

339660

**BETON DAYANIMININ STANDART,
TAHRİBATLI, YARI-TAHRİBATLI VE
TAHRİBATSIZ YÖNTEMLERLE
BELİRLENMESİ**

**Ömer ARIÖZ .
Doktora Tezi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Aralık-2004**

**“Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonunca kabul edilen 040201 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.”**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Ömer Arıöz'ün Beton Dayanımının Standart, Tahribatlı, Yarı-tahribatlı ve Tahribatsız Yöntemlerle Belirlenmesi başlıklı **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 20.12.2004 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı): Prof. Dr. MUSTAFA TUNCAN

Üye : Prof. Dr. AHMET TUNCAN

Üye (II. Danışman) : Doç. Dr. KAMBİZ RAMYAR

Üye : Doç. Dr. BEKİR KARASU

Üye : Yard. Doç. Dr. YÜCEL GÜNEY

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...11.01.2005..... tarih ve2/1..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Altuğ İFTAR
Fen Bilimleri Enstitüsü
Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

BETON DAYANIMININ STANDART, TAHRİBATLI, YARI-TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

ÖMER ARIÖZ

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman : Prof. Dr. Mustafa TUNCAN

II. Danışman : Doç. Dr. Kambiz RAMYAR

2004, 233 sayfa

Beton üzerinde uygulanan en önemli kalite testi betonun kalitesi ve diğer önemli özellikleri hakkında önemli bilgiler veren basınç dayanımı testidir. Bu testlerin sonuçlarının tasarımda kullanılan dayanım değeri ile karşılaştırılması yoluyla kalite denetimi yapılmaktadır. Standart testler betonun potansiyel dayanımı hakkında bir fikir vermekte ancak sahadaki betonun sıkıştırılması ve kür koşulları farklı olabileceğinden yerinde beton dayanımını iyi temsil edemeyebilmektedir. Karot yöntemi yerinde beton dayanımlarının belirlenmesi için en güvenilir yöntemlerden biri olmasına rağmen, tahribatlı bir test yöntemi olduğundan uygulanabilirliği kısıtlıdır. Yerinde beton dayanımlarının belirlenmesi sadece tasarım hesapları açısından değil, aynı zamanda iyi bir iş planlaması açısından da önemlidir. Mevcut çalışmada, farklı beton karışımlarından üretilen beton numuneler üzerinde standart silindir ve küp basınç dayanımı testleri, karot dayanımı testleri yapılmış, sesüstü atım hızı, beton çekici, çekip çıkarma ve beton olgunluk yöntemleri kullanılmış, elde edilen sonuçlar beton dayanımlarının imalat esnasında ve sonrasında en uygun şekilde belirlenebilmesi için analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton Dayanımı, Standart Testler, Karot, Sesüstü Atım Hızı, Beton Çekici, Çekip-çıkarma, Olgunluk

ABSTRACT

PhD Thesis

DETERMINATION OF CONCRETE STRENGTH BY STANDARD, DESTRUCTIVE, SEMI-DESTRUCTIVE AND NONDESTRUCTIVE METHODS

ÖMER ARIÖZ

**Anadolu University
Graduate School of Sciences
Civil Engineering Program**

Supervisor : Prof.Dr. Mustafa TUNCAN

Co-Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

2004, 233 pages

The most important quality test on concrete is the determination of compressive strength that indicates the quality and gives an idea about the other important properties of concrete. The results of the standard tests are compared with the values used in design calculations and the quality is controlled. Standard tests give an idea about the potential strength of concrete but they may not represent in situ strength of concrete due to the differences between the compaction degree and curing conditions of concrete and those of standard samples. Core method is the most reliable method for determination of in situ strength of concrete but it is a destructive test and therefore, the applicability of the test is limited. In situ strength is also important for the planning of the construction works. In the present study, the results obtained from standard tests, core tests, ultrasonic pulse velocity tests, rebound hammer tests, pull-out tests and maturity methods were analyzed for the determination of concrete strength during the construction stage and at the later ages.

Keywords: Concrete Strength, Standard Tests, Core, Ultrasonic Pulse Velocity, Rebound Hammer, Pull-out, Maturity

TEŞEKKÜR

Doktora öğrencisi olarak, bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için maddi ve manevi desteklerinden dolayı başta Rektör Sayın Prof. Dr. Engin ATAÇ olmak üzere, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanı Sayın Prof. Dr. Nezih VARGAN ve tüm Anadolu Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tez danışmanım, çalışmaya başladığımdan beri her zaman yardım aldığım hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa TUNCAN'a, benim için gösterdiği sabır ve bu tezin yürütülmesi için gösterdiği olağanüstü gayretinden ve manevi desteğinden dolayı, ikinci tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Kambiz RAMYAR'a, gösterdiği çok olumlu ilgiden ve bu tezin yapılabilmesi için verdiği katkıdan dolayı teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tezin şekillenmesinde büyük emekleri olan Sayın Prof. Dr. Ahmet TUNCAN ve Sayın Doç. Dr. Bekir KARASU'ya teşekkür ederim.

Ayrıca, arkadaşlarım, aynı zamanda meslekdaşlarım Araş.Gör. Cenk ÇETİN ve Kadir KILINÇ'a tez süresi boyunca gösterdikleri yakınlıklarından dolayı teşekkür ederim.

Tez kapsamında kullanılan bazı mekanik aletlerin gerek yapımı gerekse bakımı açısından, deneylerin en verimli şekilde yapılabilmesi için teknik yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Osman ALTUNCU ve tüm atölye çalışanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu tezin tamamlanabilmesi için her zaman yanımda bulunan ailem ve bana yardımcı olabilmek için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan hayat arkadaşım sevgili eşim Evren ARIÖZ'e teşekkür ederim.

Ömer ARIÖZ

Aralık-2004

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxii

1. GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	5
2. BETONUN BASINÇ DAYANIMI.....	8
2.1. Basınç Dayanımının Doğası.....	8
2.1.1. Çekmede dayanım.....	10
2.1.2. Basıncıta çatlama ve kırılma.....	11
2.1.3. Mikroçatlaklar.....	12
2.1.4. Agrega-çimento hamuru arayüzeyi.....	13
2.2. Beton Yaşının Dayanım Üzerindeki Etkisi.....	15
2.3. Basınç Dayanımının Belirlenmesi.....	16
3. BETON BASINÇ DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	18
3.1. Karışım Oranlarının Etkisi.....	18
3.1.1. Su/çimento oranının etkisi.....	18
3.1.2. Çimento hamurundaki jel/boşluk oranının etkisi.....	20
3.1.3. Agrega/çimento oranının dayanıma etkisi.....	21
3.2. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	23
3.2.1. Çimento özelliklerinin beton dayanımına etkisi.....	23
3.2.2. Agrega özelliklerinin beton dayanımına etkisi.....	23

3.2.3. Karma suyunun kalitesinin beton dayanımına etkisi.....	24
3.3. Betona Uygulanan Sıkıştırma İşleminin	
Beton Dayanımına Etkisi.....	24
3.4. Beton Kür Ortamının Beton Dayanımına Etkisi.....	26
3.4.1. Kür sürecinde ısı ve nemin beton dayanımına etkisi.....	26
3.4.2. Zararlı çevre koşullarının ve kür ortamlarının	
beton dayanımına etkisi.....	29
3.4.2.1. Sülfat etkisi.....	30
3.4.2.2. Donma-çözülme etkisi.....	31
4. DAYANIM TESTLERİNİN SONUÇLARINI ETKİLEYEN	
FAKTÖRLER.....	33
4.1. Boyut Etkisi.....	33
4.2. Şekil Etkisi.....	34
4.3. Boy/Çap Oranının Etkisi.....	35
4.4. Numunenin Nem Durumunun Etkisi.....	35
4.5. Numune Sıcaklığının Etkisi.....	36
4.6. Numune Uç Durumlarının ve Başlığın Etkisi.....	36
4.7. Yükleme Hızının Etkisi.....	37
5. KONU İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALARIN	
GÖZDEN GEÇİRİLMESİ.....	38
5.1. Standard Yöntemler.....	39
5.1.1. Küp testi.....	40
5.1.2. Silindir testi.....	41
5.2. Tahribatlı Yöntemler (Karot Testi).....	42
5.2.1. Karot dayanımlarını etkileyen faktörler.....	43
5.2.1.1. Karot narinliğinin (boy/çap oranı) etkisi.....	43
5.2.1.2. Karot çapının etkisi.....	45
5.2.1.3. Karot alma yönünün etkisi.....	47
5.2.1.4. Örselenmenin etkisi.....	48

5.2.1.5. Karot numunesinde bulunan donatı parçalarının etkisi.....	49
5.2.1.6. Kür süresi ve kür koşullarının etkisi.....	50
5.2.1.7. Karot numunelerinin nem durumunun etkisi.....	51
5.2.2. Karot testleri sonuçlarının değerlendirilmesi.....	53
5.2.3. Küçük karotların kullanımı.....	59
5.3. Tahribatsız Yöntemler.....	60
5.3.1. Beton test çekici.....	62
5.3.2. Sesüstü atım hızı yöntemi.....	67
5.3.3. Beton çekici ve sesüstü atım hızı yöntemlerinin birlikte kullanılması.....	73
5.3.4. Diğer tahribatsız yöntemler.....	76
5.4. Yarı-tahribatlı Yöntemler.....	77
5.4.1. Çekip çıkarma testi.....	78
5.4.1.1. Lok testi (döküm esnasında).....	79
5.4.1.2. Capo testi (delik delinerek).....	81
5.4.1.3. İçsel kırılma testi.....	82
5.4.2. Çekip koparma testi.....	83
5.4.3. Batma direnci testi.....	84
5.4.4. Kırıp-koparma testi.....	86
5.5. Betonda Olgunluk Kavramı.....	87
5.6. Diğer Yöntemler.....	90
5.6.1. Yerinde dökme silindir testi.....	90
5.6.2. Hızlandırılmış kür testi.....	91
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	94
6.1. Birinci Bölümde Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Beton Karışımları.....	97
6.2. İkinci Bölümde Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Beton Karışımları.....	100
6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri.....	102
6.4. Betonların Kalıplardan Çıkarılması ve Kürlenmesi.....	110

