0.783	0.777	0.762	0.725	0.763	0.768	0.740	0.751	0.761	0.755	0.762	0.756	0.762	0.766
Çökme, cm	-	-	-	-	5	-	-	-	2	-	-	-	1	-	-	-
Yayılma, %	310	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

EK B

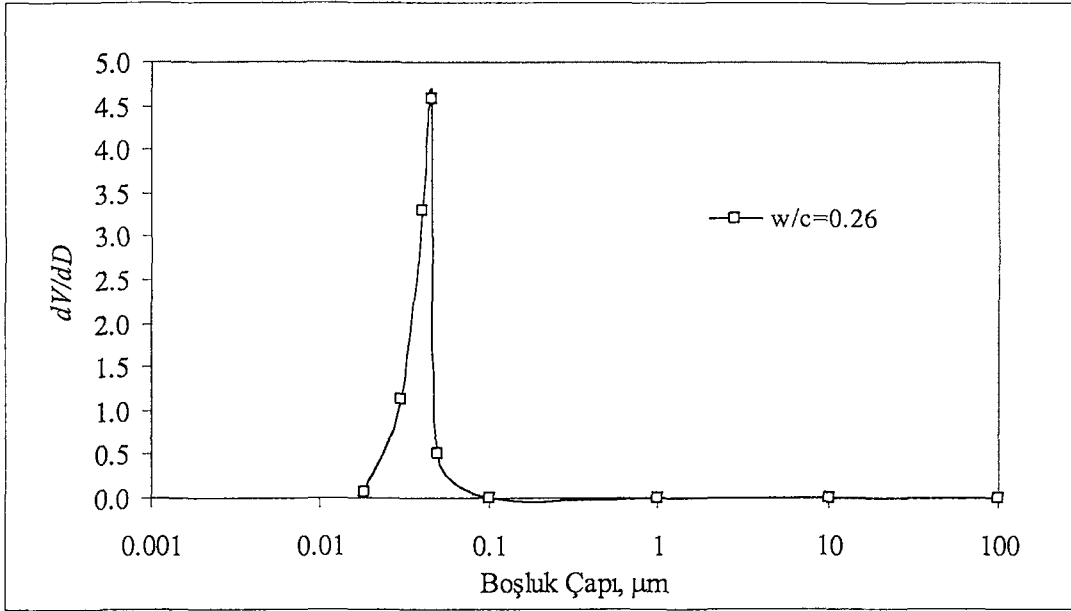


Tablo B.1. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde maksimum yükteki birim deformasyon miktarları, (ϵ_{cu})

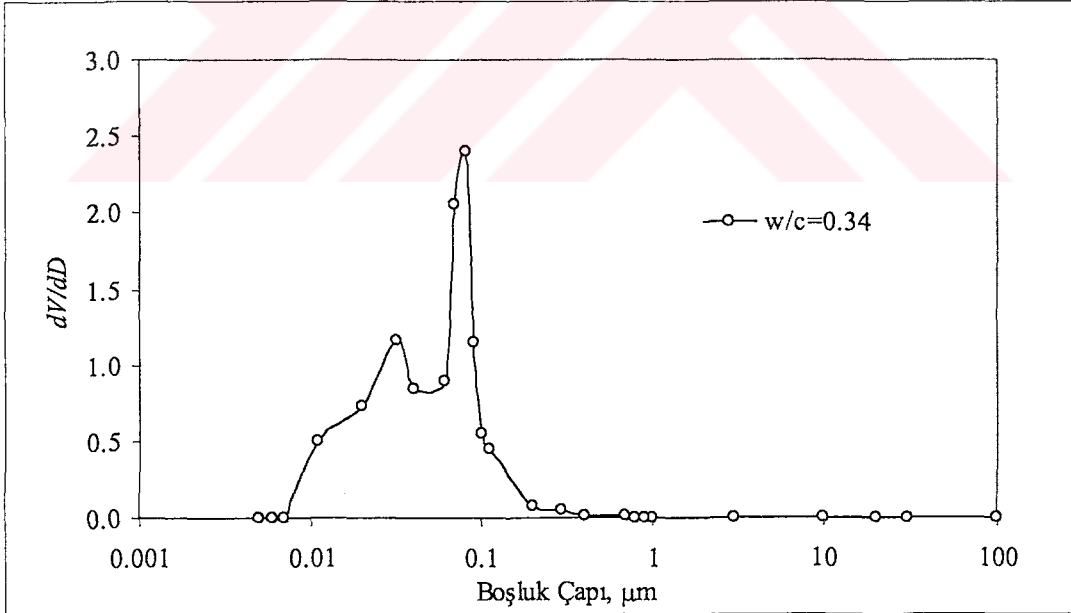
Numune Kodu	(ϵ_{cu})			
	7 Gün	14 Gün	28 Gün	365 Gün
AB26	0.00254	0.00199	0.00209	0.00241
AB30	0.00250	0.00215	0.00185	0.00237
AB34	0.00238	0.00224	0.00209	0.00234
AB38	0.00203	0.00216	0.00182	0.00216
AB42	0.00211	0.00201	0.00196	0.00203
B26	0.00199	0.00221	0.00259	0.00258
B30	0.00215	0.00223	0.00184	0.00267
B34	0.00224	0.00226	0.00253	0.00250
B38	0.00216	0.00219	0.00199	0.00221
B42	0.00201	0.00205	0.00171	0.00203
BC26	0.00209	0.00220	0.00248	0.00273
BC30	0.00185	0.00248	0.00288	0.00287
BC34	0.00209	0.00244	0.00255	0.00259
BC38	0.00182	0.00242	0.00212	0.00230
BC42	0.00196	0.00233	0.00194	0.00222
C26	0.00241	0.00282	0.00271	0.00293
C30	0.00237	0.00258	0.00271	0.00276
C34	0.00234	0.00234	0.00251	0.00244
C38	0.00216	0.00224	0.00222	0.00233
C42	0.00203	0.00240	0.00216	0.00233

Tablo B.2. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda hesaplanan kırılma şekil değıştirme enerjileri, $(KE)_{maks}$

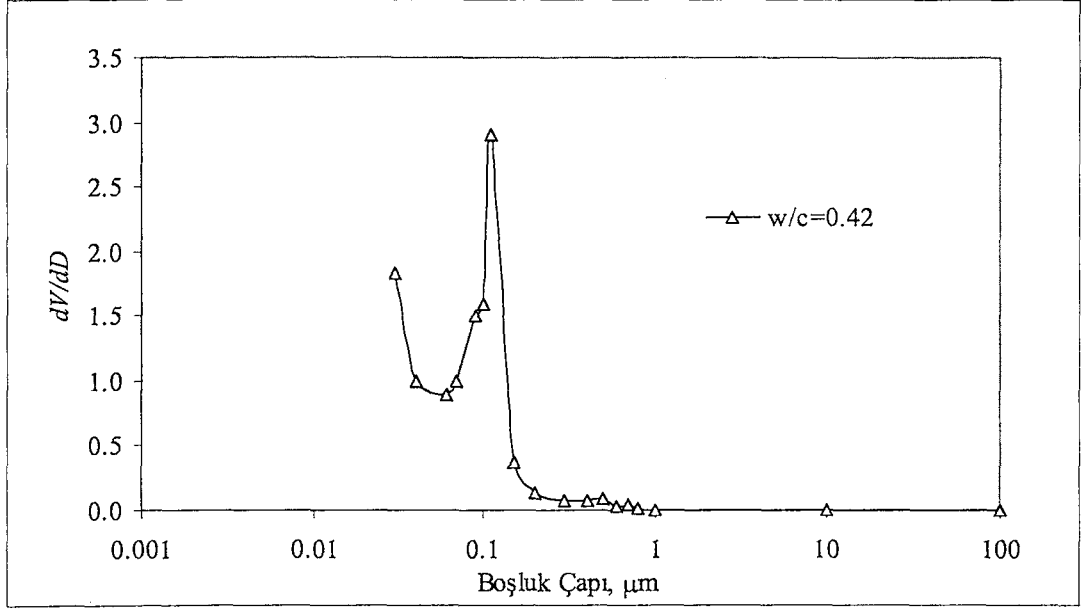
Numune Kodu	$(KE)_{maks}$, N/mm ²			
	7 Gün	14 Gün	28 Gün	365 Gün
AB26	0.12880	0.08846	0.10232	0.14608
AB30	0.11664	0.09667	0.07353	0.13523
AB34	0.09840	0.09670	0.08802	0.12557
AB38	0.06981	0.08629	0.06565	0.10362
AB42	0.07050	0.07357	0.07356	0.08674
B26	0.14700	0.10617	0.14859	0.15928
B30	0.12312	0.10431	0.07887	0.16326
B34	0.12125	0.09579	0.12067	0.13517
B38	0.07930	0.08700	0.07366	0.10109
B42	0.06874	0.07437	0.05740	0.08164
BC26	0.12052	0.10639	0.13107	0.17475
BC30	0.13817	0.10093	0.17428	0.17428
BC34	0.11134	0.10431	0.12126	0.13849
BC38	0.08451	0.09603	0.07734	0.10694
BC42	0.07428	0.08652	0.06572	0.09373
C26	0.15172	0.14135	0.14486	0.18824
C30	0.13932	0.10510	0.13431	0.15854
C34	0.09839	0.09413	0.11092	0.11339
C38	0.08641	0.08130	0.08062	0.10018
C42	0.07696	0.08725	0.07412	0.09279



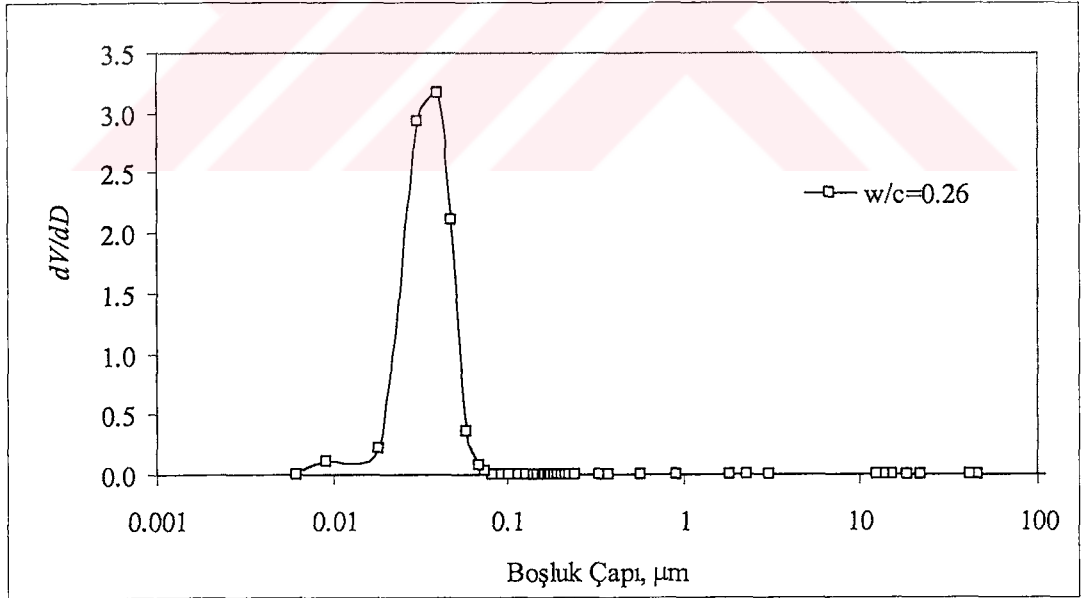
Şekil B.1. Su/çimento oranı 0.26 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki.



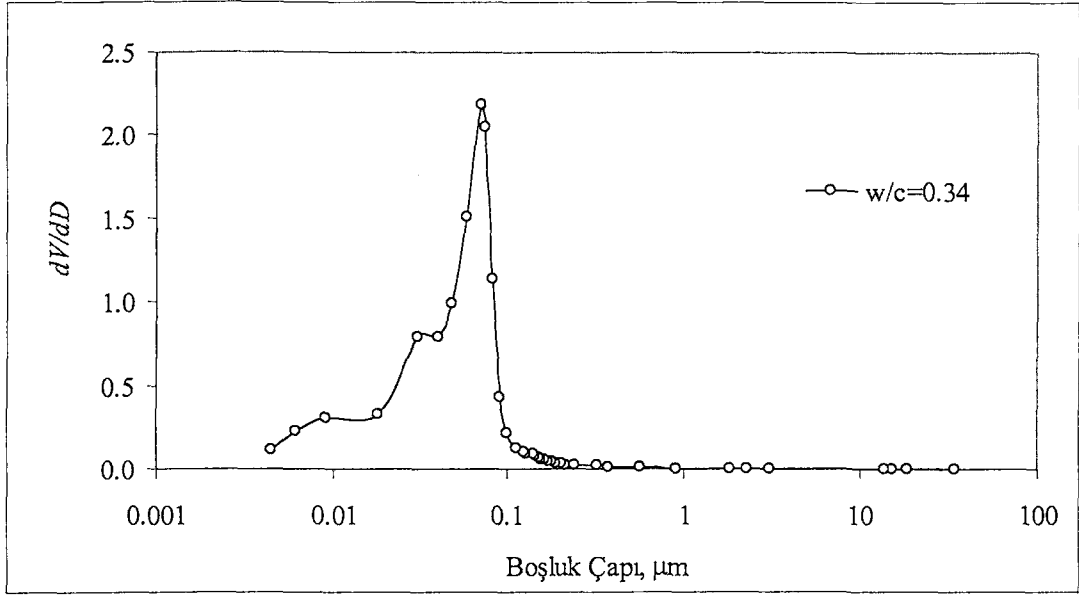
Şekil B.2. Su/çimento oranı 0.34 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



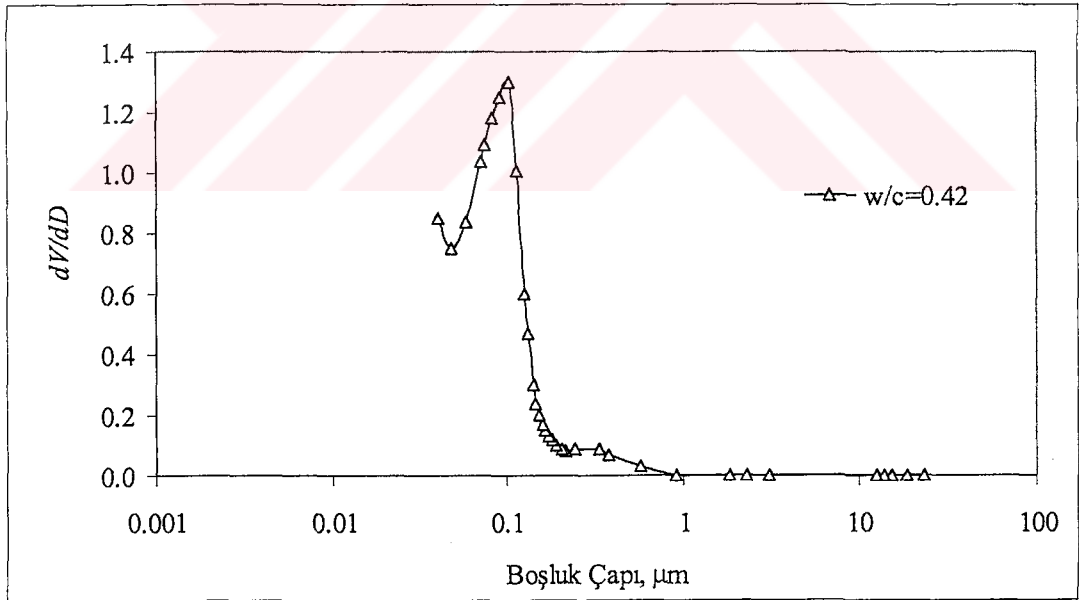
Şekil B.3. Su/çimento oranı 0.42 olan 7 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



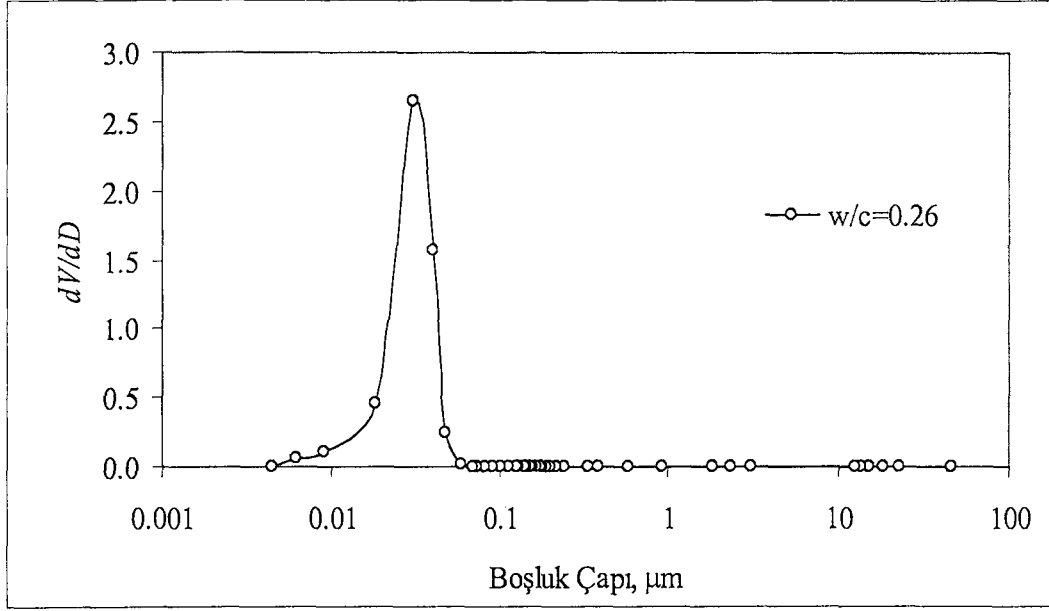
Şekil B.4. Su/çimento oranı 0.26 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



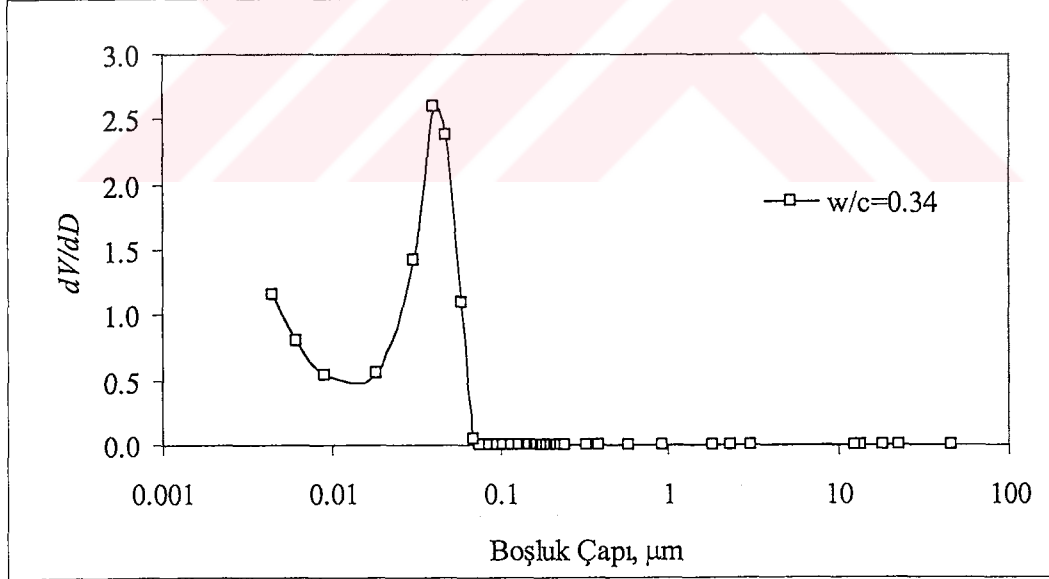
Şekil B.5. Su/çimento oranı 0.34 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



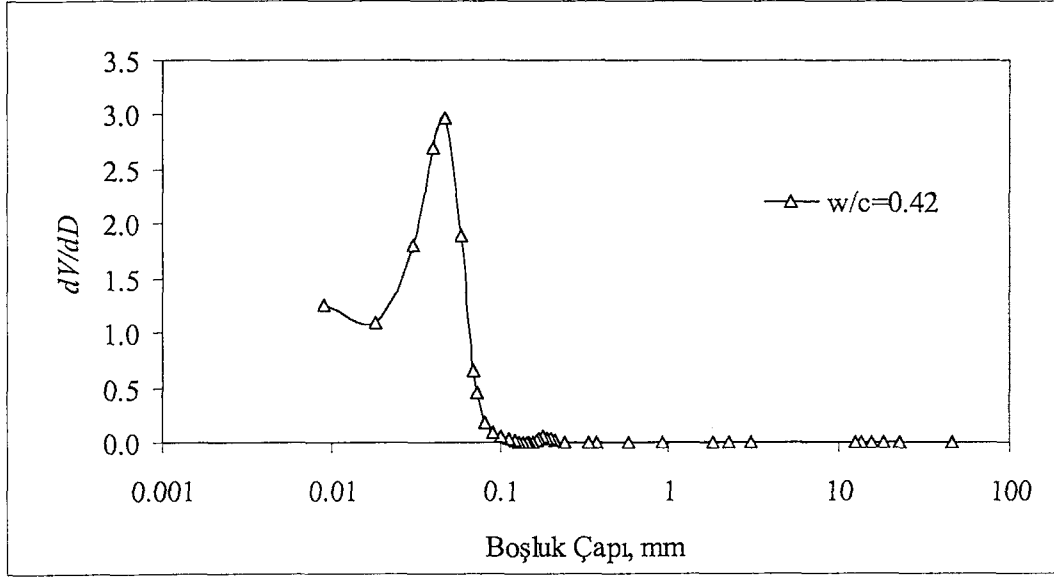
Şekil B.6. Su/çimento oranı 0.42 olan 28 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



Şekil B.7. Su/çimento oranı 0.26 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



Şekil B.8. Su/çimento oranı 0.34 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki



Şekil B.9. Su/çimento oranı 0.42 olan 365 günlük numunede boşluk çapı ile kümülatif nüfuz eden civa hacmi değişimi (dV/dD) arasındaki ilişki

EK C



Tablo C.1. 7 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -3.10[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2725$	1.00	1.80	0.9880
$V_c = -0.007[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 5.83$	0.74		0.9542
$V_s = -0.006[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 5.74$	0.97		0.9732
$S = -0.049[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 63.8$	3.06		0.8689
$E = 27700 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 190317$	1.78		0.9565
$f_{cc} = -83.6 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 598.3$	5.05		0.8513
$f_{cs} = -101.8 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 539.2$	∞		0.8144
$f_{css} = -69.1 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 369.1$	∞		0.7861
$f_{cs\phi} = -87.1 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 465.1$	∞		0.7794
$T_s = -0.015[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 4.50$	0.15		0.6899

Tablo C.2. 14 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -2.87[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2678$	1.00	1.81	0.9948
$V_c = -0.005[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.00$	1.38		0.9510
$V_s = -0.005[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 5.65$	0.98		0.9560
$S = -0.080[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 62.4$	1.39		0.9161
$E = 26740 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 185955$	1.89		0.9785
$f_{cc} = -65.4 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 474.0$	4.46		0.8317
$f_{cs} = -68.8 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 593.6$	21.1		0.7802
$f_{css} = -59.7 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 488.1$	15.5		0.7402
$f_{cs\phi} = -63.0 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 350.0$	∞		0.7622
$T_s = -0.007[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 7.07$	4.16		0.6622

Tablo C.3. 28 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -3.06[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2719$	1.00	1.75	0.9799
$V_c = -0.006[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.34$	1.72		0.9496
$V_s = -0.004[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.05$	2.35		0.925
$S = -0.062[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 66.6$	2.33		0.9131
$E = 28522 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 199790$	1.95		0.9586
$f_{cc} = -98.5 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 530.0$	∞		0.7187
$f_{cs} = -116.8 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 612.4$	∞		0.6636
$f_{css} = -90.5 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 474.3$	∞		0.6711
$f_{cs\phi} = -103.2 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 543.6$	∞		0.6241
$T_s = -0.056[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 4.50$	∞		0.6984

Tablo C.4. 365 günlük numunelerde F1 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -3.21[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2553$	1.00	2.14	0.9574
$V_c = -0.008[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.18$	1.97		0.9828
$V_s = -0.008[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 5.93$	1.95		0.9798
$S = -0.046[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 68.5$	6.69		0.9493
$E = 24610 \ln[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 174465$	3.41		0.9730
$f_{cc} = -94.7 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 441.2$	∞		0.9113
$f_{cs} = -114.7 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 516.4$	∞		0.8876
$f_{css} = -97.9 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 434.2$	∞		0.8654
$f_{cs\phi} = -107.5 \ln[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 483.3$	∞		0.8780
$T_s = -0.055[\{w - (p-1)\alpha c\}] + 6.71$	∞		0.6043

Tablo C.5. 7 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 277.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2251$	1.00	1.80	0.8318
$V_c = 0.275 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.60$	0.03		0.8931
$V_s = 0.295 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.48$	0.08		0.9000
$S = 10.257 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 45.6$	1.15		0.9355
$E = 13815 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 31830$	0.50		0.9413
$f_{cc} = 51.85 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 83.1$	1.73		0.9775
$f_{cs} = 64.07 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 115.0$	5.92		0.9656
$f_{css} = 41.1 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 133.2$	1.44		0.9404
$f_{cs\phi} = 56.24 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 186.5$	14.3		0.9430
$T_s = 0.075 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{a} \right] + 3.24$	0		0.7670

Tablo C.6. 14 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 311.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2194$	1.00	1.81	0.8896
$V_c = 0.299 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.71$	0.15		0.8589
$V_s = 0.255 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.61$	0.11		0.8742
$S = 8.22 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 41.3$	0.59		0.9087
$E = 13964 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 33075$	0.61		0.9489
$f_{cc} = 47.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 90.6$	2.37		0.9342
$f_{cs} = 50.84 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 140.3$	7.26		0.9232
$f_{css} = 45.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 108.0$	6.19		0.8983
$f_{cs\phi} = 49.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 163.5$	13.6		0.9102
$T_s = 2.12 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2.73$	2.36		0.5749

Tablo C.7. 28 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 324.1 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2220$	1.00	1.75	0.8406
$V_c = 0.250 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.67$	0.01		0.8762
$V_s = 0.320 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.60$	0.23		0.7845
$S = 9.89 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 44.7$	0.75		0.9120
$E = 12770 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 32550$	0.39		0.9006
$f_{cc} = 84.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 231.1$	10.7		0.9427
$f_{cs} = 108.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 13.3$	∞		0.9277
$f_{css} = 78.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 13.3$	∞		0.8777
$f_{cs\phi} = 98.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 12.8$	∞		0.8918
$T_s = 2.76 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 0.25$	∞		0.8494

Tablo C.8. 365 günlük numunelerde F2 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 245.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2006$	1.00	2.14	0.9190
$V_c = 0.665 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.35$	0.80		0.9173
$V_s = 0.55 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4.39$	0.78		0.9080
$S = 12.68 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 48.5$	3.16		0.9274
$E = 20910 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 28650$	1.72		0.9249
$f_{cc} = 92.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 145.9$	10.7		0.9612
$f_{cs} = 113.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 267.7$	28.7		0.9679
$f_{css} = 98.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 198.5$	22.1		0.9506
$f_{csf} = 108.9 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 222.0$	21.2		0.9596
$T_s = 0.37 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 2.12$	∞		0.6731

Tablo C.9. 7 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.006(c + w + a) - 3.10[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2724$	1.00	1.80	0.9880
$V_c = -0.0013(c + w + a) - 0.005[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.40$	1.30		0.9755
$V_s = -0.001(c + w + a) - 0.005[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.13$	1.41		0.9838
$S = 0.035(c + w + a) - 0.10[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 48.1$	1.11		0.9444
$E = 26.01(c + w + a) - 164.2[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 57490$	1.20		0.9735
$f_{cc} = 0.205(c + w + a) - 0.451[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 59.6$	1.11		0.9751
$f_{cs} = 0.263(c + w + a) - 0.381[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 46.9$	1.69		0.9674
$f_{css} = 0.181(c + w + a) - 0.231[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 34.9$	1.95		0.9403
$f_{cs\varphi} = 0.238(c + w + a) - 0.296[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 39.6$	1.90		0.9464
$T_s = 0.0013(c + w + a) - 0.017[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 3.94$	0.05		0.6941

Tablo C.10. 14 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.02(c + w + a) - 2.892[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2673$	1.00	1.81	0.9948
$V_c = -0.0015(c + w + a) - 0.0034[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.65$	2.62		0.9784
$V_s = -0.0014(c + w + a) - 0.0034[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.25$	1.92		0.9849
$S = 0.019(c + w + a) - 0.103[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 54.2$	0.88		0.9344
$E = 14.83(c + w + a) - 140.5[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 63860$	1.63		0.9815
$f_{cc} = 0.160(c + w + a) - 0.345[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 67.4$	1.27		0.9469
$f_{cs} = 0.169(c + w + a) - 0.246[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 62.6$	2.04		0.9298
$f_{css} = 0.162(c + w + a) - 0.240[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 39.4$	1.73		0.9071
$f_{cs\varphi} = 0.170(c + w + a) - 0.214[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 55.8$	2.34		0.9148
$T_s = 0.0017(c + w + a) - 0.009[n_i^*\{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.33$	2.94		0.6682

Tablo C.11. 28 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.047(c + w + a) - 3.095[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2706$	1.00	1.75	0.9802
$V_c = -0.0005(c + w + a) - 0.0050[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.56$	2.12		0.9536
$V_s = -0.0007(c + w + a) - 0.0026[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.39$	3.83		0.9374
$S = 0.017(c + w + a) - 0.091[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 58.9$	1.37		0.9423
$E = 9.59(c + w + a) - 139.5[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 69500$	1.68		0.9622
$f_{cc} = 0.233(c + w + a) - 0.295[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 70.4$	2.47		0.9423
$f_{cs} = 0.293(c + w + a) - 0.182[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 74.9$	5.72		0.9409
$f_{css} = 0.202(c + w + a) - 0.150[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 65.4$	5.23		0.8909
$f_{cs\phi} = 0.259(c + w + a) - 0.068[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 75.5$	14.9		0.9225
$T_s = 0.0103(c + w + a) - 0.0048[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.47$	11.5		0.8642

Tablo C.12. 365 günlük numunelerde F3 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.153(c + w + a) - 3.375[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 2508$	1.00	2.14	0.9616
$V_c = -0.0009(c + w + a) - 0.0061[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.58$	2.98		0.9921
$V_s = -0.0008(c + w + a) - 0.0052[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 6.27$	2.97		0.9890
$S = 0.012(c + w + a) - 0.069[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 63.4$	3.97		0.9585
$E = 9.93(c + w + a) - 167.1[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 68480$	2.74		0.9707
$f_{cc} = 0.194(c + w + a) - 0.368[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 98.6$	4.62		0.9610
$f_{cs} = 0.291(c + w + a) - 0.409[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 77.1$	4.88		0.9742
$f_{css} = 0.270(c + w + a) - 0.419[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 49.6$	3.87		0.9597
$f_{cs\phi} = 0.281(c + w + a) - 0.395[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 72.6$	4.94		0.9657
$T_s = 0.0054(c + w + a) - 0.0028[n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a] + 4.33$	15.6		0.6864

Tablo C.13. 7 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -1.09(c + w + a) + 297.9 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2653$	1.00	1.80	0.9832
$V_c = -0.004(c + w + a) + 0.659 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 6.79$	2.13		0.9827
$V_s = -0.004(c + w + a) + 0.677 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 6.65$	2.59		0.9819
$S = -0.012(c + w + a) + 11.55 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 54.6$	1.88		0.9392
$E = -51.1(c + w + a) + 19656 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 67290$	1.90		0.9648
$f_{cc} = 0.003(c + w + a) + 51.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 80.2$	1.67		0.9776
$f_{cs} = 0.022(c + w + a) + 61.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 124.8$	4.29		0.9661
$f_{css} = 0.015(c + w + a) + 42.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 105.9$	6.60		0.9408
$f_{csf} = 0.029(c + w + a) + 53.1 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 126.4$	6.33		0.9441
$T_s = 0.0019(c + w + a) + 0.078 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 3.95$	0.01		0.7829