6.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	112
7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	126
7.1. Standart Testlerin Sonuçları.....	126
7.2. Karot Deneylerinin Sonuçları.....	138
7.2.1. Karot boy/çap oranının karot dayanımı üzerindeki etkisi.....	150
7.2.2. Karot çapının karot dayanımı üzerindeki etkisi.....	164
7.2.3. Karot deneyleri sonuçlarının değerlendirilmesi.....	176
7.2.4. Beton dayanım seviyesinin karot dayanımına etkisi.....	179
7.3. Beton Çekici Testlerinin Sonuçları.....	181
7.4. Sesüstü Atım Hızı Testlerinin Sonuçları.....	187
7.5. Beton Çekici ve Sesüstü Atım Hızı Testlerinin Birlikte Değerlendirilmesi.....	193
7.6. Çekip-Çıkarma Testleri Sonuçları.....	196
7.7. Olgunluk Testleri Sonuçları.....	199
7.8. Çekip-çıkarma Kuvveti ve Diğer Testlerin Sonuçları Arasındaki İlişki.....	203
7.9. Sıkıştırmanın Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	206
7.10. Kürün Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi.....	210
7.11. Sülfat Etkisi.....	214
7.12. Donma-çözülme Etkisi.....	215
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	216
KAYNAKÇA.....	223

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Kırılğan malzemelerin eksenel basınç yükü altında kırılma modelleri..	9
2.2. Orowan'ın iki eksenli yükler altında kırılma kriteri.....	11
2.3. Gözlenen çatlak uzunluğu ile gerilme/dayanım oranı arasındaki ilişki.....	13
3.1. Su/çimento oranı ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	19
3.2. Çimento harcının Jel/Boşluk oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	21
3.3. Agrega hacmi ile silindir beton numunelerin (100 mm çapında ve 200 mm boyunda) basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	22
3.4. Vibrasyonun betonun hava içeriği üzerindeki etkisi.....	25
3.5. Farklı ortamlarda kür edilen beton numunelerin basınç dayanımı gelişimleri.....	27
3.6. Kür sıcaklığının basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	27
3.7. Kür sıcaklığının beton basınç dayanımı gelişimine etkisi.....	28
3.8. Farklı sıcaklıklarda yerleştirilen ancak 21 °C sıcaklıkta kür edilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	28
5.1. Küp numunede basınç dayanımı testi şeması.....	41
5.2. Beton döküm yönüne göre beton içerisinde terleme sonucu oluşan boşlukların pozisyonu.....	48
5.3. Kür süresi ve koşullarının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi.....	50
5.4. Beton test çekicinin yapısı.....	63
5.5. Beton nem içeriğinin geri sıçrama sayıları üzerindeki etkisi.....	64
5.6. Geri sıçrama sayısı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	66
5.7. Geri sıçrama sayısı ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	66
5.8. Sesüstü atım hızı test cihazının mekanizması.....	67
5.9. Sesüstü atım hızı ölçümlerinde gönderici ve alıcının konumu (a) doğrudan iletim (b) yarı-doğrudan iletim (c) dolaylı iletim.....	68
5.10. Çimento hamuru, harç ve beton için sesüstü atım hızı ve basınç dayanımı ilişkisi.....	70

5.11. Beton numunesi nem durumunun sesüstü atım hızı değerine etkisi.....	70
5.12. Sesüstü atım hızı ve beton test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılması.....	74
5.13. Sesüstü atım hızı ve beton test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılması (logaritmik).....	74
5.14. Çekip-çıkarma testi uygulamasının şematik anlatımı.....	78
5.15. Çekip-çıkarma testinde metal parçanın iki farklı şekilde yerleştirilmesi.....	80
5.16. Çekip-çıkarma kuvveti ile basınç dayanımı arasındaki ilişki [1].....	81
5.17. Capo testi uygulamasının şematik gösterimi.....	82
5.18. İçsel kırılma testi uygulamasının şematik gösterimi.....	83
5.19. Çekip-koparma testinin uygulanışı.....	84
5.20. Batma direnci testi uygulamasının şematik anlatımı.....	85
5.21. Kırıp-koparma testi uygulamasının şematik gösterimi.....	86
5.22. Beton olgunluk faktörü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin kurulması.....	89
5.23. Basınç dayanımı ile olgunluk arasındaki ilişkinin kurulması (logaritmik).....	89
5.24. Yerinde dökme silindir testi.....	91
6.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünün akım şeması.....	95
6.2. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünün akım şeması.....	97
6.3. Kalıpların beton dökümü için hazırlanması.....	103
6.4. Beton dökümü için kalıpların yağlanması işlemi.....	103
6.5. Betonun üretildikten sonra metal hazneye dökülmesi işlemi.....	104
6.6. Betonun standart deneylerde kullanılan kalıplara yerleştirilmesi işlemi.....	104
6.7. Standart deney kalıplarına yerleştirilen betonun sıkıştırılması işlemi.....	105
6.8. Betonun kiriş kalıplarına yerleştirilmesi işlemi.....	105
6.9. Kiriş kalıplarına yerleştirilen betonun sıkıştırılması işlemi.....	106
6.10. Taze betonda çökme miktarının ölçülmesi.....	107
6.11. Taze betonda çökme deneyinin uygulaması.....	107

6.12. Taze betonda hava tayini cihazının şematik gösterimi ve cihazın fotoğrafı.....	108
6.13. Taze betonda hava miktarı tayini deneyinin uygulaması.....	108
6.14. Standard deney numunelerinin kalıplardan çıkarılması.....	110
6.15. Kiriş beton numunelerinin kalıplardan çıkarılması.....	111
6.16. Kalıplardan çıkarılan standart numunelerin kütleme işlemine hazırlanması.....	111
6.17. Standart deney numunelerinin ve kiriş numunelerin laboratuvar ortamında ıslak kür edilmesi.....	112
6.18. Laboratuvarda kurulmuş karot alma makinesinin görüntüsü.....	113
6.19. Kesme makinesinin görüntüsü.....	114
6.20. Kiriş numunelerden karot çıkarılması.....	115
6.21. Çıkarılan karot numunelerin görünümü.....	115
6.22. Karot numunelerin kesilmesi.....	116
6.23. Kesilen karot numunelerin görünümü.....	116
6.24. Karot numunelere başlık yapılması.....	117
6.25. Karot numunelerin başlık yapıldıktan sonra görünümü.....	117
6.26. Standart numunelere ve karot numunelerine uygulanan basınç dayanımı testi.....	118
6.27. Deneylerde kullanılan beton çekici.....	118
6.28. Beton çekici deneyinin uygulaması.....	119
6.29. Deneylerde kullanılan sesüstü atım hızı test cihazı.....	119
6.30. Kiriş numunenin sesüstü atım hızı testi için çizilerek hazırlanmış görünümü.....	120
6.31. Sesüstü atım hızı cihazı ile kiriş numunede ölçüm yapılması.....	120
6.32. Çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan mekanizma.....	121
6.33. Çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan mekanizmanın parçaları.....	121
6.34. Kalıplara yerleştirilen metal parçalar.....	122
6.35. Çekip-çıkarma deneyinin uygulaması.....	122
6.36. Çekip çıkarma testinde kullanılan metal parçanın ve düzeneğin boyutları.....	123
6.37. Deneylerde kullanılan beton olgunluk ölçeri.....	124

6.38. Beton olgunluk ölçerinin ölçümler için bağlanması.....	124
7.1. Maksimum tane boyutu 10 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	126
7.2. Maksimum tane boyutu 15 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	127
7.3. Maksimum tane boyutu 22 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	127
7.4. Maksimum tane boyutu 30 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	128
7.5. Maksimum tane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	128
7.6. Maksimum tane boyutu 15 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	129
7.7. Maksimum tane boyutu 22 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	129
7.8. Maksimum tane boyutu 30 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri.....	130
7.9. Çeşitli dayanım seviyelerindeki betonların 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı gelişimleri.....	136
7.10. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	138
7.11. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	139
7.12. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	139
7.13. Maksimum agrega tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	140

7.14. Maksimum agregata tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	140
7.15. Maksimum agregata tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	141
7.16. Maksimum agregata tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	141
7.17. Maksimum agregata tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	142
7.18. Maksimum agregata tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	142
7.19. Maksimum agregata tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	143
7.20. Maksimum agregata tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	143
7.21. Maksimum agregata tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	144
7.22. Maksimum agregata tane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	144
7.23. Maksimum agregata tane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	145

7.24. Maksimum agregâ tane boyutu 10 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	145
7.25. Maksimum agregâ tane boyutu 15 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	146
7.26. Maksimum agregâ tane boyutu 15 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	146
7.27. Maksimum agregâ tane boyutu 15 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	147
7.28. Maksimum agregâ tane boyutu 22 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	147
7.29. Maksimum agregâ tane boyutu 22 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	148
7.30. Maksimum agregâ tane boyutu 22 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	148
7.31. Maksimum agregâ tane boyutu 30 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları.....	149
7.32. Maksimum agregâ tane boyutu 30 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	149
7.33. Maksimum agregâ tane boyutu 30 mm olan dere agregâsı ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları.....	150

7.34. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 144 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	157
7.35. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	158
7.36. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 69 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	158
7.37. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 46 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	159
7.38. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 144 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	159
7.39. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	160
7.40. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 69 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	160
7.41. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 46 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi.....	161
7.42. Agregatürü ve maksimum agrega boyutundan bağımsız olarak boy/çap düzeltme faktörü grafiği.....	163
7.43. Maksimum agrega boyutu 10 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	165
7.44. Maksimum agrega boyutu 15 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	165
7.45. Maksimum agrega boyutu 22 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	166
7.46. Maksimum agrega boyutu 30 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	166
7.47. Maksimum agrega boyutu 10 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	167
7.48. Maksimum agrega boyutu 15 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	168