Tablo C.14. 14 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.887(c + w + a) + 283.1 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2539$	1.00	1.81	0.9886
$V_c = -0.004(c + w + a) + 0.897 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 8.93$	20.4		0.9822
$V_s = -0.004(c + w + a) + 0.671 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 7.09$	5.50		0.9856
$S = -0.023(c + w + a) + 11.34 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 57.9$	1.61		0.9259
$E = -63.3(c + w + a) + 23740 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 83820$	3.60		0.9823
$f_{cc} = -0.007(c + w + a) + 48.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 97.1$	2.57		0.9344
$f_{cs} = -0.007(c + w + a) + 51.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 150.5$	8.28		0.9233
$f_{css} = 0.016(c + w + a) + 43.0 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 87.3$	4.62		0.8991
$f_{cs\varphi} = -0.0001(c + w + a) + 49.9 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 163.7$	13.6		0.9102
$T_s = -0.0064(c + w + a) + 1.23 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 4.26$	∞		0.6463

Tablo C.15. 28 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.838(c + w + a) + 323.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2529$	1.00	1.75	0.9610
$V_c = -0.004(c + w + a) + 1.237 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 8.29$	6.44		0.9546
$V_s = -0.004(c + w + a) + 1.112 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 5.80$	∞		0.9421
$S = -0.025(c + w + a) + 15.17 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 67.0$	2.59		0.9357
$E = -66.2(c + w + a) + 27437 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 91766$	3.56		0.9485
$f_{cc} = -0.005(c + w + a) + 85.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 246.6$	12.3		0.9428
$f_{cs} = 0.026(c + w + a) + 103.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 6.15$	∞		0.9293
$f_{css} = -0.005(c + w + a) + 79.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 14.5$	∞		0.8778
$f_{cs\phi} = 0.049(c + w + a) + 89.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 0.60$	∞		0.8985
$T_s = -0.0017(c + w + a) + 2.93 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 0.07$	∞		0.8526

Tablo C.16. 365 günlük numunelerde F4 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.286(c + w + a) + 234.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 2127$	1.00	2.14	0.9378
$V_c = -0.004(c + w + a) + 1.112 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 6.89$	7.04		0.9914
$V_s = -0.003(c + w + a) + 0.934 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 6.54$	7.08		0.9820
$S = -0.025(c + w + a) + 15.64 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 72.9$	10.4		0.9502
$E = -56.5(c + w + a) + 27688 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 71130$	5.92		0.9568
$f_{cc} = -0.046(c + w + a) + 97.5 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 218.5$	18.8		0.9631
$f_{cs} = -0.010(c + w + a) + 112.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 243.6$	24.2		0.9680
$f_{css} = 0.030(c + w + a) + 94.7 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 143.1$	14.3		0.9513
$f_{cs\varphi} = -0.0063(c + w + a) + 109.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 235$	23.2	2.14	0.9596
$T_s = 0.001(c + w + a) + 0.345 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 1.90$	∞		0.6755

Tablo C.17. 7 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.353(c+w+a) - 2.53[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 45.3m + 2362$	1.00	1.80	0.9915
$V_c = 0.0007(c+w+a) - 0.0038[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.20m + 4.53$	0.64		0.9836
$V_s = 0.001(c+w+a) - 0.005[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.004m + 6.09$	1.40		0.9838
$S = 0.039(c+w+a) - 0.097[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.44m + 43.9$	1.05		0.9446
$E = 0.885(c+w+a) - 180.8[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 2522.4m + 81670$	1.39		0.9757
$f_{cc} = 0.273(c+w+a) - 0.405[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 6.90m - 6.55$	0.87		0.9773
$f_{cs} = 0.260(c+w+a) - 0.382[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.29m + 49.8$	1.70		0.9674
$f_{css} = 0.176(c+w+a) - 0.235[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.461m + 39.2$	1.96		0.9403
$f_{cs\varphi} = 0.194(c+w+a) - 0.324[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 4.36m + 81.4$	2.02		0.9473
$T_s = 0.0024(c+w+a) - 0.015[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.155m + 2.86$	0.01		0.6989

Tablo C.18. 14 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.132(c+w+a) - 2.73[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 18.1m + 2548$	1.00	1.81	0.9965
$V_c = 0.0001(c+w+a) - 0.0033[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.146m + 5.15$	1.38		0.9902
$V_s = -0.001(c+w+a) - 0.0034[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.04m + 5.85$	1.59		0.9859
$S = 0.035(c+w+a) - 0.104[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 1.42m + 68.8$	1.28		0.9391
$E = 26.1(c+w+a) - 140.1[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 1038.8m + 53083$	1.41		0.9824
$f_{cc} = 0.087(c+w+a) - 0.35[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 6.83m + 137.8$	1.84		0.9560
$f_{cs} = 0.179(c+w+a) - 0.245[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.91m + 53.4$	1.94		0.9300
$f_{css} = 0.092(c+w+a) - 0.244[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 6.51m + 106.5$	2.50		0.9181
$f_{cs\varphi} = 0.145(c+w+a) - 0.219[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 2.57m + 81.7$	2.64		0.9164
$T_s = 0.011(c+w+a) - 0.008(a) + 0.865m - 2.51$	0		0.7408

Tablo C.19. 28 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.135(c+w+a) - 2.91[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 11.9m - 2609$	1.00	1.75	0.9804
$V_c = 0.001(c+w+a) - 0.0029[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.180m + 4.90$	2.17		0.9633
$V_s = 0.001(c+w+a) - 0.0007[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.168m + 4.84$	8.92		0.9504
$S = 0.01(c+w+a) - 0.100[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.814m + 66.4$	1.43		0.9434
$E = -12.56(c+w+a) - 170.5[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 2670.3m + 93980$	1.74		0.9663
$f_{cc} = 0.281(c+w+a) - 0.228[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 5.83m + 16.8$	2.59		0.9445
$f_{cs} = 0.233(c+w+a) - 0.264[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 7.16m + 140.8$	4.58		0.9429
$f_{css} = 0.11(c+w+a) - 0.277[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 11.05m + 167.0$	3.78		0.8993
$f_{cs\zeta} = 0.117(c+w+a) - 0.266[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 17.2m + 232.9$	5.31		0.9356
$T_s = 0.007(c+w+a) - 0.008[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.362m + 9.81$	7.12		0.8666

Tablo C.20. 365 günlük numunelerde F5 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.572(c+w+a) - 2.05[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 63.7m + 2040$	1.00		0.9795
$V_c = 0.0005(c+w+a) - 0.0047[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.138m + 5.29$	2.57		0.9964
$V_s = 0.002(c+w+a) - 0.0045[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 0.06m + 5.68$	2.76		0.9903
$S = 0.023(c+w+a) - 0.058[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 1.06m + 53.5$	3.90		0.9600
$E = -11.71(c+w+a) - 189.5[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 2134.9m + 88500$	2.93		0.9725
$f_{cc} = 0.323(c+w+a) - 0.234[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 12.7m - 20.4$	4.79		0.9660
$f_{cs} = 0.391(c+w+a) - 0.305[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 9.86m - 15.3$	5.07		0.9761
$f_{css} = 0.344(c+w+a) - 0.342[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 7.30m - 18.8$	3.77		0.9611
$f_{cs\zeta} = 0.419(c+w+a) - 0.245[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] + 14.5m - 60.9$	5.18		0.9664
$T_s = 0.004(c+w+a) - 0.005[n_i^*\{w-(p-1)\alpha c\}+a] - 0.173m + 5.95$	11.2		0.6874

Tablo C.21. 7 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.528(c+w+a) + 241.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 46.1m + 2299$	1.00	1.80	0.9866
$V_c = -0.0017(c+w+a) + 0.425 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.121m + 5.29$	1.20		0.9853
$V_s = -0.005(c+w+a) + 0.791 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 0.06m + 7.44$	3.16		0.9825
$S = -0.026(c+w+a) + 13.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 0.87m + 65.5$	2.21		0.9398
$E = -129.2(c+w+a) + 28390 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 4510m + 126840$	3.05		0.9702
$f_{cc} = 0.014(c+w+a) + 50.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.59m + 72.8$	1.55		0.9776
$f_{cs} = -0.092(c+w+a) + 74.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 6.48m + 221.3$	5.35		0.9672
$f_{css} = -0.077(c+w+a) + 52.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 5.25m + 190.2$	9.20		0.9423
$f_{cs\phi} = -0.153(c+w+a) + 73.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 10.4m + 295.0$	10.5		0.9476
$T_s = -0.0071(c+w+a) + 0.180 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w-(p-1)\alpha c\} + a} \right] - 0.533m + 7.29$	0.07		0.8080

Tablo C.22. 14 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.676(c+w+a) + 262.8 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 23.4m + 2386$	1.00	1.81	0.9915
$V_c = -0.0020(c+w+a) + 0.552 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.126m + 5.82$	3.51		0.9898
$V_s = -0.0031(c+w+a) + 0.609 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.02m + 6.93$	4.22		0.9859
$S = -0.062(c+w+a) + 16.93 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 2.22m + 92.2$	3.55		0.9381
$E = -54.4(c+w+a) + 22480 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 449.9m + 75375$	3.16		0.9825
$f_{cc} = -0.179(c+w+a) + 72.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 9.07m + 269.2$	6.96		0.9494
$f_{cs} = -0.025(c+w+a) + 54.3 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 0.99m + 173.4$	9.79		0.9235
$f_{css} = -0.142(c+w+a) + 65.1 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 8.35m + 295.3$	22.3		0.9154
$f_{cs\zeta} = -0.078(c+w+a) + 65.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 4.24m + 310.8$	52.0		0.9142
$T_s = 0.0052(c+w+a) + 1.88 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.741m - 1.05$	4.19		0.7173

Tablo C.23. 28 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = -0.449(c+w+a) + 275.0 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 32.6m + 2292$	1.00	1.75	0.9631
$V_c = -0.0013(c+w+a) + 0.780 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.153m + 6.09$	5.49		0.9589
$V_s = -0.0018(c+w+a) + 0.763 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] + 0.107m + 4.91$	∞		0.9456
$S = -0.0667(c+w+a) + 22.56 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 2.49m + 100.1$	3.39		0.9425
$E = -158.0(c+w+a) + 43910 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 5500m + 168750$	4.66		0.9591
$f_{cc} = -0.0045(c+w+a) + 85.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.045m + 245.9$	12.3		0.9428
$f_{cs} = -0.335(c+w+a) + 169.2 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] - 20.1m + 172.9$	∞		0.9397
$f_{css} = -0.412(c+w+a) + 153.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] - 22.7m + 202.6$	∞		0.9015
$f_{cs\phi} = -0.563(c+w+a) + 200.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] - 34.1m + 282.1$	∞		0.9270
$T_s = -0.019(c+w+a) + 4.74 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{\{w - (p-1)\alpha c\}} \right] - 0.97m + 6.64$	∞		0.8670

Tablo C.24. 365 günlük numunelerde F6 fonksiyonuna göre bulunan bağıntılar

Bağıntı	n_i^*	p	Korelasyon Katsayısı (r)
$\Delta = 0.457(c+w+a) + 115.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 80.3m + 1730$	1.00	2.14	0.9683
$V_c = -0.0020(c+w+a) + 0.855 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.096m + 5.80$	6.05		0.9927
$V_s = -0.0020(c+w+a) + 0.832 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.04m + 6.10$	6.64		0.9823
$S = -0.013(c+w+a) + 13.66 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 0.74m + 64.1$	10.0		0.9507
$E = -123.8(c+w+a) + 38530 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] - 4058m + 117370$	7.17		0.9610
$f_{cc} = 0.092(c+w+a) + 75.4 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 8.27m + 119.7$	20.4		0.9645
$f_{cs} = 0.172(c+w+a) + 86.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 9.77m + 132.9$	30.4		0.9692
$f_{css} = 0.161(c+w+a) + 73.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 7.90m + 48.9$	14.3		0.9524
$f_{cs\zeta} = 0.241(c+w+a) + 68.6 \ln \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 15.9m - 184.4$	∞		0.9611
$T_s = 0.016(c+w+a) - 0.07 \left[\frac{p\alpha c + 0.12(1-\alpha)c}{n_i^* \{w - (p-1)\alpha c\} + a} \right] + 1.05m - 4.64$	0.19		0.6718

Tablo C.25. 7, 14, 28 ve 365 günlük numunelerde özellikler ile değişkenler arasındaki maksimum korelasyon katsayıları, $R(n_i^*)$

Fonksiyon (F)	7 Günlük Betonlar									
	Δ	V_c	V_s	S	E	f_{cc}	f_{cs}	f_{css}	$f_{csç}$	T_s
F1	0.9980	0.9542	0.9732	0.8689	0.9565	0.8513	0.8144	0.7861	0.7794	0.6899
F2	0.8318	0.8931	0.9000	0.9355	0.9413	0.9775	0.9656	0.9404	0.9430	0.7670
F3	0.9880	0.9755	0.9838	0.9444	0.9735	0.9751	0.9674	0.9403	0.9464	0.6941
F4	0.9832	0.9827	0.9819	0.9392	0.9648	0.9776	0.9661	0.9408	0.9441	0.7829
F5	0.9915	0.9836	0.9838	0.9446	0.9757	0.9773	0.9674	0.9403	0.9473	0.6989
F6	0.9866	0.9853	0.9825	0.9398	0.9702	0.9776	0.9672	0.9423	0.9476	0.8080
14 Günlük Betonlar										
F1	0.9948	0.9510	0.9560	0.9161	0.9785	0.8317	0.7802	0.7420	0.7622	0.6622
F2	0.8896	0.8589	0.8742	0.9087	0.9489	0.9342	0.9232	0.8983	0.9102	0.5749
F3	0.9948	0.9784	0.9849	0.9344	0.9815	0.9469	0.9298	0.9071	0.9148	0.6682
F4	0.9886	0.9822	0.9856	0.9259	0.9823	0.9344	0.9233	0.8991	0.9102	0.6463
F5	0.9965	0.9902	0.9859	0.9391	0.9824	0.9560	0.9300	0.9181	0.9164	0.7408
F6	0.9915	0.9898	0.9859	0.9381	0.9825	0.9494	0.9235	0.9154	0.9142	0.7173
28 Günlük Betonlar										
F1	0.9799	0.9496	0.9225	0.9130	0.9586	0.7187	0.6636	0.6711	0.6241	0.6984
F2	0.8406	0.8762	0.7845	0.9120	0.9006	0.9427	0.9277	0.8777	0.8918	0.8494
F3	0.9802	0.9536	0.9374	0.9423	0.9622	0.9423	0.9409	0.8909	0.9225	0.8642
F4	0.9610	0.9546	0.9421	0.9357	0.9485	0.9428	0.9293	0.8778	0.8984	0.8526
F5	0.9804	0.9633	0.9504	0.9434	0.9663	0.9445	0.9429	0.8993	0.9356	0.8666
F6	0.9631	0.9589	0.9456	0.9425	0.9591	0.9428	0.9397	0.9015	0.9270	0.8760
365 Günlük Betonlar										
F1	0.9574	0.9828	0.9798	0.9493	0.9730	0.9113	0.8876	0.8654	0.8780	0.6043
F2	0.9190	0.9173	0.9080	0.9274	0.9429	0.9612	0.9679	0.9506	0.9596	0.6731
F3	0.9616	0.9921	0.9890	0.9585	0.9707	0.9610	0.9742	0.9597	0.9657	0.6864
F4	0.9378	0.9914	0.9820	0.9502	0.9568	0.9631	0.9680	0.9513	0.9596	0.6755
F5	0.9795	0.9964	0.9903	0.9600	0.9725	0.9660	0.9761	0.9611	0.9664	0.6874
F6	0.9683	0.9927	0.9823	0.9507	0.9610	0.9645	0.9692	0.9524	0.9611	0.6718

Tablo C.26. F1 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9980	0.9880	1	1
V_c	0.9542	0.9499	0,74	1,005
V_s	0.9732	0.9731	0,97	1,000
S	0.8689	0.7992	3,06	1,087
E	0.9565	0.9404	1,78	1,019
f_{cc}	0.8513	0.7462	5,05	1,141
f_{cs}	0.8144	0.5641	∞	1,444
f_{css}	0.7861	0.5038	∞	1,560
$f_{cs\check{c}}$	0.7794	0.4849	∞	1,607
T_s	0.6899	0.6447	0,15	1,128
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
Δ	0.9948	0.9948	1	1
V_c	0.9510	0.9453	1,38	1,006
V_s	0.9560	0.9560	0,98	1,000
S	0.9161	0.9108	1,39	1,006
E	0.9785	0.9624	1,89	1,017
f_{cc}	0.8317	0.7268	4,46	1,144
f_{cs}	0.7802	0.4845	21,1	1,600
f_{css}	0.7420	0.4933	15,5	1,504
$f_{cs\check{c}}$	0.7622	0.3248	∞	2,347
T_s	0.6622	0.5625	4,16	1,177
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
Δ	0.9799	0.9799	1	1
V_c	0.9496	0.9394	1,72	1,011
V_s	0.9225	0.8966	2,35	1,029
S	0.9130	0.8881	2,33	1,028
E	0.9586	0.9457	1,95	1,014
f_{cc}	0.7187	0.4917	∞	1,462
f_{cs}	0.6636	0.3301	∞	2,010
f_{css}	0.6711	0.3731	∞	1,799
$f_{cs\check{c}}$	0.6241	0.2384	∞	2,618
T_s	0.6984	0.3731	∞	1,872
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
Δ	0.9574	0.9574	1	1
V_c	0.9828	0.9567	1,97	1,027
V_s	0.9798	0.9543	1,95	1,027
S	0.9493	0.7432	6,69	1,277
E	0.9730	0.8984	3,41	1,083
f_{cc}	0.9113	0.5044	∞	1,806
f_{cs}	0.8876	0.3901	∞	2,275
f_{css}	0.8654	0.3951	∞	2,190
$f_{cs\check{c}}$	0.8780	0.4727	∞	1,857
T_s	0.6043	0.1512	∞	3,997

Tablo C.27. F2 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.8318	0.8318	1	1
V_c	0.8931	0.6961	0,03	1,2830
V_s	0.9000	0.7542	0,08	1,1933
S	0.9355	0.9345	1,15	1,0011
E	0.9413	0.9176	0,50	1,0257
f_{cc}	0.9775	0.9625	1,73	1,0157
f_{cs}	0.9656	0.8731	5,92	1,1060
f_{css}	0.9404	0.8238	10,44	1,1415
f_{csc}	0.9430	0.8158	14,30	1,1559
T_s	0.7670	0.5623	0	1,364
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
Δ	0.8896	0.8896	1	1
V_c	0.8589	0.7866	0,15	1,0919
V_s	0.8742	0.7684	0,11	1,1377
S	0.9087	0.8971	0,59	1,0130
E	0.9489	0.9403	0,61	1,0092
f_{cc}	0.9342	0.8858	2,37	1,0547
f_{cs}	0.9232	0.7232	7,26	1,2765
f_{css}	0.8983	0.7251	6,19	1,2389
f_{csc}	0.9102	0.5912	13,56	1,5395
T_s	0.5749	0.5470	2,36	1,0510
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
Δ	0.8406	0.8406	1	1
V_c	0.8762	0.7992	0,01	1,0964
V_s	0.7845	0.7359	0,23	1,0661
S	0.9120	0.9078	0,75	1,0046
E	0.9006	0.8713	0,39	1,0337
f_{cc}	0.9427	0.7852	10,72	1,2007
f_{cs}	0.9277	0.6518	∞	1,4234
f_{css}	0.8777	0.6538	∞	1,3425
f_{csc}	0.8918	0.5672	∞	1,5723
T_s	0.8494	0.6504	∞	1,3059
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
Δ	0.9190	0.9190	1	1
V_c	0.9173	0.9153	0,80	1,0022
V_s	0.9080	0.9057	0,78	1,0026
S	0.9274	0.8336	3,16	1,1125
E	0.9429	0.9059	1,72	1,0210
f_{cc}	0.9612	0.6449	10,70	1,4904
f_{cs}	0.9679	0.5517	28,70	1,7543
f_{css}	0.9506	0.5576	22,10	1,7047
f_{csc}	0.9596	0.6182	21,20	1,5523
T_s	0.6731	0.2541	∞	2,6488

Tablo C.28. F3 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9880	0.9880	1	1
V_c	0.9755	0.9737	1,30	1,002
V_s	0.9838	0.9802	1,41	1,004
S	0.9444	0.9439	1,11	1,001
E	0.9735	0.9721	1,20	1,001
f_{cc}	0.9751	0.9747	1,11	1,000
f_{cs}	0.9674	0.9587	1,69	1,009
f_{css}	0.9403	0.9278	1,95	1,013
$f_{csç}$	0.9464	0.9351	1,90	1,012
T_s	0.6941	0.6519	0,05	1,065
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
Δ	0.9948	0.9948	1	1
V_c	0.9784	0.9531	2,62	1,027
V_s	0.9849	0.9751	1,92	1,010
S	0.9344	0.9339	0,88	1,001
E	0.9815	0.9717	1,63	1,010
f_{cc}	0.9469	0.9445	1,27	1,003
f_{cs}	0.9298	0.9087	2,04	1,023
f_{css}	0.9071	0.8952	1,73	1,013
$f_{csç}$	0.9148	0.8822	2,34	1,037
T_s	0.6682	0.6290	2,94	1,062
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
Δ	0.9802	0.9802	1	1
V_c	0.9536	0.9394	2,12	1,015
V_s	0.9374	0.8976	3,83	1,044
S	0.9423	0.9393	1,37	1,003
E	0.9622	0.9544	1,68	1,008
f_{cc}	0.9423	0.9238	2,47	1,020
f_{cs}	0.9409	0.8962	5,72	1,050
f_{css}	0.8909	0.8467	5,23	1,059
$f_{csç}$	0.9225	0.8613	14,9	1,071
T_s	0.8642	0.7893	11,50	1,095
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
Δ	0.9616	0.9616	1	1
V_c	0.9921	0.9585	2,98	1,035
V_s	0.9890	0.9560	2,97	1,035
S	0.9585	0.8985	3,97	1,067
E	0.9707	0.9376	2,74	1,035
f_{cc}	0.9610	0.9042	4,62	1,063
f_{cs}	0.9742	0.9230	4,88	1,055
f_{css}	0.9597	0.9210	3,87	1,042
$f_{csç}$	0.9657	0.9142	4,94	1,056
T_s	0.6864	0.6287	15,6	1,092

Tablo C.29. F4 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9832	0.9832	1	1
V_c	0.9827	0.9790	2,13	1,0038
V_s	0.9819	0.9750	2,59	1,0070
S	0.9392	0.9345	1,88	1,0050
E	0.9648	0.9603	1,90	1,0047
f_{cc}	0.9776	0.9748	1,67	1,0028
f_{cs}	0.9661	0.9525	4,29	1,0143
f_{css}	0.9408	0.9225	6,60	1,0199
$f_{csç}$	0.9441	0.9271	6,33	1,0184
T_s	0.7829	0.7112	0,01	1,1008
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9886	0.9886	1	1
V_c	0.9822	0.9464	20,4	1,0378
V_s	0.9856	0.9711	5,50	1,0150
S	0.9259	0.9229	1,61	1,0032
E	0.9823	0.9660	3,60	1,0169
f_{cc}	0.9344	0.9214	2,57	1,0140
f_{cs}	0.9233	0.8760	8,28	1,0540
f_{css}	0.8991	0.8720	4,62	1,0311
$f_{csç}$	0.9102	0.8445	13,6	1,0777
T_s	0.6463	0.5483	∞	1,1788
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9610	0.9610	1	1
V_c	0.9546	0.9299	6,44	1,0266
V_s	0.9421	0.8790	∞	1,0718
S	0.9357	0.9246	2,59	1,0121
E	0.9485	0.9328	3,56	1,0168
f_{cc}	0.9428	0.9100	12,30	1,0361
f_{cs}	0.9293	0.8680	∞	1,0706
f_{css}	0.8778	0.8167	∞	1,0748
$f_{csç}$	0.8984	0.8288	∞	1,0842
T_s	0.8526	0.7687	∞	1,1091
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_{i=n_i^*}$	$(SD2)_i$
Δ	0.9378	0.9378	1	1
V_c	0.9914	0.9403	7,04	1,0543
V_s	0.9820	0.9315	7,08	1,0542
S	0.9502	0.8771	10,4	1,0833
E	0.9568	0.9078	5,92	1,0541
f_{cc}	0.9631	0.8771	18,8	1,0981
f_{cs}	0.9680	0.8897	24,2	1,0880
f_{css}	0.9513	0.8856	14,3	1,0741
$f_{csç}$	0.9596	0.8726	23,2	1,0998
T_s	0.6755	0.5775	∞	1,1697

Tablo C.30. F5 fonksiyonuna göre bulunan $(SD1)_i$ ve $(SD2)_i$ ' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	$R(n_i^*)$	$R(n=1)$	$(SD1)_i=n_i^*$	$(SD2)_i$
Δ	0.9915	0.9915	1	1
V_c	0.9836	0.9828	0,64	1,0008
V_s	0.9838	0.9819	1,40	1,0019
S	0.9446	0.9445	1,05	1,0001
E	0.9757	0.9722	1,39	1,0036
f_{cc}	0.9773	0.9771	0,87	1,0002
f_{cs}	0.9674	0.9624	1,70	1,0052
f_{css}	0.9403	0.9328	1,96	1,0080
$f_{csç}$	0.9473	0.9375	2,02	1,0105
T_s	0.6989	0.6534	0,01	1,0696
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
Δ	0.9965	0.9965	1	1
V_c	0.9902	0.9896	1,38	1,0006
V_s	0.9859	0.9842	1,59	1,0017
S	0.9391	0.9378	1,28	1,0014
E	0.9824	0.9805	1,41	1,0019
f_{cc}	0.9560	0.9451	1,84	1,0115
f_{cs}	0.9300	0.9226	1,94	1,0080
f_{css}	0.9191	0.8954	2,50	1,0254
$f_{csç}$	0.9164	0.8939	2,64	1,0252
T_s	0.7408	0.7357	0	1,0069
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
Δ	0.9804	0.9804	1	1
V_c	0.9633	0.9591	2,17	1,0044
V_s	0.9504	0.9337	8,92	1,0179
S	0.9434	0.9393	1,43	1,0044
E	0.9663	0.9548	1,74	1,0120
f_{cc}	0.9445	0.9339	2,59	1,0114
f_{cs}	0.9429	0.8988	4,58	1,0491
f_{css}	0.8993	0.8467	3,78	1,0621
$f_{csç}$	0.9356	0.8613	5,31	1,0863
T_s	0.8666	0.7947	7,12	1,0905
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
Δ	0.9795	0.9795	1	1
V_c	0.9964	0.9910	2,57	1,0054
V_s	0.9903	0.9813	2,76	1,0092
S	0.9600	0.9423	3,90	1,0188
E	0.9725	0.9490	2,93	1,0248
f_{cc}	0.9660	0.9550	4,79	1,0116
f_{cs}	0.9761	0.9623	5,07	1,0143
f_{css}	0.9611	0.9505	3,77	1,0112
$f_{csç}$	0.9664	0.9561	5,18	1,0108
T_s	0.6874	0.6538	11,19	1,0514

Tablo C.31. F6 fonksiyonuna göre bulunan (SD1)_i ve (SD2)_i' ler ile bunlara ait korelasyon katsayıları

P_{hi} Özeliği	7 Günlük Betonlar			
	R(n_i[*])	R(n=1)	(SD1)_{i=n_i[*]}	(SD2)_i
Δ	0.9866	0.9866	1	1
V _c	0.9853	0.9852	1,20	1,0001
V _s	0.9825	0.9767	3,16	1,0060
S	0.9398	0.9353	2,21	1,0048
E	0.9702	0.9603	3,05	1,0103
f _{cc}	0.9776	0.9763	1,55	1,0013
f _{cs}	0.9672	0.9564	5,35	1,0112
f _{css}	0.9423	0.9279	9,20	1,0155
f _{csç}	0.9476	0.9301	10,5	1,0188
T _s	0.8080	0.7365	0,07	1,0970
P_{hi}	14 Günlük Betonlar			
	R(n_i[*])	R(n=1)	(SD1)_{i=n_i[*]}	(SD2)_i
Δ	0.9915	0.9915	1	1
V _c	0.9898	0.9873	3,51	1,0026
V _s	0.9859	0.9821	4,22	1,0039
S	0.9381	0.9250	3,55	1,0142
E	0.9825	0.9773	3,16	1,0053
f _{cc}	0.9494	0.9215	6,96	1,0303
f _{cs}	0.9235	0.8979	9,79	1,0284
f _{css}	0.9154	0.8733	22,3	1,0482
f _{csç}	0.9142	0.8667	52,0	1,0548
T _s	0.7173	0.7091	4,19	1,0115
P_{hi}	28 Günlük Betonlar			
	R(n_i[*])	R(n=1)	(SD1)_{i=n_i[*]}	(SD2)_i
Δ	0.9631	0.9631	1	1
V _c	0.9589	0.9542	5,49	1,0050
V _s	0.9456	0.9305	∞	1,0162
S	0.9425	0.9246	3,39	1,0193
E	0.9591	0.9329	4,66	1,0281
f _{cc}	0.9428	0.9257	12,3	1,0185
f _{cs}	0.9397	0.8814	∞	1,0665
f _{css}	0.9015	0.8216	∞	1,0973
f _{csç}	0.9270	0.8354	∞	1,1096
T _s	0.8760	0.7833	∞	1,1068
P_{hi}	365 Günlük Betonlar			
	R(n_i[*])	R(n=1)	(SD1)_{i=n_i[*]}	(SD2)_i
Δ	0.9683	0.9683	1	1
V _c	0.9927	0.9853	6,05	1,0075
V _s	0.9823	0.9719	6,64	1,0107
S	0.9507	0.9366	10,0	1,0151
E	0.9610	0.9319	7,17	1,0312
f _{cc}	0.9645	0.9508	20,4	1,0144
f _{cs}	0.9692	0.9570	30,4	1,0128
f _{css}	0.9524	0.9417	14,3	1,0113
f _{csç}	0.9611	0.9527	∞	1,0088
T _s	0.6718	0.6652	0,19	1,0100

Tablo C.32. 7 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij})

Özellik Çifti	Bağıntı	r_{ij}
Δ -Vc	$\Delta=438.4V_c+80.2$	0.9388
Δ -Vs	$\Delta=482.4V_s-73.5$	0.9625
Δ -S	$\Delta=25.2S+1131.9$	0.8046
Δ -fcc	$\Delta=5.13fcc+1946$	0.7410
Δ -fcs	$\Delta=3.35fcs+2081$	0.5644
Δ -fcss	$\Delta=4.31fcss+2096$	0.5100
Δ -fcsc	$\Delta=3.26fcsc+2105$	0.4900
Δ -E	$\Delta=83.6E^{0.312}$	0.9320
Δ -Ts	$\Delta=453.6\ln(T_s)+1700$	0.6431
Vc-Vs	$V_c=1.04V_s-0.06$	0.9699
Vc-S	$V_c=1.04S^{0.412}$	0.6742
Vc-fcc	$V_c=0.008fcc+4.49$	0.5651
Vc-fcs	$V_c=0.004fcs+4.82$	0.3470
Vc-fcss	$V_c=0.005fcss+4.82$	0.2862
Vc-fcsc	$V_c=0.004fcsc+4.84$	0.2651
Vc-E	$V_c=0.287E^{0.270}$	0.8301
Vc-Ts	$V_c=1.02\ln(T_s)+3.71$	0.6781
Vs-S	$V_s=0.99S^{0.4156}$	0.7098
Vs-fcc	$V_s=0.009fcc+4.33$	0.6168
Vs-fcs	$V_s=0.005fcs+4.59$	0.4195
Vs-fcss	$V_s=0.006fcss+4.64$	0.3527
Vs-fcsc	$V_s=0.004fcsc+4.66$	0.3311
Vs-E	$V_s=0.264E^{0.275}$	0.8830
Vs-Ts	$V_s=0.903\ln(T_s)+3.72$	0.6415
S-fcc	$S=14.33\ln(fcc)-14.1$	0.9586
S-fcs	$S=10.64\ln(fcs)+2.02$	0.8761
S-fcss	$S=10.55\ln(fcsc)+5.78$	0.8393
S-fcsc	$S=10.44\ln(fcsc)+3.80$	0.8390
S-E	$S=21.81\ln(E)-185.4$	0.8936
S-Ts	$S=2.57T_s+36.6$	0.4496
fcc-fcs	$fcc=0.82fcs+15.3$	0.9556
fcc-fcss	$fcc=52.54\ln(fcsc)-132.9$	0.9230
fcc-fcsc	$fcc=52.0\ln(fcsc)-142.9$	0.9233
fcc-E	$fcc=0.002E-25.9$	0.8495
fcc-Ts	$fcc=11.22T_s+26.5$	0.4331
fcs-fcss	$fcs=1.27fcsc^{1.021}$	0.9866
fcs-fcsc	$fcs=1.02fcsc^{1.02}$	0.9923
fcs-E	$fcs=0.002E-28.3$	0.7204
fcs-Ts	$fcs=7.89T_s+35.6$	0.2612
fcsc-fcsc	$fcsc=0.87fcsc^{0.98}$	0.9877
fcsc-E	$fcsc=0.002E-13.1$	0.6613
fcsc-Ts	$fcsc=4.79T_s+29.3$	0.2256
fcsc-E	$fcsc=0.002E-15.9$	0.6518
fcsc-Ts	$fcsc=5.39T_s+39.5$	0.2000
E-Ts	$E=5202T_s+21551$	0.5435