7.49. Maksimum agrega boyutu 22 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	168
7.50. Maksimum agrega boyutu 30 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası.....	168
7.51. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=2).....	172
7.52. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=1).....	172
7.53. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=2).....	173
7.54. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=1).....	173
7.55. Agregat türü ve maksimum agrega boyutundan bağımsız olarak çap düzeltme faktörü grafiği (boy/çap=2).....	175
7.56. Agregat türü ve maksimum agrega boyutundan bağımsız olarak çap düzeltme faktörü grafiği (boy/çap=2).....	175
7.57. Kırmataş ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen geri sıçrama sayıları.....	181
7.58. Dere agregası ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen geri sıçrama sayıları.....	182
7.59. Kırmataş ile üretilen betonlarda geri sıçrama sayısı ile basınç dayanım arasındaki ilişki.....	183
7.60. Dere agregası ile üretilen betonlarda geri sıçrama sayısı ile basınç dayanım arasındaki ilişki.....	184
7.61. Farklı dayanım seviyelerindeki betonlar için geri sıçrama sayısının beton yaşı ile değişimi.....	185
7.62. Basınç dayanımı ile geri sıçrama sayısı arasındaki ilişki.....	186
7.63. Kırmataş ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen sesüstü atım hızı değerleri.....	187

7.64. Dere agregası ile üretilen beton kırışler üzerinde ölçülen sesüstü atım hızı değerleri.....	188
7.65. Kırmataş ile üretilen betonlarda sesüstü atım hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	189
7.66. Dere agregası ile üretilen betonlarda sesüstü atım hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	190
7.67. Farklı dayanım seviyelerindeki betonlar için sesüstü atım hızı değerlerinin beton yaşı ile değişimi.....	191
7.68. Basınç dayanımı ile sesüstü atım hızı değerleri arasındaki ilişki.....	192
7.69. Çekip-çıkarma kuvvetinin beton yaşı ile değişimi	196
7.70. Çekip-çıkarma kuvvetinin basınç dayanımı ile değişimi	197
7.71. Mevcut çalışma ve diğer araştırmacıların sonuçları.....	198
7.72. Beton kür sıcaklığının kür süresi boyunca değişimi.....	200
7.73. Beton olgunluk faktörünün kür süresi boyunca değişimi.....	200
7.74. Beton basınç dayanımının olgunluk faktörü ile ilişkisi.....	201
7.75. Çekip-çıkarma kuvveti ile karot dayanımı arasındaki ilişki.....	203
7.76. Çekip-çıkarma kuvveti ile geri sıçrama sayısı arasındaki ilişki.....	204
7.77. Çekip-çıkarma kuvveti ile sesüstü atım hızı değerleri arasındaki ilişki.....	204
7.78. Çekip-çıkarma kuvveti ile beton olgunluk faktörü arasındaki ilişki.....	203
7.79. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarının yaş ile değişimi.....	206
7.80. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen sesüstü atım hızlarının yaş ile değişimi.....	207
7.81. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen çekip-çıkarma kuvvetlerinin yaş ile değişimi.....	207
7.82. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlardan çıkarılan karotların 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı.....	208
7.83. Şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlardan çıkarılan karotların dayanımının vibratörle sıkıştırılmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımına oranı.....	209

7.84. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarının yaş ile değişimi.....	210
7.85. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen sesüstü atım hızlarının yaş ile değişimi.....	211
7.86. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen çekip-çıkarma kuvvetlerinin yaş ile değişimi.....	211
7.87. Farklı kür edilen betonlardan çıkarılan karotların basınç dayanımının 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı.....	212
7.88. Hava kürü ve önce su sonra hava kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımının su kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımına oranı.....	213
7.89. Sülfat çözeltilerinde bekletilen kırımlardan çıkarılan karotların dayanımının 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı.....	214
7.90. Farklı yaşlarda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış betonlardan çıkarılan karotların basınç dayanımının 150 mm standart küp numunesinin basınç dayanımına oranı.....	215

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
3.1. Beton için önerilen minimum kür süreleri (gün).....	29
3.2. Amerikan Beton Enstitüsü tarafından tanımlanan sülfatlı ortamlar ve beton karışımları için önerilen su/çimento oranları.....	31
5.1. Yerinde beton dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması.....	39
5.2. ASTM C 42-90 ve BS 1881: Part 120: 1983'de belirtilen karot narinlik düzeltme faktörleri	43
5.3. Çeşitli araştırmacılara göre narinlik düzeltme faktörleri.....	44
5.4. Standart olmayan karotlar için dayanım düzeltme faktörlerinin değerleri ve doğrulukları.....	57
5.5. Standart karot dayanımlarından yerinde beton dayanımının tahmininde kullanılacak faktörlerin değerleri ve doğrulukları.....	57
5.6. Tahribatsız testlerin bazı özellikleri.....	62
5.7. Sesüstü atım hızına bağlı olarak beton kalitesi.....	72
5.8. Beton çekici ve sesüstü atım hızı tekniklerinin birlikte değerlendirildiği formüller.....	76
5.9. Hızlandırılmış kür yöntemlerinin bazı özellikleri.....	92
6.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde kullanılan beton karışımlarının adları, kullanılan agrega çeşitleri ve maksimum agrega tane boyutları.....	98
6.2. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde kullanılan agregaların özellikleriyle ve su emme değerleri.....	99
6.3. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları	99
6.4. Deneylerde kullanılan çimentonun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleriyle minerolojik kompozisyonu.....	100
6.5. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan beton karışımlarının adları ve bazı özellikleri.....	101

6.6. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde zararlı ortam koşullarına maruz bırakılan beton karışımlarının adları ve bazı özellikleri.....	101
6.7. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları.....	102
6.8. Birinci bölümde deneylerde kullanılan karışımların çökme ve hava miktarları.....	109
6.9. İkinci bölümde deneylerde kullanılan karışımların çökme ve hava miktarları.....	109
6.10. Deneylerde yararlanılan ilgili standartlar.....	125
7.1. Beton karışımlarının 28 günlük 150 mm küp ve 150x300 mm silindir numunesi basınç dayanımları.....	131
7.2. Standart numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının oranları.....	132
7.3. Standart numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının oranları.....	133
7.4. Standart numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarının oranları.....	133
7.5. TS 500 Standardında yeralan beton sınıfları ve dayanımları.....	135
7.6. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde üretilen beton karışımlarının 150 mm küp cinsinden standart basınç dayanımları.....	137
7.7. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük).....	152
7.8. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük).....	152
7.9. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük).....	152
7.10. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük).....	153
7.11. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük).....	153
7.12. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük).....	153
7.13. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük).....	154

7.14. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük).....	154
7.15. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük).....	154
7.16. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük).....	155
7.17. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük).....	155
7.18. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük).....	155
7.19. Çapı 144 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri.....	161
7.20. Çapı 94 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri.....	162
7.21. Çapı 69 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri.....	162
7.22. Çapı 46 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri.....	163
7.23. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (7 günlük)..	169
7.24. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (28 günlük).	169
7.25. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (90 günlük).	170
7.26. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (7 günlük)..	170
7.27. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (28 günlük).	170
7.28. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (90 günlük).	171
7.29. Karot numuneleri için çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri (boy/çap=2).....	174
7.30. Karot numuneleri için çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri (boy/çap=1).....	174
7.31. Boy/çap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (7 günlük).....	176
7.32. Boy/çap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (28 günlük).....	176

7.33. Boy/çap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (90 günlük).....	177
7.34. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (7 günlük).....	178
7.35. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (28 günlük).....	178
7.36. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (90 günlük).....	178
7.37. Çeşitli dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan çıkarılan karotlar için çap düzeltme faktörleri (boy/çap=1).....	179
7.38. Çeşitli dayanım seviyelerindeki karot numunelerinin dayanımlarının 150 mm standart küp numunelerin dayanımlarına oranı.....	180
7.39. Geri sıçrama sayılarından elde edilen formüller.....	185
7.40. Sesüstü atım hızı değerlerinden elde edilen formüller.....	191
7.41. Beton çekici ve sesüstü atım hızı tekniklerinin birlikte değerlendirildiği formüller.....	193
7.42. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (7 günlük).....	194
7.43. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (28 günlük).....	194
7.44. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (90 günlük).....	194
7.45. Basınç dayanımı ile geri sıçrama sayısı ve sesüstü atım hızı arasındaki ilişki.....	195
8.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde basınç dayanımı tahmininde kullanılmak üzere elde edilen formüller.....	221
8.2. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde basınç dayanımı tahmininde kullanılmak üzere elde edilen formüller.....	222

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACI	: American Concrete Institute, Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	: American Society for Testing and Materials, Amerikan Test ve Malzemeler Birliği
BS	: British Standards, İngiliz Standardları
DTA	: Differential Thermal Analysis, Diferansiyel Isıl Analiz
MIP	: Mercury Intrusion Porosimeter, Civa Gözenek Metresi
TS	: Türk Standardları
UPV	: Ultrasonic Pulse Velocity, Sesüstü Atım Hızı

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Beton; çimento, agrega, su ve bazı durumlarda gerektiğinde katkı malzemelerinin de birlikte karılmasıyla elde edilen kompozit bir malzemedir [1-5]. Betonda agrega olarak adlandırılan taneli malzemeler, çimento hamuru olarak bilinen sert bir bağlayıcı matris içerisinde yer alır. Bağlayıcı malzeme olan çimento hamuru betonun aktif bileşenidir. Çimento su ile reaksiyona girdiğinde bağlayıcılık özelliği olan ürünler oluşur ve bu ürünler agregalar arasındaki boşlukları doldurarak iri taneli malzemeleri birbirine bağlar. Beton yapımında kullanılan agregaların ise üç önemli fonksiyonu vardır. Bunlar; agregaların, çimento-su bağlayıcı malzemesi içerisinde, nispeten daha ucuz dolgu malzemeleri olmaları sayesinde önemli ölçüde ekonomi sağlamaları, uygulanan yüklere ve çevresel etkilere karşı daha dayanıklı bir yapı oluşturmaları ve çimento hamurunun nem değişiklikleri sonucu göstereceği hacim değişikliklerini azaltmaları olarak özetlenebilir [1-4].