Tablo C.33. 14 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij})

Özellik Çifti	Bağıntı	r_{ij}
Δ -Vc	$\Delta=468.9V_c+101.8$	0.9533
Δ -Vs	$\Delta=519.8V_s-292.3$	0.9561
Δ -S	$\Delta=20.1S+925.6$	0.9049
Δ -fcc	$\Delta=489.6\ln(fcc)+195.4$	0.7113
Δ -fcs	$\Delta=4.59fcs+1973$	0.4847
Δ -fcss	$\Delta=4.78fcss+2044$	0.4639
Δ -fcsc	$\Delta=3.24fcsc+2078$	0.3203
Δ -E	$\Delta=782.6\ln(E)-6039$	0.9547
Δ -Ts	$\Delta=438.1\ln(Ts)+1663$	0.6035
Vc-Vs	$V_c=0.972V_s^{1.03}$	0.9620
Vc-S	$V_c=3.09e^{0.0103S}$	0.8309
Vc-fcc	$V_c=0.863\ln(fcc)+1.41$	0.6169
Vc-fcs	$V_c=0.555\ln(fcs)+2.76$	0.4127
Vc-fcss	$V_c=0.425\ln(fcsc)+3.43$	0.3834
Vc-fcsc	$V_c=0.361\ln(fcsc)+3.59$	0.2674
Vc-E	$V_c=1.54\ln(E)-11.29$	0.9230
Vc-Ts	$V_c=0.923\ln(Ts)+3.78$	0.6252
Vs-S	$V_s=0.829S^{0.4612}$	0.8346
Vs-fcc	$V_s=0.705\ln(fcc)+1.95$	0.5570
Vs-fcs	$V_s=0.383\ln(fcs)+3.35$	0.3150
Vs-fcss	$V_s=0.286\ln(fcsc)+3.85$	0.2850
Vs-fcsc	$V_s=0.245\ln(fcsc)+3.95$	0.1960
Vs-E	$V_s=1.35\ln(E)-9.42$	0.8959
Vs-Ts	$V_s=4.05Ts^{0.143}$	0.5308
S-fcc	$S=17.78\ln(fcc)-27.5$	0.8017
S-fcs	$S=0.194fcs+35.2$	0.6358
S-fcss	$S=0.216fcsc+37.5$	0.6496
S-fcsc	$S=0.162fcsc+38.1$	0.5053
S-E	$S=23.81\ln(E)-204.9$	0.9007
S-Ts	$S=13.76\ln(Ts)+28.9$	0.5882
fcc-fcs	$fcc=30.37e^{0.013fcs}$	0.9083
fcc-fcss	$fcc=1.023fcsc+19.89$	0.9057
fcc-fcsc	$fcc=34.81e^{0.011fcsc}$	0.8674
fcc-E	$fcc=27.48e^{0.00002E}$	0.8164
fcc-Ts	$fcc=25.97Ts^{0.7143}$	0.6770
fcs-fcss	$fcs=54.95\ln(fcsc)-146.8$	0.9446
fcs-fcsc	$fcs=61.13\ln(fcsc)-185.0$	0.9811
fcs-E	$fcs=0.0013E-15.05$	0.6310
fcs-Ts	$fcs=50.9\ln(Ts)+3.60$	0.6639
fcsc-fcsc	$fcsc=48.34\ln(fcsc)+150.0$	0.9587
fcsc-E	$fcsc=0.0012E-1.57$	0.6332
fcsc-Ts	$fcsc=16.69Ts^{0.7816}$	0.5869
fcsc-E	$fcsc=0.001E-23.3$	0.4796
fcsc-Ts	$fcsc=10.72Ts+18.4$	0.6204
E-Ts	$E=17721Ts^{0.601}$	0.6795

Tablo C.34. 28 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij})

Özellik Çifti	Bağıntı	r_{ij}
Δ -Vc	$\Delta=1999\ln(Vc)-960$	0.9253
Δ -Vs	$\Delta=3252\ln(Vs)-1468$	0.9122
Δ -S	$\Delta=1411\ln(S)-3196$	0.8829
Δ -fcc	$\Delta=3.05fcc+2096$	0.5039
Δ -fcs	$\Delta=1.79fcs+2193$	0.3792
Δ -fcss	$\Delta=2.66fcss+2173$	0.4324
Δ -fcsc	$\Delta=1.49fcsc+2220$	0.3045
Δ -E	$\Delta=770.2\ln(E)-5932$	0.9412
Δ -Ts	$\Delta=185.2\ln(Ts)+2044$	0.4134
Vc-Vs	$Vc=1.171Vs-0.70$	0.9514
Vc-S	$Vc=3.22\ln(S)-7.44$	0.8430
Vc-fcc	$Vc=0.007fcc+4.66$	0.4741
Vc-fcs	$Vc=0.004fcs+4.90$	0.3295
Vc-fcss	$Vc=0.005fcss+4.89$	0.3666
Vc-fcsc	$Vc=0.003fcsc+4.96$	0.2490
Vc-E	$Vc=3.656e^{0.00001E}$	0.9006
Vc-Ts	$Vc=0.0084Ts+4.79$	0.3562
Vs-S	$Vs=2.614\ln(S)-5.22$	0.8416
Vs-fcc	$Vs=0.005fcc+4.60$	0.4557
Vs-fcs	$Vs=0.003fcs+4.78$	0.3550
Vs-fcss	$Vs=0.005fcss+4.74$	0.4036
Vs-fcsc	$Vs=0.003fcsc+4.82$	0.2924
Vs-E	$Vs=1.353\ln(E)-9.49$	0.8502
Vs-Ts	$Vs=0.321\ln(Ts)+4.53$	0.3686
S-fcc	$S=0.131fcc+40.3$	0.6881
S-fcs	$S=0.08fcs+44.2$	0.5396
S-fcss	$S=0.117fcss+43.5$	0.6040
S-fcsc	$S=0.073fcsc+45.1$	0.4711
S-E	$S=31.43e^{0.00001S}$	0.8935
S-Ts	$S=7.86\ln(Ts)+39.2$	0.5577
fcc-fcs	$fcc=3.698fcs^{0.7014}$	0.9293
fcc-fcss	$fcc=52.06\ln(fcsc)-134.4$	0.8975
fcc-fcsc	$fcc=4.79fcsc^{0.653}$	0.8859
fcc-E	$fcc=0.002E-12.4$	0.6305
fcc-Ts	$fcc=21.55Ts^{0.8175}$	0.8212
fcs-fcss	$fcs=68.94\ln(fcsc)-204.1$	0.9260
fcs-fcsc	$fcs=70.65\ln(fcsc)-222.7$	0.9863
fcs-E	$fcs=20.9e^{0.00003E}$	0.4988
fcs-Ts	$fcs=13.32Ts^{1.1143}$	0.8449
fcsc-fcss	$fcsc=1.404fcsc^{0.8756}$	0.9770
fcsc-E	$fcsc=15.06e^{0.00003E}$	0.5462
fcsc-Ts	$fcsc=12.09Ts^{1.009}$	0.7900
fcsc-E	$fcsc=22.29e^{0.00002E}$	0.4175
fcsc-Ts	$fcsc=22.25e^{0.2365Ts}$	0.8072
E-Ts	$E=13015\ln(Ts)+25729$	0.5321

Tablo C.35. 365 günlük numunelerde özellikler arasındaki bağıntılar ve korelasyon katsayıları, (r_{ij})

Özellik Çifti	Bağıntı	r_{ij}
Δ -Vc	$\Delta=1769\ln(Vc)-624$	0.9846
Δ -Vs	$\Delta=2003\ln(Vs)-971$	0.9661
Δ -S	$\Delta=1187\ln(S)-2421$	0.8238
Δ -fcc	$\Delta=216.0\ln(fcc)+1351$	0.6314
Δ -fcs	$\Delta=146.9\ln(fcs)+1351$	0.5194
Δ -fcss	$\Delta=149.6\ln(fcsc)+1660$	0.5195
Δ -fcsc	$\Delta=132.3\ln(fcsc)+1605$	0.5790
Δ -E	$\Delta=618.1\ln(E)-4341$	0.9136
Δ -Ts	$\Delta=2110.6Ts^{0.0634}$	0.3105
Vc-Vs	$Vc=0.8126Vs^{1.139}$	0.9872
Vc-S	$Vc=3.56\ln(S)-8.95$	0.8434
Vc-fcc	$Vc=3.13fcc^{0.117}$	0.5958
Vc-fcs	$Vc=3.71fcs^{0.079}$	0.5015
Vc-fcss	$Vc=3.91fcsc^{0.0711}$	0.5014
Vc-fcsc	$Vc=3.60fcsc^{0.0871}$	0.5585
Vc-E	$Vc=1.86\ln(E)-14.71$	0.9352
Vc-Ts	$Vc=4.78Ts^{0.0676}$	0.2578
Vs-S	$Vs=2.98\ln(S)-6.73$	0.8307
Vs-fcc	$Vs=3.302fcc^{0.10}$	0.5893
Vs-fcs	$Vs=3.795fcs^{0.069}$	0.5053
Vs-fcss	$Vs=3.967fcsc^{0.0626}$	0.5092
Vs-fcsc	$Vs=3.720fcsc^{0.0748}$	0.5527
Vs-E	$Vs=1.58\ln(E)-11.86$	0.9386
Vs-Ts	$Vs=4.72Ts^{0.061}$	0.2680
S-fcc	$S=44.24e^{0.0023fcc}$	0.8314
S-fcs	$S=27.1fcs^{0.1549}$	0.7887
S-fcss	$S=30.31fcsc^{0.1377}$	0.7787
S-fcsc	$S=27.6fcsc^{0.1534}$	0.7896
S-E	$S=0.0005E+30.47$	0.9343
S-Ts	$S=44.26Ts^{0.138}$	0.4218
fcc-fcs	$fcc=2.70fcs^{0.7776}$	0.9673
fcc-fcss	$fcc=4.81fcsc^{0.6879}$	0.9502
fcc-fcsc	$fcc=3.204fcsc^{0.7513}$	0.9658
fcc-E	$fcc=126.1\ln(E)-1269$	0.7392
fcc-Ts	$fcc=21.44Ts^{0.9556}$	0.7134
fcs-fcss	$fcs=79.33\ln(fcsc)-245.3$	0.9934
fcs-fcsc	$fcs=82.44\ln(fcsc)-274.0$	0.9946
fcs-E	$fcs=140.9\ln(E)-1427.7$	0.6645
fcs-Ts	$fcs=15.19Ts^{1.1913}$	0.7150
fcsc-fcss	$fcsc=23.55e^{0.0127fcsc}$	0.9934
fcsc-E	$fcsc=4.10^{-7}E^{1.7515}$	0.6595
fcsc-Ts	$fcsc=18.13e^{0.301Ts}$	0.7103
fcsc-E	$fcsc=2.10^{-6}E^{1.621}$	0.6732
fcsc-Ts	$Fcsc=13.46Ts^{1.223}$	0.7082
E-Ts	$E=33833Ts^{0.2343}$	0.3363

Tablo C.36. 7 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.7400	0.0300	0.7692	0.4695	0.6400	0.8333
Δ-Vs	0.9700	0.0800	0.7092	0.3861	0.7143	0.3165
Δ-S	0.3268	0.8696	0.9009	0.5319	0.9524	0.4525
Δ-fcc	0.1980	0.5780	0.9009	0.5988	0.8700	0.6452
Δ-fcs	0.0000	0.1689	0.5917	0.2331	0.5882	0.1869
Δ-fcss	0.0000	0.0958	0.5128	0.1515	0.5102	0.1087
Δ-fcsç	0.0000	0.0699	0.5263	0.1580	0.4950	0.0952
Δ-E	0.5618	0.5000	0.8333	0.5263	0.7194	0.3279
Δ-Ts	0.1500	0.0010	0.0500	0.0100	0.0100	0.0700
Vc-Vs	0.7629	0.3750	0.9220	0.8224	0.4571	0.3797
Vc-S	0.2418	0.0261	0.8538	0.8826	0.6095	0.5430
Vc-fcc	0.1465	0.0173	0.8538	0.7840	0.7356	0.7742
Vc-fcs	0.0000	0.0051	0.7692	0.4965	0.3765	0.2243
Vc-fcss	0.0000	0.0029	0.6667	0.3227	0.3265	0.1304
Vc-fcsç	0.0000	0.0021	0.6842	0.3365	0.3168	0.1143
Vc-E	0.4157	0.0600	0.9231	0.8920	0.4604	0.3934
Vc-Ts	0.2027	0.0333	0.0385	0.0047	0.0156	0.0583
Vs-S	0.3170	0.0696	0.7872	0.7259	0.7500	0.6994
Vs-fcc	0.1921	0.0462	0.7872	0.6448	0.6214	0.4905
Vs-fcs	0.0000	0.0135	0.8343	0.6037	0.8235	0.5907
Vs-fcss	0.0000	0.0077	0.7231	0.3924	0.7143	0.3435
Vs-fcsç	0.0000	0.0056	0.7421	0.4092	0.6931	0.3010
Vs-E	0.5449	0.1600	0.8511	0.7336	0.9929	0.9652
Vs-Ts	0.1546	0.0125	0.0355	0.0039	0.0071	0.0222
S-fcc	0.6059	0.6647	1.0000	0.8883	0.8286	0.7014
S-fcs	0.0000	0.1943	0.6568	0.4382	0.6176	0.4131
S-fcss	0.0000	0.1102	0.5692	0.2848	0.5357	0.2402
S-fcsç	0.0000	0.0804	0.5842	0.2970	0.5198	0.2105
S-E	0.5817	0.4348	0.9250	0.9895	0.7554	0.7246
S-Ts	0.0490	0.0009	0.0450	0.0053	0.0095	0.0317
fcc-fcs	0.0000	0.2922	0.6568	0.3893	0.5118	0.2897
fcc-fcss	0.0000	0.1657	0.5692	0.2530	0.4439	0.1685
fcc-fcsç	0.0000	0.1210	0.5842	0.2638	0.4307	0.1476
fcc-E	0.3525	0.2890	0.9250	0.8789	0.6259	0.5082
fcc-Ts	0.0297	0.0006	0.0450	0.0060	0.0115	0.0452
fcs-fcss	1.0000	0.5670	0.8667	0.6500	0.8673	0.5815
fcs-fcsç	1.0000	0.4140	0.8895	0.6777	0.8416	0.5095
fcs-E	0.0000	0.0845	0.7101	0.4429	0.8176	0.5701
fcs-Ts	0.0000	0.0002	0.0296	0.0023	0.0059	0.0131
fcss-fcsç	1.0000	0.7301	0.9744	0.9591	0.9703	0.8762
fcss-E	0.0000	0.0479	0.6154	0.2879	0.7092	0.3315
fcss-Ts	0.0000	0.0001	0.0256	0.0015	0.0051	0.0076
fcsç-E	0.0000	0.0350	0.6316	0.3002	0.6881	0.2905
fcsç-Ts	0.0000	0.0001	0.0263	0.0016	0.0050	0.0067
E-Ts	0.0843	0.0020	0.0417	0.0053	0.0072	0.0230