Çimento, bağlayıcı malzemelere verilen genel bir isimdir. Çimentolar arasında en çok bilineni ve kullanılanı Portland çimentosudur [2]. Beton üretiminde kullanılan agregaların da bir çok çeşidi olmasına karşın, normal ağırlıklı beton yapımında en çok kullanılan agregalar kum, çakıl ve kırmataştır [2,4]. Ayrıca, uygun bir karışım oranıyla üretilmiş ve iyi bir şekilde sıkıştırılmış olan taze betonun içerisinde kaçınılmaz olarak % 1-2 dolaylarında hapsedilmiş hava bulunur [3].

Portland çimentosu ile üretilen beton dünyada bir çok inşaat mühendisliği projesinde kullanılan en popüler yapı malzemelerinden biridir. Beton, yapı malzemesi olarak modern toplumun temelini oluşturur. Günümüzde barınma amacıyla inşa edilen binalarda, çalışmak için kullanılan ofis yapılarında ve iş merkezlerinde, ulaşım için kullanılan otoyollarda ve köprülerde, çeşitli amaçlar için inşa edilen barajlarda, termik santral inşaatlarında ve daha bir çok alt ve üst yapı projelerinde çoğunlukla beton kullanılmaktadır [2,4,6].

Betonun diğer yapı malzemelerine olan üstünlüğü kullanım yerine göre değişken olsa da, en önemli ayrıcalıkları, ekonomikliğı, kolayca bulunabilen yerel malzemelerle üretilebiliyor olması ve kullanım süresi boyunca daha az bakım ve onarım gerektirmesi şeklinde özetlenebilir [2]. Beton, diğer yapı malzemelerine göre birçok açıdan avantajlıdır. Taze beton, plastik özelliğı sayesinde, istenilen şekil ve boyutlarda kalıplara doldurulabilmekte ve betona istenilen şekil verilebilmektedir. Böylelikle, beton ile çok estetik bir yapı elemanı üretmek kolaylaşmaktadır. Aynı zamanda taze beton pompalanabilme özelliğı sayesinde ulaşılması güç noktalara bile kolayca taşınabilmektedir. Beton sertleştiginde ise basınç dayanımı bazı doğal taşların basınç dayanımına yaklaşmaktadır. Bu özelliğı sayesinde, beton, yapı elemanlarında basınç dayanımı gerektiren yerlerde güvenle kullanılabilir. Betonun çelik donatılarla olan aderansı da iyi olduğundan, donatılı beton kullanılarak çok farklı tasarımlar ve projeler hayata geçirilebilmektedir. Ayrıca, kullanım yerine göre ve usulüne uygun kaliteli bir şekilde üretilmiş sertleşmiş betonun zararlı çevresel etkilere karşı dayanımı diğer yapı malzemelerine nazaran daha iyi olduğundan, bakım işlemleri de fazla çaba ve masraf gerektirmemektedir [2,4].

Beton, çekme dayanımının düşük olması, zararlı çevresel etkilere maruz kaldığında bir miktar hacim değışikliği göstermesi, kalıcı yükler altında bir miktar deformasyona uğraması ve tamamen geçirimsiz olmaması gibi dezavantajlarına rağmen yine de günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir [1-5]. Bu nedenle, inşaat mühendislerinin, bilim adamlarının, iş adamlarının ve betonla ilgili herkesin beton özelliklerini yeterince tanınması, karşılaşılan problemlerin çeşitlerini ve bunların nasıl ve ne şekilde çözüme kavuşturulacağını çok iyi bilmeleri gerekmektedir [4].

Betona sertleştiginde dayanım veren ürünler beton karışımında bulunan çimento ve suyun hidratasyonu sonucunda oluşmaktadır. Bu nedenle, taze ve sertleşmiş betonun özellikleri, beton karışımında yer alan malzemelerin özellikleri ve karışımında bulunan su/çimento oranıyla doğrudan ilgilidir. Agreganın mineralojik yapısı, yüzey özellikleri ve gradasyonu da beton özelliklerini önemli ölçüde etkiler [1-4]. Beton uygulamalarında, beton içerisinde yer alan malzemelerin karışım oranları bazı kıstaslar tarafından belirlenir. Beton taze

haldeyken kolayca işlenebilmeli, yerine yerleştirilebilmeli ve fazla çaba harcamadan yeterince sıkıştırılabilmelidir. Beton sertleştiğinde ise, tasarım hesaplarında belirtildiği kadar dayanıma sahip ve kullanım yerine göre zararlı çevresel etkilere karşı yeterince dayanıklı olmalıdır [3].

Beton malzemesi, zemin üstü ve zemin altı yapılarda kullanıldığı sürece, yapı ömrünün değişik aşamalarında kalitesinin belirlenmesi gereği hep duyulacaktır. Yılda 40 milyon tona yakın çimento üretimi ile dünyanın sayılı üreticileri arasında yeralan ülkemizde, özellikle konutlarda, beton çok benimsenen ve çok kullanılan bir yapı malzemesidir. Böyle olunca bu malzemenin denetlenme gereği de giderek artmaktadır [6]. Beton kalitesi, kullanılan malzemelerin kalitesine doğrudan bağlı olduğundan özellikle büyük ve önemli inşaat projelerinde beton yapımında kullanılan malzemelerin özellikleri şartnamelerde belirtilen şekilde ve sıklıkta ölçülmekte ve değerlendirilmektedir. Bu malzemeler ile üretilen taze ve sertleşmiş betona da çeşitli testler uygulanarak beton kalitesi tayin edilmektedir. Beton dayanımı, beton kalitesi hakkında genel bir fikir verdiğinden, betonun en önemli özelliğidir. Bu özelliğine ek olarak, beton basınç dayanımının belirlenmesi zor olmadığı gibi, tüm istenen özellikler beton basınç dayanımı ile bir şekilde ilişkilendirilebilir. Dolayısıyla, basınç dayanımı testi, sertleşmiş beton üzerinde uygulanan en önemli ve en genel test olduğundan, beton denetiminde de evrensel bir büyüklük olan basınç dayanımı kullanılmaktadır [1,4]. Beton dayanımı, yapının bir bütün olarak ayakta kalmasında önemli rol oynar. Betonun özellikle kesme dayanımı, taşıma gücü ve beton ile donatı arasındaki aderans kuvveti üzerinde etkilidir. Betonun taşıyabileceği kesme gerilmesi ise beton basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak tanımlanabilir [6]. Bu nedenle, beton kalitesinin yükseltilmesi, beton basınç dayanımının yükseltilmesine endekslenmiş olarak düşünülebilir. Bu, belki, biraz fazla şemalaştırılmış bir durum bile olsa, basınç dayanımı, beton kalitesi üzerinde, oldukça belirleyici ve temsili bir güce sahiptir [7].

Beton kalitesinin denetleme ve değerlendirme amacıyla belirlenmesinde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Genelde, özellikle önemli yapıların inşaatında ve büyük şantiyelerde, beton döküm aşamasında standart küp veya silindirik numune örnekleri alınmaktadır. Bu numuneler aksi belirtilmedikçe 28 gün sonra

test edilmekte ve kalite denetimi sürdürülmektedir [6]. Ancak, karışım oranları ve malzeme özellikleri arasındaki değişimler, betonun karılması, taşınması, kalıplara yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerindeki farklılıklar, yapı elemanlarının standart silindir ve küp numunelere oranla daha büyük olması ve yapıdaki kür koşullarının standart numunelerin kür koşullarından farklı olması gibi etmenler nedeniyle, standart numuneler betonun yerinde dayanımını, tam olarak temsil edemeyebilmektedir [8-10]. Böylece, yapıdaki beton dayanımı tasarımı belirtilen dayanımdan farklılıklar gösterebilir ve yapı içerisinde birbiri ile uyum sağlamayabilir. Bu durumda, standart testlerden farklı olarak uygulanan tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı yöntemlerle de beton kalitesi güvenilir sınırlar içinde kestirilebilmektedir [9-20]. Yapı elemanlarından karot numunelerinin kesilip çıkarılarak, bu numunelere basınç dayanımı testi uygulamak suretiyle kalite denetiminin yapıldığı yöntem tahribatlı testlere bir örnektir ve betonun yerinde dayanımı konusunda gerçekçi sonuçlar vermektedir [9, 11-15]. Sesüstü atım hızı ve beton çekici testleri gibi sıkça kullanılan yöntemler yapı elemanına zarar vermeyen tahribatsız yöntemlerdir [10, 14-21]. Çekip çıkarma, çekip koparma ve batma direnci yöntemleri ise beton dayanımı tahmininde kullanılan yarı-tahribatlı yöntemlerdir. Bu yöntemler, tahribatlı yöntemlere göre, yapı elemanına nispeten daha az hasar vermektedir [10,16,21-24]. Son yıllarda, sahada dökülen betonun basınç dayanımının en güvenilir sınırlar içerisinde tahmin edilmesi konusu giderek daha çok önemli olmaya başlamıştır. Çünkü, standart basınç dayanımı testleri betonun sahadaki gerçek yapıdaki dayanımını değil, potansiyel dayanımını göstermektedir [1,6]. Öte yandan, yapıya gelen ve dökülen betondan numune alınması işlemi bazı suistimalleri ve kötüye kullanılabilecek durumları da beraberinde getirmektedir. Örneğin, numune almadan önce karışıma su eklenmediği halde, numune alındıktan sonra su eklenebilmektedir. Daha da ötesi, yüklenici taraf, betonda istenen özellikleri sağlayan bir karışımı hazırlayıp, numunelerin içine bu karışımı dökülebilmektedir [25].