Tablo C.37. 14 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.7246	0.1500	0.3817	0.0490	0.7246	0.2849
Δ-Vs	0.9800	0.1100	0.5208	0.1818	0.6289	0.2370
Δ-S	0.7194	0.5900	0.8800	0.6211	0.7813	0.2817
Δ-fcc	0.2242	0.4219	0.7874	0.3891	0.5435	0.1437
Δ-fcs	0.0474	0.1377	0.4902	0.1208	0.5155	0.1021
Δ-fcss	0.0645	0.1616	0.5780	0.2165	0.4000	0.0448
Δ-fcsç	0.0000	0.0737	0.4274	0.0735	0.3788	0.0192
Δ-E	0.5291	0.6100	0.6135	0.2778	0.7092	0.3165
Δ-Ts	0.2404	0.4237	0.3401	0.0000	0.0000	0.2387
Vc-Vs	0.7101	0.7333	0.7328	0.2696	0.8679	0.8318
Vc-S	0.9928	0.2542	0.3359	0.0789	0.9275	0.9887
Vc-fcc	0.3094	0.0633	0.4847	0.1260	0.7500	0.5043
Vc-fcs	0.0654	0.0207	0.7786	0.4059	0.7113	0.3585
Vc-fcss	0.0890	0.0242	0.6603	0.2265	0.5520	0.1574
Vc-fcsç	0.0000	0.0111	0.8931	0.6667	0.5227	0.0675
Vc-E	0.7302	0.2459	0.6221	0.1765	0.9787	0.9003
Vc-Ts	0.3317	0.0636	0.8912	0.0000	0.0000	0.8377
Vs-S	0.7050	0.1864	0.4583	0.2927	0.8050	0.8412
Vs-fcc	0.2197	0.0464	0.6615	0.4673	0.8641	0.6063
Vs-fcs	0.0464	0.0152	0.9412	0.6643	0.8196	0.4311
Vs-fcss	0.0632	0.0178	0.9010	0.8400	0.6360	0.1892
Vs-fcsç	0.0000	0.0081	0.8205	0.4044	0.6023	0.0812
Vs-E	0.5185	0.1803	0.8490	0.6545	0.8868	0.7488
Vs-Ts	0.2356	0.0466	0.6531	0.0000	0.0000	0.9929
S-fcc	0.3117	0.2489	0.6929	0.6265	0.6957	0.5101
S-fcs	0.0659	0.0813	0.4314	0.1944	0.6598	0.3626
S-fcss	0.0897	0.0953	0.5087	0.3485	0.5120	0.1592
S-fcsç	0.0000	0.0435	0.3761	0.1184	0.4848	0.0683
S-E	0.7354	0.9672	0.5399	0.4472	0.9078	0.8901
S-Ts	0.3341	0.2500	0.2993	0.0000	0.0000	0.8473
fcc-fcs	0.2114	0.3264	0.6225	0.3104	0.9485	0.7109
fcc-fcss	0.2877	0.3829	0.7341	0.5563	0.7360	0.3121
fcc-fcsç	0.0000	0.1748	0.5427	0.1890	0.6970	0.1338
fcc-E	0.4238	0.2574	0.7791	0.7139	0.7663	0.4540
fcc-Ts	0.9327	0.9958	0.4320	0.0000	0.0000	0.6020
fcs-fcss	0.7346	0.8526	0.8480	0.5580	0.7760	0.4390
fcs-fcsç	0.0000	0.5354	0.8718	0.6088	0.7348	0.1883
fcs-E	0.0896	0.0840	0.7990	0.4348	0.7268	0.3228
fcs-Ts	0.1972	0.3251	0.6939	0.0000	0.0000	0.4280
fcss-fcsç	0.0000	0.4565	0.7393	0.3397	0.9470	0.4288
fcss-E	0.1219	0.0985	0.9422	0.7792	0.5640	0.1417
fcss-Ts	0.2684	0.3813	0.5884	0.0000	0.0000	0.1879
fcsç-E	0.0000	0.0450	0.6966	0.2647	0.5341	0.0608
fcsç-Ts	0.0000	0.1740	0.7959	0.0000	0.0000	0.0806
E-Ts	0.4543	0.2585	0.5544	0.0000	0.0000	0.7542

Tablo C.38. 28 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.5814	0.0100	0.4717	0.1553	0.4608	0.1821
Δ-Vs	0.4255	0.2300	0.2611	0.0000	0.1121	0.0000
Δ-S	0.4292	0.7500	0.7299	0.3861	0.6993	0.2950
Δ-fcc	0.0000	0.0933	0.4049	0.0813	0.3861	0.0813
Δ-fcs	0.0000	0.0000	0.1748	0.0000	0.2183	0.0000
Δ-fcss	0.0000	0.0000	0.1912	0.0000	0.2646	0.0000
Δ-fcsç	0.0000	0.0000	0.0671	0.0000	0.1883	0.0000
Δ-E	0.5128	0.3900	0.5952	0.2809	0.5747	0.2146
Δ-Ts	0.0000	0.0000	0.0870	0.0000	0.1404	0.0000
Vc-Vs	0.7319	0.0435	0.5535	0.0000	0.2433	0.0000
Vc-S	0.7382	0.0133	0.6462	0.4022	0.6590	0.6175
Vc-fcc	0.0000	0.0009	0.8583	0.5236	0.8378	0.4463
Vc-fcs	0.0000	0.0000	0.3706	0.0000	0.4738	0.0000
Vc-fcss	0.0000	0.0000	0.4054	0.0000	0.5741	0.0000
Vc-fcsç	0.0000	0.0000	0.1423	0.0000	0.4087	0.0000
Vc-E	0.8821	0.0256	0.7925	0.5528	0.8018	0.8488
Vc-Ts	0.0000	0.0000	0.1843	0.0000	0.3048	0.0000
Vs-S	0.9915	0.3067	0.3577	0.0000	0.1603	0.0000
Vs-fcc	0.0000	0.0215	0.6449	0.0000	0.2904	0.0000
Vs-fcs	0.0000	0.0000	0.6696	1.0000	0.5135	1.0000
Vs-fcss	0.0000	0.0000	0.7323	1.0000	0.4238	1.0000
Vs-fcsç	0.0000	0.0000	0.2570	1.0000	0.5953	1.0000
Vs-E	0.8298	0.5897	0.4386	0.0000	0.1951	0.0000
Vs-Ts	0.0000	0.0000	0.3330	1.0000	0.7982	1.0000
S-fcc	0.0000	0.0700	0.5547	0.2106	0.5521	0.2756
S-fcs	0.0000	0.0000	0.2395	0.0000	0.3122	0.0000
S-fcss	0.0000	0.0000	0.2620	0.0000	0.3783	0.0000
S-fcsç	0.0000	0.0000	0.0919	0.0000	0.2693	0.0000
S-E	0.8369	0.5200	0.8155	0.7275	0.8218	0.7275
S-Ts	0.0000	0.0000	0.1191	0.0000	0.2008	0.0000
fcc-fcs	1.0000	0.0000	0.4318	0.0000	0.5655	0.0000
fcc-fcss	1.0000	0.0000	0.4723	0.0000	0.6852	0.0000
fcc-fcsç	1.0000	0.0000	0.1658	0.0000	0.4878	0.0000
fcc-E	0.0000	0.0364	0.6802	0.2894	0.6718	0.3789
fcc-Ts	1.0000	0.0000	0.2148	0.0000	0.3638	0.0000
fcs-fcss	1.0000	1.0000	0.9143	1.0000	0.8253	1.0000
fcs-fcsç	1.0000	1.0000	0.3839	1.0000	0.8625	1.0000
fcs-E	0.0000	0.0000	0.2937	0.0000	0.3799	0.0000
fcs-Ts	1.0000	1.0000	0.4974	1.0000	0.6433	1.0000
fcss-fcsç	1.0000	1.0000	0.3510	1.0000	0.7119	1.0000
fcss-E	0.0000	0.0000	0.3212	0.0000	0.4603	0.0000
fcss-Ts	1.0000	1.0000	0.4548	1.0000	0.5309	1.0000
fcsç-E	0.0000	0.0000	0.1128	0.0000	0.3277	0.0000
fcsç-Ts	1.0000	1.0000	0.7718	1.0000	0.7458	1.0000
E-Ts	0.0000	0.0000	0.1461	0.0000	0.2444	0.0000

Tablo C.39. 365 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD1)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.5076	0.8000	0.3356	0.1420	0.3891	0.1653
Δ-Vs	0.5128	0.7800	0.3367	0.1412	0.3623	0.1506
Δ-S	0.1495	0.3165	0.2519	0.0962	0.2564	0.1000
Δ-fcc	0.0000	0.0935	0.2165	0.0532	0.2088	0.0490
Δ-fcs	0.0000	0.0348	0.2049	0.0413	0.1972	0.0329
Δ-fcss	0.0000	0.0452	0.2584	0.0699	0.2653	0.0699
Δ-fcsç	0.0000	0.0472	0.2024	0.0431	0.1931	0.0000
Δ-E	0.2933	0.5814	0.3650	0.1689	0.3413	0.1395
Δ-Ts	0.0000	0.0000	0.0641	0.0000	0.0894	0.1900
Vc-Vs	0.9898	0.9750	0.9966	0.9944	0.9312	0.9111
Vc-S	0.2945	0.2532	0.7506	0.6769	0.6590	0.6050
Vc-fcc	0.0000	0.0748	0.6450	0.3745	0.5365	0.2966
Vc-fcs	0.0000	0.0279	0.6107	0.2909	0.5069	0.1990
Vc-fcss	0.0000	0.0362	0.7700	0.4923	0.6817	0.4231
Vc-fcsç	0.0000	0.0377	0.6032	0.3034	0.4961	0.0000
Vc-E	0.5777	0.4651	0.9195	0.8409	0.8771	0.8438
Vc-Ts	0.0000	0.0000	0.1910	0.0000	0.2297	0.0314
Vs-S	0.2915	0.2468	0.7481	0.6808	0.7077	0.6640
Vs-fcc	0.0000	0.0729	0.6429	0.3766	0.5762	0.3255
Vs-fcs	0.0000	0.0272	0.6086	0.2926	0.5444	0.2184
Vs-fcss	0.0000	0.0353	0.7674	0.4951	0.7321	0.4643
Vs-fcsç	0.0000	0.0368	0.6012	0.3052	0.5328	0.0000
Vs-E	0.5718	0.4535	0.9226	0.8362	0.9420	0.9261
Vs-Ts	0.0000	0.0000	0.1904	0.0000	0.2466	0.0286
S-fcc	0.0000	0.2953	0.8593	0.5532	0.8142	0.4902
S-fcs	0.0000	0.1101	0.8135	0.4298	0.7692	0.3289
S-fcss	0.0000	0.1430	0.9748	0.7273	0.9667	0.6993
S-fcsç	0.0000	0.1491	0.8036	0.4483	0.7529	0.0000
S-E	0.5097	0.5443	0.6902	0.5692	0.7513	0.7170
S-Ts	0.0000	0.0000	0.2545	0.0000	0.3485	0.0190
fcc-fcs	1.0000	0.3728	0.9467	0.7769	0.9448	0.6711
fcc-fcss	1.0000	0.4842	0.8377	0.7606	0.7871	0.7010
fcc-fcsç	1.0000	0.5047	0.9352	0.8103	0.9247	0.0000
fcc-E	0.0000	0.1607	0.5931	0.3149	0.6117	0.3515
fcc-Ts	1.0000	0.0000	0.2962	0.0000	0.4281	0.0093
fcs-fcss	1.0000	0.7700	0.7930	0.5909	0.7436	0.4704
fcs-fcsç	1.0000	0.7387	0.9879	0.9587	0.9788	0.0000
fcs-E	0.0000	0.0599	0.5615	0.2446	0.5779	0.2359
fcs-Ts	1.0000	0.0000	0.3128	0.0000	0.4531	0.0063
fcss-fcsç	1.0000	0.9593	0.7834	0.6164	0.7278	0.0000
fcss-E	0.0000	0.0778	0.7080	0.4140	0.7772	0.5014
fcss-Ts	1.0000	0.0000	0.2481	0.0000	0.3369	0.0133
fcsç-E	0.0000	0.0811	0.5547	0.2552	0.5656	0.0000
fcsç-Ts	1.0000	0.0000	0.3167	0.0000	0.4629	0.0000
E-Ts	0.0000	0.0000	0.1756	0.0000	0.2618	0.0265

Tablo C.40. 7 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.9950	0.7794	0.9980	0.9962	0.9992	0.9999
Δ-Vs	1.0000	0.8380	0.9960	0.9930	0.9981	0.9940
Δ-S	0.9200	0.9989	0.9990	0.9950	0.9999	0.9952
Δ-fcc	0.8764	0.9845	1.0000	0.9972	0.9998	0.9987
Δ-fcs	0.6925	0.9042	0.9911	0.9859	0.9948	0.9889
Δ-fcss	0.6410	0.8760	0.9872	0.9805	0.9921	0.9847
Δ-fcsç	0.6223	0.8651	0.9881	0.9819	0.9896	0.9815
Δ-E	0.9814	0.9749	0.9990	0.9953	0.9964	0.9898
Δ-Ts	0.8865	0.7331	0.9390	0.9084	0.9349	0.9116
Vc-Vs	0.9950	0.9301	0.9980	0.9968	0.9989	0.9941
Vc-S	0.9246	0.7803	0.9990	0.9988	0.9993	0.9953
Vc-fcc	0.8808	0.7917	0.9980	0.9990	0.9994	0.9988
Vc-fcs	0.6960	0.8620	0.9931	0.9896	0.9956	0.9890
Vc-fcss	0.6442	0.8897	0.9891	0.9842	0.9929	0.9848
Vc-fcsç	0.6254	0.9009	0.9901	0.9857	0.9904	0.9816
Vc-E	0.9863	0.7995	0.9990	0.9991	0.9972	0.9899
Vc-Ts	0.8910	0.9406	0.9408	0.9119	0.9357	0.9117
Vs-S	0.9200	0.8389	0.9970	0.9980	0.9982	0.9988
Vs-fcc	0.8764	0.8512	0.9960	0.9958	0.9983	0.9953
Vs-fcs	0.6925	0.9268	0.9950	0.9928	0.9967	0.9949
Vs-fcss	0.6410	0.9566	0.9911	0.9874	0.9939	0.9906
Vs-fcsç	0.6223	0.9687	0.9921	0.9888	0.9915	0.9874
Vs-E	0.9814	0.8595	0.9970	0.9977	0.9983	0.9957
Vs-Ts	0.8865	0.8749	0.9427	0.9148	0.9367	0.9170
S-fcc	0.9527	0.9856	0.9990	0.9978	0.9999	0.9965
S-fcs	0.7528	0.9052	0.9921	0.9908	0.9949	0.9937
S-fcss	0.6968	0.8770	0.9882	0.9854	0.9922	0.9895
S-fcsç	0.6764	0.8661	0.9891	0.9868	0.9897	0.9863
S-E	0.9374	0.9760	1.0000	0.9997	0.9965	0.9946
S-Ts	0.9637	0.7339	0.9399	0.9130	0.9350	0.9160
fcc-fcs	0.7902	0.9184	0.9911	0.9887	0.9950	0.9902
fcc-fcss	0.7314	0.8898	0.9872	0.9832	0.9923	0.9860
fcc-fcsç	0.7100	0.8787	0.9881	0.9847	0.9898	0.9828
fcc-E	0.8931	0.9903	0.9990	0.9981	0.9966	0.9911
fcc-Ts	0.9886	0.7446	0.9390	0.9110	0.9351	0.9128
fcs-fcss	0.9256	0.9689	0.9961	0.9945	0.9972	0.9958
fcs-fcsç	0.8986	0.9568	0.9970	0.9960	0.9948	0.9925
fcs-E	0.7057	0.9274	0.9921	0.9905	0.9984	0.9991
fcs-Ts	0.7812	0.8109	0.9474	0.9214	0.9398	0.9218
fcss-fcsç	0.9708	0.9875	0.9990	0.9985	0.9975	0.9968
fcss-E	0.6532	0.8986	0.9882	0.9851	0.9956	0.9949
fcss-Ts	0.7231	0.8369	0.9512	0.9265	0.9424	0.9257
fcsç-E	0.6341	0.8874	0.9891	0.9865	0.9932	0.9917
fcsç-Ts	0.7019	0.8474	0.9502	0.9251	0.9447	0.9287
E-Ts	0.9034	0.7520	0.9399	0.9127	0.9383	0.9210