İnşaat sahasında betona uygulanan tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı testler sadece yapıdaki beton dayanımını tahmin etmek için değil, aynı zamanda karışımda kullanılan malzeme özelliklerini belirlemek, betona uygulanan sıkıştırma ve kür işlemlerinin yeterli olup olmadığını anlamak ve çeşitli zararlı

çevresel etkilere maruz kalmış betonların dayanıklılığı (durabilite) hakkında bir fikir sahibi olmak için de yapılmaktadır. Bu testler ayrıca, yapıda kullanılan betonun bütünlüğü, beton içerisinde oluşabilecek çatlakların durumu, betondaki agreganın ayrışmaya uğrayıp uğramadığı ve betonun yoğunluğu konusunda da önemli ipuçları verir [11,14,15,18,25-29].

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmanın amacı, sertleşmiş beton üzerinde uygulanan standart deneyler, karot dayanımı, beton çekici, sesüstü atım hızı, çekip-çıkarma ve beton olgunluk deneylerinden elde edilecek sonuçlar arasında bir bağıntı kurmak ve beton dayanımını bahsedilen standart, tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı yöntemler yardımıyla en güvenilir sınırlar içerisinde belirleyebilmek için farklı beton karışımlarına mahsus birer model oluşturmaktır. Böylece, gerçek yapıda beton dayanımını en doğru şekilde kestirebilmek mümkün olabilecektir.

Deprem etkileri sonucunda beklenmeyen hasarların sebepleri arasında önceliğin sahadaki beton malzemenin kalitesine ait olduğu kanaati gelişmiştir. Çünkü, teorik hesaplamalarla laboratuvar sonuçlarına göre yapılan çok katlı yapı tasarımları, yukarıda bahsedilen dezavantajlardan dolayı yapı güvenliğinin ortadan kalkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada, malzeme nitelikleri ve deney sonuçları arasında da bir bağıntı kurulduğundan, karot testleri, beton çekici testleri, sesüstü atım hızı testleri, çekip çıkarma testleri ve olgunluk testleri, yerinde beton dayanımının kestirilmesinde büyük önem taşıyacaktır. Karot dayanım testleri, tahribatlı testler sınıfındandır. Karot çapının büyüklüğü ise yapı elemanının zarar görmemesi açısından önemlidir. Bu çalışmada ayrıca, karot çapının deney sonuçlarına olan etkisi geniş bir yelpazede incelendiğinden, küçük çaplı karot numunelerinin de güvenilirlik sınırları araştırılmıştır. Yapı elemanı üzerinde verilen kararlarda numune sayısının da önemi çok büyük olduğundan bu çalışmada ortalaması alınan numune sayısı en az altı olarak tutulmuştur. Böylece, karot yöntemi önceden planlanması gereken yöntemlerden biri olmadığı için, bu yöntemin daha önceden inşa edilmiş yapıların beton dayanımlarının belirlenmesinde de en güvenilir sınırlar içerisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Aynı zamanda, karot numunelerinin boy/çap oranı da geniş bir yelpaze içerisinde değiştirildiğinden, numune boyut analizi de yapılmış ve böylece, numune boyutunun deney sonuçlarına olan etkisi de net bir şekilde incelenmiştir.

Bunlara ek olarak, özellikle bazı karmaşık ve önemli altyapı projelerinin şantiyelerinde, inşaatın diğer kısımlarının güvenli bir şekilde devamı açısından, beton dayanımının gelişiminin izlenmesi gereklidir. Bu çalışmada, yapıya hasar vermeyen yöntemlerden olan beton çekici, sesüstü atım hızı ve beton olgunluk yöntemleriyle yapıya ve yapısal davranışa nispeten daha az ve tamiri mümkün hasarlar veren çekip çıkarma yönteminin yerinde beton dayanımı gelişiminin izlenmesinde güvenli sınırlar içerisinde kullanılabilirliği de araştırılmıştır.

Beton dayanımı, bu bahsedilen yöntemler yardımıyla belirli sınırlar içerisinde tahmin edilebilir. Ancak bilindiği üzere, standart dayanım testi sonuçları da birçok etmene bağlıdır. Bu nedenle, diğer yöntemler ile standart yöntemler arasındaki bağıntı da betonun karışım oranlarına, kalitesine, kullanılan malzemelerin özelliklerine, örneğin agreganın çeşidine ve maksimum tane boyutu (çapı) ve betonun yaşına göre değişecektir. Böylece, her bir farklı beton karışımı için, farklı bağıntıların kurulması gerekecektir. Bu çalışmada araştırma geniş bir yelpazede yapılmış ve daha önce de belirtildiği gibi beton karışımları için farklı deneyler aynı yaşlarda uygulanarak deney sonuçlarının arasındaki bağıntılar incelenmiştir. Bu bağıntılar, aynı zamanda, standart yöntemlerle belirlenen dayanımları yetersiz olan ve şüphelenilen beton yapı elemanlarının üzerinde daha sağlıklı kararlar vermek için de kullanılabilecektir. Çünkü bazen, inşaat esnasında alınan numuneler üzerinde uygulanan standart dayanım testleri iyi sonuçlar, daha doğrusu, yeterli sonuçlar vermeyebilir. Bu durumda, olay biraz karmaşıktır ve yapı elemanının test edilmesi gerekir. Ancak yapının o andaki yaşı farklıdır ve artık standart dayanım testi için kullanılacak bir beton numunesi de elimizde yoktur. Bu durumda, yapının test edilmesi ancak belirtilen tahribatlı, tahribatsız veya yarı-tahribatlı yöntemlerle mümkün olacaktır. Bu çalışma böylece, daha önceden inşa edilmiş yapılarda kullanılan beton malzemenin dayanımlarının belirlenmesi ve halen inşaatı sürmekte olan yapılarda kullanılan betonların dayanım gelişimlerinin izlenmesi açısından da önem taşımaktadır.

Ülkemizde standart testler, karot testleri ve beton çekici testleri ile ilgili standartlar bulunmakta ve kullanılmaktadır. Ancak sesüstü atım hızı, çekip-çıkarma ve beton olgunluk testlerine ait standartlar henüz oluşturulmamıştır. Bu çalışma bahsedilen tahribatsız ve yarı-tahribatlı deneylerin standartlarının oluşturulması konusunda da yararlı olacaktır.

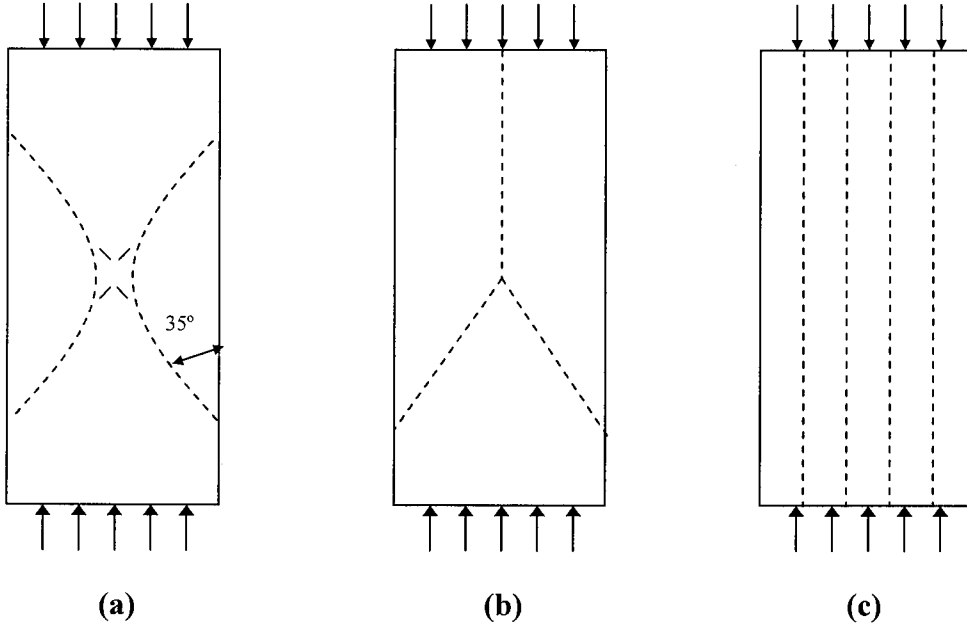
2. BETONUN BASINÇ DAYANIMI

Mühendislik uygulamalarında, tüm yapıların esas fonksiyonu, üzerlerine uygulanan yüklere ve kuvvetlere karşı dayanım göstermeleridir [3]. Bu nedenle, beton basınç dayanımı yapı tasarım hesaplarının değişmez bir ögesi olup, projelerde hangi beton sınıfı veya sınıflarının kullanılacağı belirtilir [1,4]. Birçok pratik durum için, betonun durabilite ve geçirimsizlik gibi özellikleri her ne kadar önemli olsa da, beton dayanımı betonun diğer özellikleri açısından da önemli bir gösterge olduğundan, beton malzemesinin değerlendirilmesinde, genellikle basınç dayanımı öne çıkmaktadır [1,3]. Bir başka deyişle, dayanımı yüksek olan betonlar genellikle daha tok, daha az geçirgen ve çevresel etkilere karşı da daha dirençli olmaktadır [3]. Ayrıca, beton basınç dayanımının belirlenmesi, betonun çekme ve eğilme dayanımları hakkında bir fikir vermekte ve beton basınç dayanımının bilinmesiyle, betonun su geçirimsizliği ve zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı gibi diğer özellikleri konusunda da nitel (kalitatif) bir bilgi elde edilebilmektedir [4]. Böylece, dayanım testlerinin nispeten daha kolay uygulanabiliyor olması nedeniyle beton dayanımı, beton kalitesi denetiminde, beton karışımında kullanılan malzemelerin karışım oranlarının ve üretim ekipmanının yeterliğinin belirlenmesinde ve betona uygulanan kür koşulları etkilerinin değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir kıstastır [3].