Tablo C.41. 14 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.9940	0.9158	0.9737	0.9636	0.9994	0.9974
Δ-Vs	1.0000	0.8790	0.9901	0.9852	0.9983	0.9961
Δ-S	0.9940	0.9872	0.9990	0.9968	0.9986	0.9860
Δ-fcc	0.8741	0.9481	0.9970	0.9862	0.9886	0.9706
Δ-fcs	0.6250	0.7834	0.9775	0.9488	0.9921	0.9724
Δ-fcss	0.6649	0.8072	0.9872	0.9698	0.9752	0.9540
Δ-fcsç	0.4261	0.6496	0.9643	0.9279	0.9754	0.9480
Δ-E	0.9833	0.9909	0.9901	0.9834	0.9981	0.9947
Δ-Ts	0.8496	0.9515	0.9416	0.8483	0.9931	0.9886
Vc-Vs	0.9940	0.9597	0.9834	0.9780	0.9989	0.9987
Vc-S	1.0000	0.9277	0.9747	0.9667	0.9992	0.9886
Vc-fcc	0.8794	0.9659	0.9766	0.9771	0.9892	0.9731
Vc-fcs	0.6288	0.8554	0.9961	0.9846	0.9927	0.9749
Vc-fcss	0.6689	0.8813	0.9864	0.9935	0.9758	0.9565
Vc-fcsç	0.4286	0.7093	0.9904	0.9630	0.9760	0.9505
Vc-E	0.9892	0.9243	0.9834	0.9799	0.9987	0.9973
Vc-Ts	0.8547	0.9625	0.9670	0.8804	0.9937	0.9912
Vs-S	0.9940	0.8904	0.9911	0.9884	0.9997	0.9898
Vs-fcc	0.8741	0.9270	0.9931	0.9990	0.9903	0.9744
Vs-fcs	0.6250	0.8913	0.9873	0.9630	0.9938	0.9762
Vs-fcss	0.6649	0.9183	0.9970	0.9844	0.9769	0.9577
Vs-fcsç	0.4261	0.7390	0.9740	0.9418	0.9771	0.9517
Vs-E	0.9833	0.8871	1.0000	0.9981	0.9998	0.9986
Vs-Ts	0.8496	0.9238	0.9510	0.8610	0.9948	0.9925
S-fcc	0.8794	0.9605	0.9980	0.9893	0.9900	0.9844
S-fcs	0.6288	0.7936	0.9785	0.9518	0.9935	0.9862
S-fcss	0.6689	0.8177	0.9882	0.9729	0.9766	0.9676
S-fcsç	0.4286	0.6580	0.9653	0.9309	0.9768	0.9615
S-E	0.9892	0.9962	0.9911	0.9865	0.9995	0.9912
S-Ts	0.8547	0.9638	0.9426	0.8510	0.9945	0.9973
fcc-fcs	0.7150	0.8262	0.9804	0.9620	0.9965	0.9982
fcc-fcss	0.7606	0.8513	0.9901	0.9834	0.9864	0.9829
fcc-fcsç	0.4874	0.6851	0.9672	0.9409	0.9866	0.9768
fcc-E	0.8890	0.9569	0.9931	0.9971	0.9905	0.9757
fcc-Ts	0.9720	0.9965	0.9444	0.8602	0.9955	0.9818
fcs-fcss	0.9400	0.9705	0.9902	0.9783	0.9830	0.9811
fcs-fcsç	0.6817	0.8292	0.9865	0.9780	0.9832	0.9750
fcs-E	0.6356	0.7906	0.9873	0.9648	0.9939	0.9775
fcs-Ts	0.7356	0.8233	0.9633	0.8941	0.9989	0.9836
fcss-fcsç	0.6408	0.8047	0.9769	0.9568	0.9998	0.9937
fcss-E	0.6762	0.8146	0.9970	0.9862	0.9771	0.9591
fcss-Ts	0.7826	0.8483	0.9539	0.8747	0.9820	0.9650
fcsç-E	0.4333	0.6555	0.9740	0.9436	0.9773	0.9531
fcsç-Ts	0.5015	0.6827	0.9765	0.9142	0.9821	0.9589
E-Ts	0.8641	0.9602	0.9510	0.8627	0.9950	0.9939

Tablo C.42. 28 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.9891	0.9121	0.9852	0.9741	0.9956	0.9950
Δ-Vs	0.9718	0.9380	0.9579	0.9330	0.9824	0.9841
Δ-S	0.9728	0.9954	0.9970	0.9880	0.9956	0.9811
Δ-fcc	0.6840	0.8328	0.9804	0.9652	0.9887	0.9818
Δ-fcs	0.4975	0.7025	0.9524	0.9341	0.9532	0.9376
Δ-fcss	0.5559	0.7449	0.9443	0.9304	0.9415	0.9113
Δ-fcsç	0.3820	0.6360	0.9337	0.9223	0.9206	0.9012
Δ-E	0.9862	0.9674	0.9921	0.9835	0.9881	0.9727
Δ-Ts	0.5342	0.7658	0.9132	0.9016	0.9170	0.9035
Vc-Vs	0.9825	0.9724	0.9722	0.9578	0.9867	0.9890
Vc-S	0.9835	0.9163	0.9882	0.9859	1.0000	0.9860
Vc-fcc	0.6915	0.9131	0.9951	0.9908	0.9931	0.9867
Vc-fcs	0.5030	0.7703	0.9667	0.9589	0.9574	0.9423
Vc-fcss	0.5620	0.8167	0.9585	0.9552	0.9457	0.9159
Vc-fcsç	0.3862	0.6973	0.9477	0.9469	0.9246	0.9057
Vc-E	0.9970	0.9428	0.9931	0.9905	0.9925	0.9775
Vc-Ts	0.5401	0.8396	0.9269	0.9256	0.9210	0.9080
Vs-S	0.9990	0.9423	0.9607	0.9443	0.9867	0.9970
Vs-fcc	0.7038	0.8879	0.9770	0.9667	0.9936	0.9977
Vs-fcs	0.5119	0.7490	0.9943	0.9989	0.9703	0.9528
Vs-fcss	0.5720	0.7941	0.9858	0.9972	0.9584	0.9261
Vs-fcsç	0.3930	0.6781	0.9748	0.9886	0.9370	0.9158
Vs-E	0.9854	0.9696	0.9655	0.9487	0.9942	0.9884
Vs-Ts	0.5497	0.8164	0.9534	0.9664	0.9334	0.9181
S-fcc	0.7031	0.8367	0.9833	0.9768	0.9931	0.9992
S-fcs	0.5114	0.7058	0.9552	0.9454	0.9574	0.9557
S-fcss	0.5714	0.7483	0.9471	0.9417	0.9457	0.9289
S-fcsç	0.3927	0.6389	0.9365	0.9335	0.9246	0.9186
S-E	0.9864	0.9718	0.9950	0.9954	0.9925	0.9914
S-Ts	0.5491	0.7693	0.9160	0.9125	0.9210	0.9209
fcc-fcs	0.7274	0.8435	0.9714	0.9678	0.9641	0.9550
fcc-fcss	0.8127	0.8944	0.9632	0.9640	0.9523	0.9282
fcc-fcsç	0.5584	0.7637	0.9524	0.9556	0.9311	0.9179
fcc-E	0.6936	0.8609	0.9882	0.9814	0.9994	0.9907
fcc-Ts	0.7810	0.9194	0.9315	0.9342	0.9275	0.9202
fcs-fcss	0.8950	0.9432	0.9915	0.9961	0.9878	0.9719
fcs-fcsç	0.7678	0.9053	0.9804	0.9875	0.9658	0.9612
fcs-E	0.5045	0.7262	0.9600	0.9497	0.9646	0.9640
fcs-Ts	0.9313	0.9175	0.9589	0.9653	0.9620	0.9636
fcss-fcsç	0.6872	0.8538	0.9888	0.9913	0.9777	0.9889
fcss-E	0.5636	0.7700	0.9518	0.9460	0.9528	0.9369
fcss-Ts	0.9610	0.9727	0.9671	0.9691	0.9740	0.9914
fcsç-E	0.3873	0.6574	0.9412	0.9378	0.9316	0.9266
fcsç-Ts	0.7150	0.8306	0.9781	0.9775	0.9961	0.9975
E-Ts	0.5417	0.7916	0.9205	0.9168	0.9280	0.9289

Tablo C.43. 365 günlük numunelerde 6 çeşit fonksiyon ve (SD2)_i duyarlılık dereceleri gözönüne alınarak hesaplanan t_{ij} duyarlılık yakınlığı oranları

Özelik Çifti	Benzeşim Katsayısı, t _{ij}					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Δ-Vc	0.9737	0.9978	0.9662	0.9485	0.9946	0.9926
Δ-Vs	0.9737	0.9974	0.9662	0.9486	0.9909	0.9894
Δ-S	0.7831	0.8989	0.9372	0.9231	0.9815	0.9851
Δ-fcc	0.5537	0.6710	0.9407	0.9107	0.9885	0.9858
Δ-fcs	0.4396	0.5700	0.9479	0.9191	0.9859	0.9874
Δ-fcss	0.4566	0.5866	0.9597	0.9310	0.9889	0.9888
Δ-fcsç	0.5385	0.6442	0.9470	0.9093	0.9893	0.9913
Δ-E	0.9234	0.9794	0.9662	0.9487	0.9758	0.9697
Δ-Ts	0.2502	0.3775	0.9158	0.8549	0.9511	0.9901
Vc-Vs	1.0000	0.9996	1.0000	0.9999	0.9962	0.9968
Vc-S	0.8042	0.9009	0.9700	0.9732	0.9868	0.9925
Vc-fcc	0.5687	0.6724	0.9737	0.9601	0.9939	0.9932
Vc-fcs	0.4514	0.5713	0.9810	0.9690	0.9912	0.9948
Vc-fcss	0.4689	0.5879	0.9933	0.9816	0.9943	0.9962
Vc-fcsç	0.5530	0.6456	0.9801	0.9586	0.9947	0.9987
Vc-E	0.9483	0.9816	1.0000	0.9998	0.9811	0.9770
Vc-Ts	0.2569	0.3784	0.9478	0.9013	0.9562	0.9975
Vs-S	0.8042	0.9012	0.9700	0.9731	0.9906	0.9957
Vs-fcc	0.5687	0.6727	0.9737	0.9600	0.9976	0.9964
Vs-fcs	0.4514	0.5715	0.9810	0.9689	0.9950	0.9979
Vs-fcss	0.4689	0.5881	0.9933	0.9815	0.9980	0.9994
Vs-fcsç	0.5530	0.6459	0.9801	0.9585	0.9984	0.9981
Vs-E	0.9483	0.9820	1.0000	0.9999	0.9848	0.9801
Vs-Ts	0.2569	0.3785	0.9478	0.9013	0.9599	0.9993
S-fcc	0.7071	0.7464	0.9963	0.9865	0.9929	0.9993
S-fcs	0.5613	0.6342	0.9888	0.9957	0.9956	0.9977
S-fcss	0.5831	0.6526	0.9766	0.9915	0.9925	0.9963
S-fcsç	0.6877	0.7167	0.9897	0.9850	0.9921	0.9938
S-E	0.8481	0.9178	0.9700	0.9730	0.9941	0.9844
S-Ts	0.3195	0.4200	0.9771	0.9261	0.9690	0.9950
fcc-fcs	0.7938	0.8496	0.9925	0.9908	0.9973	0.9984
fcc-fcss	0.8247	0.8743	0.9802	0.9781	0.9996	0.9969
fcc-fcsç	0.9725	0.9601	0.9934	0.9985	0.9992	0.9945
fcc-E	0.5997	0.6851	0.9737	0.9599	0.9871	0.9837
fcc-Ts	0.4518	0.5627	0.9734	0.9388	0.9621	0.9957
fcs-fcss	0.9626	0.9717	0.9877	0.9872	0.9969	0.9985
fcs-fcsç	0.8163	0.8849	0.9991	0.9893	0.9965	0.9961
fcs-E	0.4760	0.5820	0.9810	0.9688	0.9898	0.9822
fcs-Ts	0.5692	0.6623	0.9661	0.9302	0.9647	0.9972
fcss-fcsç	0.8479	0.9106	0.9867	0.9766	0.9996	0.9975
fcss-E	0.4945	0.5989	0.9933	0.9814	0.9867	0.9807
fcss-Ts	0.5479	0.6436	0.9542	0.9183	0.9618	0.9987
fcsç-E	0.5832	0.6577	0.9801	0.9584	0.9863	0.9783
fcsç-Ts	0.4646	0.5860	0.9670	0.9402	0.9614	0.9988
E-Ts	0.2710	0.3855	0.9478	0.9012	0.9747	0.9794

Tablo C.44. (F5)' fonksiyonuna göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlara ait özelliklerden elde edilen A, B, C ve D katsayıları

Özellikler	7 Günlük Numuneler			
	A	B	C	D
(Δ)'	0.0574	-0.1511	0.0664	1.0271
(V_c)'	0.0490	-0.0739	0.1303	0.8945
(V_s)'	-0.0617	-0.1790	0.0023	1.2384
(S)'	0.3166	-0.2977	0.0320	0.9486
(E)'	1.4838	-0.7266	0.3377	1.9818
(f_{cc})'	1.4888	-1.2344	-0.0149	-0.0950
(f_{cs})'	1.3886	-1.1824	-0.0327	0.7605
(f_{css})'	1.2153	-1.3287	-0.2456	0.8267
(f_{csc})'	0.0080	-0.7833	-0.2064	1.3590
(T_s)'	0.2353	-0.1291	0.1382	0.7555
14 Günlük Numuneler				
(Δ)'	0.0219	-0.1606	0.0266	1.1121
(V_c)'	0.0067	-0.1120	0.0967	1.0087
(V_s)'	-0.0730	-0.1304	0.0265	1.1769
(S)'	0.0274	-0.3440	-0.0985	1.4152
(E)'	0.4540	-1.0313	-0.3166	1.2599
(f_{cc})'	0.9781	-0.7927	0.0441	1.8939
(f_{cs})'	0.6739	-1.3091	-0.4244	0.7704
(f_{css})'	0.8670	-1.0256	-0.1376	2.0596
(f_{csc})'	0.2345	-0.5776	0.0832	1.2961
(T_s)'	0.9810	-0.0751	0.6936	-0.5994
28 Günlük Numuneler				
(Δ)'	0.0216	-1.1628	0.0172	1.1240
(V_c)'	0.0731	-0.1397	0.1178	0.9489
(V_s)'	0.0488	-0.1279	0.1135	0.9656
(S)'	0.0751	-0.3485	-0.0550	1.3284
(E)'	1.4132	-0.9063	0.2663	2.0800
(f_{cc})'	1.2082	1.8345	-0.3368	0.2267
(f_{cs})'	0.7373	-2.0718	-0.6702	1.9631
(f_{css})'	0.6640	-2.3375	-0.8789	3.0045
(f_{csc})'	-0.1032	-0.0777	-0.1993	3.5523
(T_s)'	0.6017	-1.5074	-0.2710	2.1767
365 Günlük Numuneler				
(Δ)'	0.0922	-0.0640	0.0926	0.8792
(V_c)'	0.0323	-0.1216	0.0882	1.0012
(V_s)'	-0.0109	-0.1276	0.0415	1.0970
(S)'	0.1555	0.2049	0.0657	0.9836
(E)'	1.3396	-0.5967	0.4786	1.8405
(f_{cc})'	1.6078	-0.8055	0.3657	0.2215
(f_{cs})'	1.8178	-0.9003	0.3473	-0.1683
(f_{css})'	1.8520	-0.7161	0.5897	-0.2647
(f_{csc})'	-0.0911	-0.5996	-0.1497	-0.7256
(T_s)'	0.3103	-0.5154	-0.1307	1.3358

Tablo C.45. (F6)' fonksiyonuna göre 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlara ait özelliklerden elde edilen A, B, C ve D katsayıları