2.1. Basınç Dayanımının Doğası

Betonun basınç dayanımı, eksenel basınç kuvvetine maruz kalan betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanır [4]. Şekil 2.1, eksenel basınç yükleri altında, kabaca betonun kırılma modellerini göstermektedir. Malzemelerde kırılma, uygulanan çekme, kesme veya basınç gerilmeleri nedeniyle gerçekleşebilir. Ancak, beton kırılğan bir malzeme olduğundan, çekme ve kesme gerilmelerine karşı, basınç gerilmelerine oranla daha zayıftır ve bu nedenle basınç yükleri altındaki beton numunelerdeki kırılmalar esasen eğik yüzeylerde gerçekleşen kesme kırılmalarıdır (Şekil 2.1a) [3].

Beton dayanımı yüksek olduğunda ve deney plakaları ile numune yüzeyleri arasındaki deformasyonlar göreceli olarak engellenmediğinde, numune kolon halinde parçalara ayrılabilir (Şekil 2.1c). Ancak sıklıkla kırılma, kesme kırılması ve kolon halinde kırılmanın birleşmiş etkisi ile meydana gelmektedir (Şekil 2.1b) [3].



Şekil 2.1. Kırılma modelleri [3]

Boşlukların beton dayanımı üzerindeki etkisi büyüktür ve bu faktörü betonun gerçek kırılma mekanizması ile ilişkilendirmek mümkündür. Bu amaçla, beton her ne kadar küçük bir miktar plastik davranış gösterse de kırılma bir malzeme olarak düşünülür. Betonun kırılma dayanımını sayısal olarak ifade etmek kolay değildir. Çünkü beton davranışı pratikte kırılma ve sünek davranış arasında bulunur [1].

Donatılı betonda, beton ile donatı arasındaki aderans betonun çekme dayanımına bağlıdır. Basınç dayanımı düşük olan betonlarda, kesme kuvveti etkisinden dolayı, küçük yüklemelerde bile çatılma ve dökülme oluşur. Donatının betondan akma sınırına ulaşmadan sıyrılması ise, taşıma işleminin ve beton-donatı bütünlüğünün tamamen yitirilmesine yol açar [6].

2.1.1. Çekmede dayanım

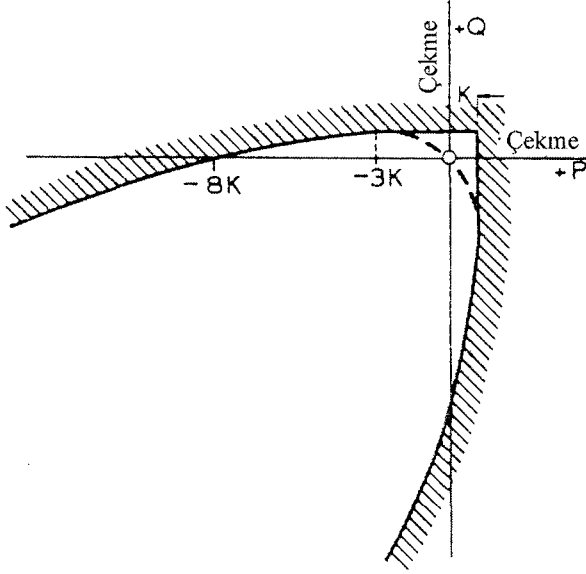
Sertleşmiş betonun veya taş gibi benzer bir kırılğan malzemenin gerçek dayanımı teorik olarak hesaplanan dayanımından oldukça düşüktür. Moleküler çekim bazında, son derece homojen ve kusursuz bir katının, yüzey enerjisi hesaplanarak elde edilen teorik dayanımının 10.5 GPa olduğu tahmin edilmektedir. Bu fark Griffith tarafından ön gerçek olarak kabul edilen kusurların etkisi ile açıklanabilir. Bu kusurlar yük altındaki malzemede yüksek gerilme konsantrasyonları yaratmakta ve malzemede küçük bir hacimde yüksek bir gerilme oluşmaktadır. Bu kusurların boyutları değişmekte ve büyük olanların birkaçı ise kırılmaya yol açmaktadır. Böylece, numunenin dayanımı, numune boyutları ve istatistiksel olasılık ile yakından ilgilidir [1].

Sertleşmiş çimento hamuru gözenekler, mikro çatlaklar ve boşluklar gibi süreksizlikler içermektedir. Ancak, tam doğru kırılma mekanizması betonun hala bir bilinmezidir. Bu mekanizma büyük olasılıkla, sertleşmiş çimento hamurunun kendi içindeki bağlarla ve çimento hamuru ile agrega arasındaki bağların davranışıyla ilgilidir [1].

Griffith'in hipotezinde, kusurun bulunduğu bölgede mikroskopik bir kırılmanın olduğu öngörülür ve numunenin genellikle en zayıf kusuru içeren hacminin, tüm numunenin dayanımını belirlediği farz edilir. Oysa ki kısmi kırılma, bir noktada başlar ve bu noktadaki koşullar tarafından yönlendirilir. Bu nedenle, en yüksek gerilmenin olduğu noktadaki gerilme seviyesini belirlemek, kırılmayı tahmin etmek için yeterli değildir. Bu noktanın etrafındaki gerilme dağılımını da bilmek gerekir. Bu olay, eğilme dayanımı numunelerinde, kırılmanın başlangıcındaki en yüksek lif gerilmesinin, doğrudan çekme yükü uygulanmış numunenin dayanımından neden yüksek olduğunu açıklamaktadır. İkinci durumda, yani doğrudan çekme yüküne tabi tutulan numunede, kırılmanın ilerlemesi kırılmanın başladığı yerler tarafından bloke edilmemektedir [1].

2.1.2. Basınçta çatlama ve kırılma

Griffith hipotezi, çekme kuvvetleri etkisi altında meydana gelen bir kırılma mekanizmasına uygulanmaktadır. Ancak bu teori, iki ve üç eksenli gerilmeler altında ve tek eksenli basınç yükü etkisinde meydana gelecek kırılmaların belirlenebilmesi için geliştirilebilir. İki temel gerilme basınç gerilmesi olsa bile, çatlak ve kusurun ucu boyunca uzanan gerilme bazı noktalarda çekme gerilmesidir ve kırılmaya yol açabilir. Kırılma kriteri, Şekil 2.2’de grafiksel olarak gösterilmektedir. Burada, K , doğrudan çekme yükü altında çekme dayanımıdır. Kırılma, P ve Q gerilmelerinin birleşik etkisi altında meydana gelir [1].

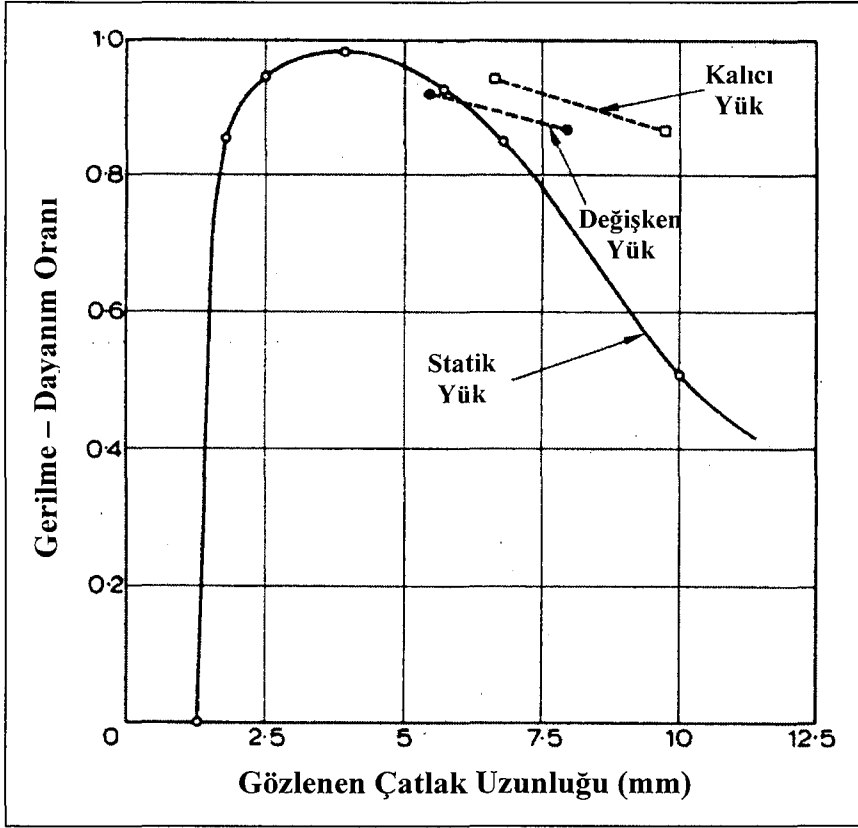


Şekil 2.2. Orowan'ın iki eksenli yükler altında kırılma kriteri [1]

Şekilden görüleceği üzere, kırılma eksenel basınç yükü altında gerçekleşebilir ve bu durum betonun basınç dayanımı testinde de gözlenebilir. Burada nominal basınç dayanımı $8K$ 'dır. Bu da basınç dayanımının, doğrudan çekme yoluyla bulunan çekme dayanımından 8 kat fazla olduğunu göstermektedir [1].

2.1.3. Mikroçatlaklar

Betonun kırılması çatlakların oluşması sonucunda meydana geldiğinden, bu konunun detayları ayrıntılarıyla ele alınmalıdır. Yapılan araştırmalara göre, beton yüklenmemiş olsa bile çimento hamuru ile iri (kaba) agrega taneleri arasında çok ince çatlaklar vardır. Bu çatlaklar muhtemelen çimento hamuru ile iri agreganın mekanik özellikleri arasındaki kaçınılmaz farkların, büzülme ve ısı hareketlerinin etkileriyle birleşmesinden dolayıdır. Mikroçatlaklar boyutları itibarıyla, evrensel olarak henüz tanımlanmamış olsalar da, üst limitleri 0.1 mm olarak öngörülen çatlaklardır. Bu, çıplak gözle teşhis edilebilen en küçük boyutlu çatlaktır. Mühendislik uygulamaları için, optik mikroskopla görülen en küçük çatlak, alt limit olarak alınabilir. Artan bir yükleme başladığında, nihai yükün %30'una kadar çatlaklar durağandır ve yük artırıldığında, mikroçatlakların sayısı, uzunlukları ve genişlikleri de artar. Bu, yavaş çatlak ilerlemesi durumu olarak nitelendirilebilir. Yük, nihai dayanımın %70-90'larına kadar artırılırsa, çatlaklar, çimento hamuru ve ince agregadan oluşan harç içerisinde açılır ve daha önce bahsedilen bağ çatlakları ile bir köprü oluşturur. Böylece, sürekli bir çatlak şekli oluşur. Bu ise, hızlı çatlak ilerlemesi durumudur. Şekil 2.3 uygulanan gerilme ile çatlak boyu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Nihai dayanımın %85'ine kadar yapılan yüklemede, yüklemenin başlangıcı ile bu yük arasında, toplam çatlak boyunda çok küçük bir artmanın olduğu gözlenmektedir. Bu noktadan sonra, gerilmenin biraz daha artırılması toplam çatlak uzunluğunda büyük bir artışa neden olmaktadır. Gerilme-dayanım oranının %95 seviyesinde olduğu durumlarda, sadece arayüzey çatlakları gözlenmemiş, bunlara ek olarak harç çatlakları da oluşmaya başlamıştır. Bir çok çatlağın ilerleme eğilimi uygulanan yüke kabaca paraleldir [1].



Şekil 2.3. Gözlenen çatlak uzunluğu ile gerilme/dayanım oranı arasındaki ilişki [1]

Tüm bu anlatımlardan da anlaşılacağı gibi, mikroçatlaklar betonun genel bir özelliğidir. Çatlakların durağan (kararlı) olması durumunda zararları yoktur. Mantığa aykırı gelen bir şekilde, erken mikroçatlakların yeri, çimento hamuru ve iri agrega arasındaki arayüzey olmasına rağmen, iri agreganın bulunması müstakil bir geniş çatlağın ilerlemesine engel teşkil eder. Bu nedenle, betonun heterojenliği burada faydalı görünmektedir. Agrega-çimento hamuru arayüzeyi, uygulanan yüke mümkün olan tüm açılarda ve doğrultularda oluşabilir. Böylece, yerel gerilmeler esasen, uygulanan nominal gerilmenin aşağısında ve yukarısında olmak üzere değişkenlik gösterebilir [1].

2.1.4. Agrega-çimento hamuru arayüzeyi

Mikroçatlakların, çimento hamuru-iri agrega arayüzeyinden ve onu hemen çevreleyen harç üzerinde oluşmaya başladığı gözleminden yola çıkarak, çimento hamuru-agrega arayüzeyinin kırılmada da önemli bir rolü olduğunu söyleyebiliriz

[1]. Arayüzey bölgesinin dayanımı arayüzeydeki mikroçatlak oluşumunu belirler [30]. Dolayısıyla, beton basınç dayanımı, harcın kalitesi ile agreganın yüzey karakteristiklerine doğrudan bağlıdır [31,32]. Bu nedenle, arayüzey bölgesinin özelliklerini anlamak ve davranışını belirlemek kırılmayı betimlemek için elzemdir. Arayüzey bölgesine bazen geçiş bölgesi dendiği de olur [1].

Şundan hemen bahsetmek gerekir ki; agreganın hemen civarındaki sertleşmiş çimento hamurunun mikroyapısı ile tüm çimento hamuru kütesinin mikroyapısı aynı değildir. Bunun en önemli nedeni, karıştırma sırasında, kuru çimento taneleri, nispeten daha büyük olan iri agrega tanelerinin yanında, tamamen sıkı bir bağ yapmaya uygun ortam bulamamaktadır. Bu durum, her ne kadar daha küçük ölçekli olsa da, beton dökümünde de bahsedilecek olan duvar etkisinin bir benzeridir. Böylece daha az çimento reaksiyon yapmakta ve orijinal boşlukları doldurmaktadır [1]. Bunun sonunda ise, arayüzey bölgesindeki gözenek miktarı, agregadan daha uzakta bulunan sertleşmiş çimento hamurundaki gözenek miktarından daha fazla olmaktadır [1, 30].

Arayüzey bölgesi betonda zayıf bir bölge olarak bilinir [33,34]. Arayüzey bölgesinin mikro yapısı şöyledir; agreganın yüzeyi 0.5 μm kalınlığında kristal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile örtülüdür. Bunun arkasında, hemen hemen aynı kalınlıkta C-S-H (kalsiyum-silikat-hidrat) tabakası yeralır. Agregaya yüzeyinden biraz daha ileride 50 μm kalınlığında ana arayüzey tabakası bulunur. Bu tabaka, çimento hidratasyonu ile oluşan ürünler ile daha büyük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerini içerir. Ancak, bu tabakada, reaksiyona girmemiş çimento partiküllerine rastlanmaz. Bu dağılımın iki büyük önemi vardır. Birincisi, çimentonun tamamlanmamış reaksiyonu, arayüzeyde su/çimento oranının başka yerlere oranla daha yüksek olduğunu gösterir. İkincisi, büyük $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin varlığı, arayüzeydeki gözenekliliğin diğer yerlere nazaran daha yüksek olduğunu doğrular [1, 34].

Arayüzey bölgesi her ne kadar iri agrega parçacıklarının yüzeyini ilgilendirse de, bu bölge, ince agrega taneleri üzerinde de oluşmaktadır. İnce agreganın mineralojik özellikleri geçiş bölgesinin mikro yapısını etkilemektedir. Örneğin, kireç taşı kullanıldığı durumda, agrega ile çimento arasında kimyasal bir reaksiyon meydana gelmekte ve böylece yoğun bir arayüzey bölgesi oluşmaktadır [1].

Arayüzey etkisinin betonda belirlenmesi ise zordur. Bu nedenle, genellikle, tekil bir kaya parçası ile çimento hamuru arasındaki arayüzey özelliklerinin belirlenmesi yoluna gidilmektedir. Ancak, bu testlerin sonuçları yanlış yorumlamalara neden olabilir. Çünkü uygulanan testler, betonda olduğu üzere, diğer iri agregalar parçalarının etkileşimini gözardı etmektedir. Bunun yanı sıra, tekil bir parçanın çimento hamuru ile kaplanması, karıştırma işlemine maruz kalmayacak bir şekilde yapıldığında, kesme etkisinin, betonun pürüz alma süresinde mikro yapıyı değiştirebileceği de ihmal edilmektedir. Dahası, betonda terleme (su salma) denilen bir olay gerçekleşmekte ve sonrasında, yukarıya doğru çıkmaya eğilimli olan su zerrecikleri iri agregaların altında birikmektedir. Çimento hamuru ile agregalar arasındaki arayüzeyi bölgesinin, bu iki malzemenin elastiklik modülleri ve Poisson oranları arasındaki farklardan dolayı, gerilme konsantrasyonlarının kaynaklandığı bölge olduğu bilinmektedir [1,35].

Arayüzey tabakasının dayanımı, agregalar özellikleriyle de yakından ilgilidir. Agreganın yüzey pürüzlülüğü arttığında, arayüzey bölgesinin kesme kuvvetlerine karşı bağ dayanımı da artmaktadır [30,31]. Tersine agregalar yüzeyinin pürüzsüz olması da arayüzey-agregalar bağ dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak, agreganın pürüzsüz yüzeyinin bu negatif etkisi düşük su/çimento oranlarıyla üretilen betonlarda daha da önemlidir [31]. Ancak, belirli bir çimento hamuru için görünen arayüzey bağ dayanımı agregalar yüzey pürüzlülüğünün basit bir fonksiyonu olmayıp aynı zamanda agreganın ana yapısına da bağlıdır [33]. Agregalar çeşidinin etkisi daha az olmakla birlikte, agreganın boyutu, şekli, yüzey özellikleri ve mineralojik yapısı da çimento hamuru-agregalar arayüzey özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Arayüzey bağının dayanımı, betonun çekme dayanımı üzerinde, basınç dayanımı üzerinde olduğundan daha etkilidir [31].

2.2. Beton Yaşının Dayanım Üzerindeki Etkisi

Beton pratiğinde, beton dayanımı geleneksel olarak 28 günlük dayanım değeri ile karakterize edilir ve betonun bazı diğer özellikleri 28 günlük beton dayanımına atfedilir. Beton test yaşı olarak 28 günlük bir zamanın seçiminde özel bir neden yoktur. Ancak, 28 gün bir haftanın dört katıdır ve beton karıştırılıp

döküldükten dört hafta sonra test edilmektedir. Dolayısıyla, dört hafta sonra yine aynı çalışma gününde beton kırılmakta ve test edilmektedir. Böylece, 28 günlük bir yaş, beton üretimi ile testinin haftanın değişik günlerine denk düşmemesi açısından önemlidir. Anılan 28 günden daha kısa zaman dilimlerinde beton dayanımlarının belirlenmesi ile basınç dayanımlarının karakterize edilmesi tartışılan bir konudur. Ancak, 28 günlük beton yaşı, günümüzde değişmez bir pozisyon kazanmıştır. Böylece, şartnamelerle uygunluk genellikle 28 günlük beton dayanım değerlerine dayandırılmıştır [1].

Bazı nedenlerle daha erken belirlenen (örneğin 7 günlük) dayanımlarla, 28 günlük beton dayanımlarının tahmin edilmesi sözkonusu olduğunda, bu beton karışımı için, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasındaki ilişki deneysel olarak oluşturulmalıdır [1]. Belirli bir beton karışımı için, dayanım-zaman ilişkisinin belirlenmesi, beton kalıbı söküm işlemlerinin daha verimli yapılabilmesi, öngermeli beton sistemlerinde gergilerin serbest bırakılma zamanlarının tehlikesiz ve iyi bir şekilde ayarlanabilmesi ve ardgermeli sistemlerde çelik tellerin gerilme işlemlerinin güvenli ve uygun bir şekilde başlatılabilmesi için oldukça önemlidir [36].