Özellikler	7 Günlük Numuneler			
	A	B	C	D
(Δ)'	-0.0859	0.0187	0.0676	0.9996
(V_c)'	-0.1273	0.0028	0.0808	1.0438
(V_s)'	-0.3421	-0.1301	-0.0402	1.5123
(S)'	-0.2127	-0.1386	-0.0635	1.4148
(E)'	0.1173	-0.1283	0.0455	3.0778
(f_{cc})'	-0.4948	-1.4660	-0.3238	0.9655
(f_{cs})'	-0.6096	-2.0245	-0.3728	3.2845
(f_{css})'	-0.9537	-2.3884	-0.5856	4.0069
(f_{csc})'	-1.1737	-0.5351	-3.3699	4.9278
(T_s)'	-0.3248	0.3008	-0.2353	1.2593
14 Günlük Numuneler				
(Δ)'	-0.1119	0.0358	0.0344	1.0417
(V_c)'	-0.1461	-0.0781	0.0837	1.1405
(V_s)'	-0.2400	-0.1090	0.0151	1.3339
(S)'	-0.4875	-0.2553	-0.1540	1.8967
(E)'	-0.9311	-1.3486	-0.4202	1.7891
(f_{cc})'	-0.1375	-1.3156	-0.0481	3.6999
(f_{cs})'	-1.0417	-3.1245	-0.5449	2.5012
(f_{css})'	-0.4670	-3.2350	-0.2265	5.7111
(f_{csc})'	-0.4896	-0.3355	0.0360	4.9285
(T_s)'	0.3904	-0.2059	0.5424	0.2732
28 Günlük Numuneler				
(Δ)'	-0.0719	0.0370	0.0474	0.9875
(V_c)'	-0.0964	-0.1828	0.0998	1.1794
(V_s)'	-0.1352	-2.0221	0.0722	3.0851
(S)'	-0.4947	-0.3413	-0.1683	2.0042
(E)'	-0.0228	-2.3073	0.0021	3.7348
(f_{cc})'	-1.7361	-31.3332	-0.9461	3.3281
(f_{cs})'	-2.5735	-36.6320	-1.3766	35.0154
(f_{css})'	-3.1893	-40.6278	1.7480	41.7621
(f_{csc})'	-1.2994	-1.0249	-0.4105	46.5651
(T_s)'	-2.1322	-27.7733	-1.0046	31.9101
365 Günlük Numuneler				
(Δ)'	0.0736	0.0638	0.1167	0.7459
(V_c)'	-0.1443	-0.0142	0.0613	1.0971
(V_s)'	-0.1762	-0.0275	0.0249	1.1788
(S)'	-0.0880	-0.1371	0.0459	1.1793
(E)'	0.3830	-1.0138	0.3102	2.4408
(f_{cc})'	0.7074	-1.5325	0.3626	1.3206
(f_{cs})'	0.8510	-0.9165	0.3758	1.4626
(f_{css})'	1.0637	-9.8091	0.6462	0.6897
(f_{csc})'	-0.9637	-0.1925	-0.2846	9.0992
(T_s)'	1.2502	-0.1165	0.6587	-0.7924

Tablo C.46. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F5)' fonksiyonundan bulunan $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri

Özelik Çifti	7 Günlük			14 Günlük			28 Günlük			365 Günlük		
	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$
$\Delta-Vc$	0.008	0.077	0.064	0.015	0.049	0.070	0.051	1.023	0.101	0.060	0.058	0.004
$\Delta-Vs$	0.119	0.028	0.064	0.095	0.030	0.000	0.027	1.035	0.096	0.103	0.064	0.051
$\Delta-S$	0.259	0.147	0.034	0.006	0.183	0.125	0.053	0.814	0.072	0.063	0.269	0.027
$\Delta-fcc$	1.426	0.576	0.271	0.432	0.871	0.343	1.392	0.257	0.249	1.247	0.533	0.386
$\Delta-fcs$	1.431	1.083	0.081	0.956	0.632	0.018	1.187	2.997	0.354	1.516	0.742	0.273
$\Delta-fcss$	1.331	1.031	0.099	0.652	1.149	0.451	0.716	0.909	0.687	1.726	0.836	0.255
$\Delta-fcsç$	1.158	1.178	0.312	0.845	0.865	0.164	0.642	1.175	0.896	1.760	0.652	0.497
$\Delta-E$	0.049	0.632	0.273	0.213	0.417	0.057	0.125	1.085	0.217	0.183	0.536	0.242
$\Delta-Ts$	0.178	0.022	0.072	0.959	0.086	0.667	0.580	0.345	0.288	0.218	0.451	0.223
$Vc-Vs$	0.111	0.105	0.128	0.080	0.018	0.070	0.024	0.012	0.004	0.043	0.006	0.047
$Vc-S$	0.268	0.224	0.098	0.021	0.232	0.195	0.002	0.209	0.173	0.123	0.327	0.022
$Vc-fcc$	1.435	0.653	0.207	0.447	0.919	0.413	1.340	0.767	0.149	1.307	0.475	0.390
$Vc-fcs$	1.440	1.161	0.145	0.971	0.681	0.053	1.135	1.974	0.455	1.576	0.684	0.278
$Vc-fcss$	1.340	1.109	0.163	0.667	1.197	0.521	0.664	1.932	0.788	1.785	0.779	0.259
$Vc-fcsç$	1.166	1.255	0.376	0.860	0.914	0.234	0.591	2.198	0.997	1.820	0.594	0.502
$Vc-E$	0.041	0.709	0.337	0.228	0.466	0.014	0.176	0.062	0.317	0.123	0.478	0.238
$Vc-Ts$	0.186	0.055	0.008	0.974	0.037	0.597	0.529	1.368	0.389	0.278	0.394	0.219
$Vs-S$	0.378	0.119	0.030	0.100	0.214	0.125	0.026	0.221	0.168	0.166	0.332	0.024
$Vs-fcc$	1.546	0.548	0.335	0.527	0.901	0.343	1.364	0.778	0.153	1.350	0.469	0.437
$Vs-fcs$	1.551	1.055	0.017	1.051	0.662	0.018	1.159	1.962	0.450	1.619	0.678	0.324
$Vs-fcss$	1.450	1.003	0.035	0.747	1.179	0.451	0.689	1.944	0.784	1.829	0.773	0.306
$Vs-fcsç$	1.277	1.150	0.248	0.940	0.895	0.164	0.615	2.210	0.992	1.863	0.589	0.548
$Vs-E$	0.070	0.604	0.209	0.307	0.447	0.057	0.152	0.050	0.313	0.080	0.472	0.191
$Vs-Ts$	0.297	0.050	0.136	1.054	0.055	0.667	0.553	1.380	0.384	0.321	0.388	0.172
$S-fcc$	1.167	0.429	0.306	0.427	0.687	0.218	1.338	0.558	0.321	1.184	0.802	0.413
$S-fcs$	1.172	0.937	0.047	0.951	0.449	0.143	1.133	2.183	0.282	1.452	1.010	0.300
$S-fcss$	1.072	0.885	0.065	0.646	0.965	0.326	0.662	1.723	0.615	1.662	1.105	0.282
$S-fcsç$	0.899	1.031	0.278	0.840	0.682	0.039	0.589	1.989	0.824	1.696	0.921	0.524
$S-E$	0.309	0.486	0.238	0.207	0.234	0.182	0.178	0.271	0.144	0.247	0.804	0.215
$S-Ts$	0.081	0.169	0.106	0.954	0.269	0.792	0.527	1.159	0.216	0.155	0.720	0.196
$fcc-fcs$	0.005	0.508	0.353	0.524	0.239	0.361	0.205	2.741	0.603	0.268	0.209	0.113
$fcc-fcss$	0.095	0.456	0.371	0.220	0.278	0.108	0.676	1.166	0.936	0.478	0.304	0.131
$fcc-fcsç$	0.268	0.602	0.583	0.413	0.006	0.179	0.749	1.431	1.145	0.512	0.119	0.111
$fcc-E$	1.476	0.057	0.544	0.220	0.454	0.400	1.516	0.829	0.466	1.431	0.003	0.628
$fcc-Ts$	1.248	0.598	0.199	0.527	0.956	1.010	0.812	0.601	0.537	1.029	0.081	0.609
$fcs-fcss$	0.100	0.052	0.018	0.304	0.516	0.468	0.471	3.906	0.333	0.210	0.095	0.018
$fcs-fcsç$	0.274	0.094	0.231	0.111	0.233	0.182	0.544	4.172	0.542	0.244	0.089	0.224
$fcs-E$	1.481	0.451	0.191	0.744	0.215	0.039	1.311	1.912	0.138	1.699	0.206	0.515
$fcs-Ts$	1.254	1.105	0.153	0.003	0.718	0.649	0.607	3.342	0.066	1.298	0.290	0.496
$fcss-fcsç$	0.173	0.146	0.213	0.193	0.283	0.287	0.073	0.266	0.209	0.034	0.184	0.242
$fcss-E$	1.381	0.399	0.174	0.439	0.731	0.508	0.841	1.994	0.471	1.909	0.301	0.497
$fcss-Ts$	1.153	1.053	0.171	0.307	1.234	1.118	0.136	0.564	0.399	1.507	0.385	0.478
$fcsç-E$	1.207	0.545	0.039	0.633	0.448	0.221	0.767	2.260	0.680	1.943	0.117	0.739
$fcsç-Ts$	0.980	1.200	0.384	0.114	0.951	0.831	0.062	0.830	0.608	1.542	0.201	0.720
$E-Ts$	0.227	0.654	0.345	0.746	0.503	0.610	0.705	1.430	0.072	0.401	0.084	0.019

Tablo C.47. 7, 14, 28 ve 365 günlük betonlarda (F6)' fonksiyonundan bulunan $T(A)_{ij}$, $T(B)_{ij}$ ve $T(C)_{ij}$ değerleri

Özelik Çifti	7 Günlük			14 Günlük			28 Günlük			365 Günlük		
	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$	$T(A)_{ij}$	$T(B)_{ij}$	$T(C)_{ij}$
Δ -Vc	0.041	0.016	0.013	0.034	0.114	0.049	0.024	0.220	0.052	0.218	0.078	0.055
Δ -Vs	0.256	0.149	0.108	0.128	0.145	0.019	0.063	2.059	0.025	0.250	0.091	0.092
Δ -S	0.127	0.157	0.131	0.376	0.291	0.188	0.423	0.378	0.216	0.162	0.201	0.071
Δ -fcc	0.203	0.147	0.022	0.819	1.384	0.455	0.049	2.344	0.045	0.309	1.078	0.194
Δ -fcs	0.409	1.485	0.391	0.026	1.351	0.082	1.664	31.37	0.993	0.634	1.596	0.246
Δ -fcss	0.524	2.043	0.440	0.930	3.160	0.579	2.502	36.66	1.424	0.777	0.980	0.259
Δ -fcsç	0.868	2.407	0.653	0.355	3.271	0.261	3.117	40.67	1.701	0.990	9.873	0.529
Δ -E	1.088	0.554	3.437	0.378	0.371	0.002	1.228	1.062	0.458	1.037	0.256	0.401
Δ -Ts	0.239	0.282	0.303	0.502	0.242	0.508	2.060	27.81	1.052	1.177	0.180	0.542
Vc-Vs	0.215	0.133	0.121	0.094	0.031	0.069	0.039	1.839	0.028	0.032	0.013	0.036
Vc-S	0.085	0.141	0.144	0.341	0.177	0.238	0.398	0.158	0.268	0.056	0.123	0.015
Vc-fcc	0.245	0.131	0.035	0.785	1.271	0.504	0.074	2.125	0.098	0.527	1.000	0.249
Vc-fcs	0.367	1.469	0.405	0.009	1.238	0.132	1.640	31.15	1.046	0.852	1.518	0.301
Vc-fcss	0.482	2.027	0.454	0.896	3.046	0.629	2.477	36.45	1.476	0.995	0.902	0.314
Vc-fcsç	0.826	2.391	0.666	0.321	3.157	0.310	3.093	40.44	1.648	1.208	9.795	0.585
Vc-E	1.046	0.538	3.451	0.343	0.257	0.048	1.203	0.842	0.510	0.819	0.178	0.346
Vc-Ts	0.197	0.298	0.316	0.536	0.128	0.459	2.036	27.59	1.104	1.394	0.102	0.597
Vs-S	0.129	0.009	0.023	0.247	0.146	0.169	0.360	1.681	0.240	0.088	0.110	0.021
Vs-fcc	0.459	0.002	0.086	0.691	1.240	0.435	0.112	0.285	0.070	0.559	0.986	0.285
Vs-fcs	0.153	1.336	0.284	0.102	1.207	0.063	1.601	29.31	1.018	0.884	1.505	0.338
Vs-fcss	0.268	1.894	0.333	0.802	3.016	0.560	2.438	34.61	1.449	1.027	0.889	0.351
Vs-fcsç	0.612	2.258	0.545	0.227	3.126	0.242	3.054	38.61	1.676	1.240	9.782	0.621
Vs-E	0.832	0.405	3.330	0.250	0.226	0.021	1.164	0.997	0.483	0.788	0.165	0.309
Vs-Ts	0.017	0.431	0.195	0.630	0.097	0.527	1.997	25.75	1.077	1.426	0.089	0.634
S-fcc	0.330	0.010	0.109	0.444	1.093	0.266	0.472	1.966	0.170	0.471	0.877	0.264
S-fcs	0.282	1.327	0.260	0.350	1.060	0.106	1.241	30.99	0.778	0.795	1.395	0.317
S-fcss	0.397	1.886	0.309	0.554	2.869	0.391	2.079	36.29	1.208	0.939	0.779	0.330
S-fcsç	0.741	2.250	0.522	0.020	2.980	0.073	2.695	40.29	1.916	1.152	9.672	0.600
S-E	0.961	0.396	3.306	0.002	0.080	0.190	0.805	0.684	0.242	0.876	0.055	0.330
S-Ts	0.112	0.439	0.172	0.878	0.049	0.696	1.638	27.43	0.836	1.338	0.021	0.613
fcc-fcs	0.612	1.338	0.369	0.794	0.033	0.372	1.713	29.03	0.948	0.324	0.519	0.052
fcc-fcss	0.727	1.896	0.418	0.111	1.776	0.125	2.551	34.33	1.379	0.468	0.097	0.066
fcc-fcsç	1.071	2.260	0.631	0.464	1.886	0.194	3.166	38.32	1.746	0.681	8.795	0.336
fcc-E	1.291	0.407	3.415	0.442	1.013	0.456	1.277	1.282	0.413	1.347	0.821	0.595
fcc-Ts	0.442	0.429	0.281	1.321	1.143	0.963	2.109	25.47	1.007	0.867	0.897	0.349
fcs-fcss	0.115	0.559	0.049	0.904	1.809	0.497	0.837	5.299	0.431	0.144	0.616	0.013
fcs-fcsç	0.459	0.922	0.262	0.330	1.919	0.178	1.453	9.295	2.694	0.356	8.277	0.284
fcs-E	0.679	0.931	3.046	0.352	0.980	0.084	0.437	30.31	0.536	1.671	1.340	0.647
fcs-Ts	0.170	1.767	0.088	0.528	1.110	0.590	0.396	3.560	0.059	0.543	1.416	0.296
fcss-fcsç	0.344	0.364	0.213	0.575	0.110	0.318	0.616	3.996	3.125	0.213	8.893	0.270
fcss-E	0.564	1.489	2.997	0.552	2.789	0.581	1.274	35.61	0.966	1.815	0.724	0.660
fcss-Ts	0.285	2.325	0.137	1.432	2.919	1.087	0.441	8.859	0.372	0.399	0.800	0.283
fcsç-E	0.220	1.853	2.784	0.023	2.899	0.263	1.890	39.60	2.159	2.027	9.617	0.931
fcsç-Ts	0.629	2.689	0.350	0.857	3.029	0.769	1.057	12.86	2.753	0.186	9.693	0.013
E-Ts	0.849	0.836	3.135	0.880	0.130	0.506	0.833	26.78	0.594	2.214	0.076	0.943

ÖZGEÇMİŞ

Hakan Nuri Atahan 1972 yılında Balıkesir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara Bahçelievler Deneme Lisesinde tamamladı. 1989 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi ve 1993 yılında buradan mezun oldu. Aynı yıl İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programında Yüksek Lisans eğitime başladı ve 1996 yılında bu programı tamamladı. 1996 yılında yine İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği programında Prof. Dr. Mehmet Ali Taşdemir danışmanlığında Doktora çalışmasına başladı. Yazar halen, İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı’nda 1996 yılında araştırma görevlisi olarak başladığı görevine devam etmektedir.