2.3. Basınç Dayanımının Belirlenmesi

Yapıların tasarımında, hesaplar betonun belirli bir dayanım değerine ulaşacağı varsayımına dayanarak yapılmakta ve bu değer standard yöntemin uygulanması ile bulunan basınç dayanımı olduğu kabul edilmektedir. Beton dayanımlarının belirlenmesinde, standartlarda ve şartnamelerde yeralan yöntemler kullanılmaktadır. Yapıda kullanılacak betonun basınç dayanımının, tasarım hesaplarında kullanılmış olan dayanım değerinden daha az olmaması gerekir. Bunu sağlayabilmek ve istenilen dayanımda beton üretebilmek için karışım hesapları yapılarak, betonu oluşturan malzemelerin hangi oranlarda karıştırılmaları gerektiği belirlenir. Ancak bazen, üretilen betonun kalitesi amaçlanan kaliteden farklılıklar göstermektedir. Kullanılan malzemelerin cinsindeki değişiklikler, betonun karılma süresinin az veya çok olması, üretimden sonra ve beton kıvamında meydana gelen azalmalar bu farkların ortaya çıkmasına

neden olmaktadır. Bu bakımdan, yapıda kullanılacak beton mutlaka kontrol edilmelidir. Betonun kabul veya reddedilmesi için bilinmesi gerekli olan beton basınç dayanımı da, sahada alınan beton numunelerine uygulanan testlerle belirlenmektedir [4].

3. BETON BASINÇ DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

3.1. Karışım Oranlarının Etkisi

Beton agregası, çimento ve su ile yapılan kompozit bir malzeme olduğundan, beton içeriğinde yer alan her bir malzemenin özelliği ile beraber bu malzemelerin karışım oranları da taze ve sertleşmiş beton özellikleri açısından çok önemlidir. Betonda kullanılan su/çimento oranı, dolayısıyla çimento hamurundaki jel/boşluk oranı ve agregası/çimento oranı beton dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir.

3.1.1. Su/çimento oranının etkisi

Mühendislik uygulamalarında, uygun sıcaklıklarda ve suda kür edilmiş olan betonun herhangi bir yaştaki dayanımını etkileyen iki ana faktörün, su/çimento oranı ve betonun dökümünden sonra sıkıştırılma derecesi olduğu kabul görmektedir. Betonun çok iyi sıkıştırıldığı bir durumda dayanımı, karışımındaki su/çimento oranı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Duff Abrams tarafından 1919 yılında sunulan su/çimento oranı ile beton dayanımı arasındaki ilişki, su/çimento kanunu olarak kabul edilmekte ve aşağıdaki eşitlikle açıklanmaktadır [1,4];

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{s/\phi}} \quad (3.1)$$

Burada,

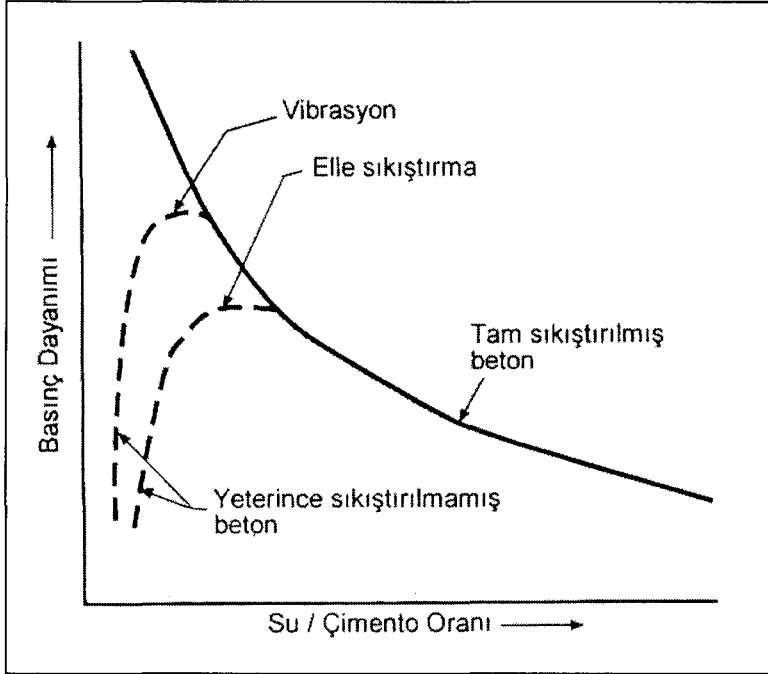
f_c : beton dayanımı,

s/ϕ : su/çimento oranı,

K_1, K_2 : ampirik katsayılarıdır.

Dayanım ile su/çimento oranı arasındaki ilişkiyi gösteren eğrinin genel formu ise Şekil 3.1’de gösterilmiştir [1,4]. Su/çimento oranı yükseldikçe beton içerisinde oluşan gözenekler artacağından dayanımı da daha düşük olacaktır.

Genelde, su/çimento oranı azaldığında, beton dayanımında artma gözlenmektedir. Ancak, çok düşük su/çimento oranlarında, betonun sıkıştırılabilmesi çok zor olmakta ve beton içerisinde istenilmediği halde boşluklar kalmaktadır. Bu da beton dayanımının düşmesine neden olur [4].



Şekil 3.1. Su/çimento oranı ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki [1,4]

Abrams kanununun bağımsız olarak oluşturulmasıyla birlikte, bu kanun Rene Feret tarafından 1896 yılında açıklanan genel bir kurala benzerdir. Rene Feret tarafından bulunan kanun, beton dayanımı ile karışımda bulunan su ve çimentonun hacimleri arasındaki ilişkiye dayanmakta olup aşağıda belirtilen formdadır [1];

$$f_c = K \left(\frac{\xi}{\xi + s + h} \right)^2 \quad (3.2)$$

Burada, f_c beton dayanımı, ξ , s , ve h sırasıyla çimento, su ve havanın mutlak hacimsel oranlarıdır. K ise bir sabittir [1].

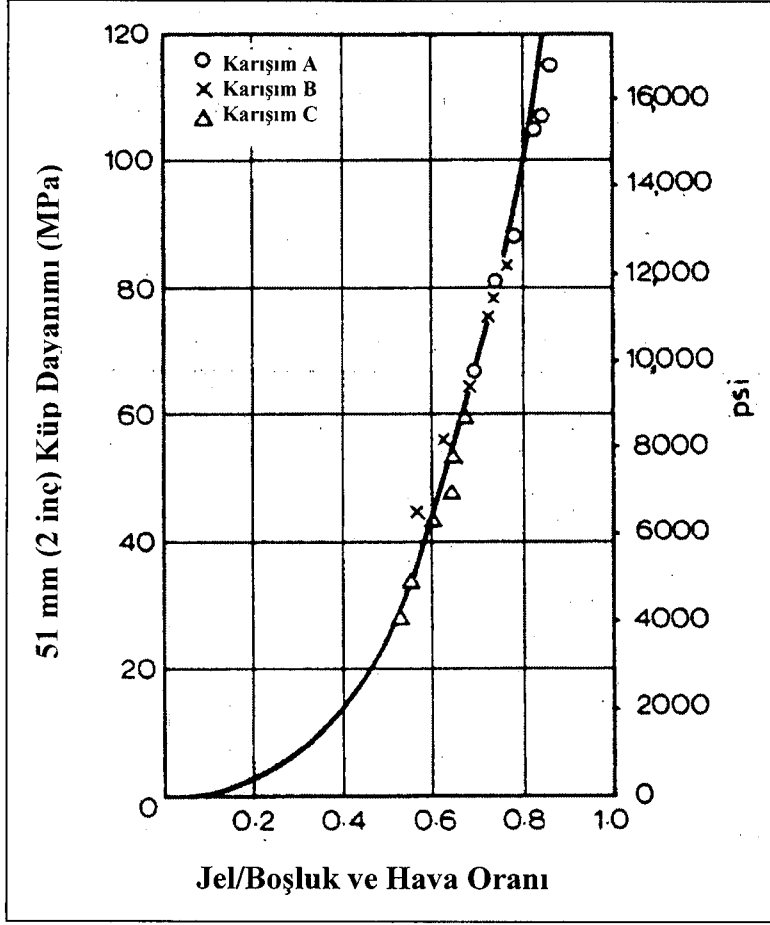
Yukarıda da bahsedildiği gibi, su/çimento oranı, hidrasyonun herhangi bir kademesinde, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki gözenek miktarını belirlemektedir. Böylece karışımdaki su/çimento oranı ve betonun sıkıştırılma derecesi, sertleşmiş beton içerisindeki oluşabilecek boşlukların hacmini etkilemektedir. Bu da Feret'in neden beton içerisindeki havanın hacmini hesaba kattığını açıklamaktadır [1].

3.1.2. Çimento hamurundaki jel/boşluk oranının etkisi

Çimento hamurunun dayanımında hidrasyon ürünlerinin hepsinin az çok katkısı olmasına rağmen, dayanımdaki en büyük pay C-S-H jellerine aittir. Hatta çimento hamuru dayanımının C-S-H jellerinin oluşmasıyla meydana geldiği söylenebilmektedir. Çimento hamurundaki jel hacminin, jel oluşumu için mümkün olan boşluk hacmine oranı, jel/boşluk oranı olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki gibi gösterilebilmektedir [4];

$$\text{Jel / Boşluk oranı} = \text{Jel hacmi} / (\text{Jel hacmi} + \text{Kapiler boşluk hacmi}) \quad (3.3)$$

Harcın basınç dayanımı ile jel/boşluk oranı arasındaki gerçek ilişki, Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Burada, dayanım jel/boşluk oranının küpü ile doğru orantılıdır. Elde edilen sayısal değerler farklı Portland çimentosu tipleri için küçük farklılıklar gösterebilir. Ancak, kimyasal bileşiminde C_3A ($3CaO \cdot Al_2O_3$ -trikalsiyum alüminat) miktarı yüksek olan çimentoların, aynı jel/boşluk oranlarında, daha düşük basınç dayanımına sahip oldukları bilinmektedir [1].

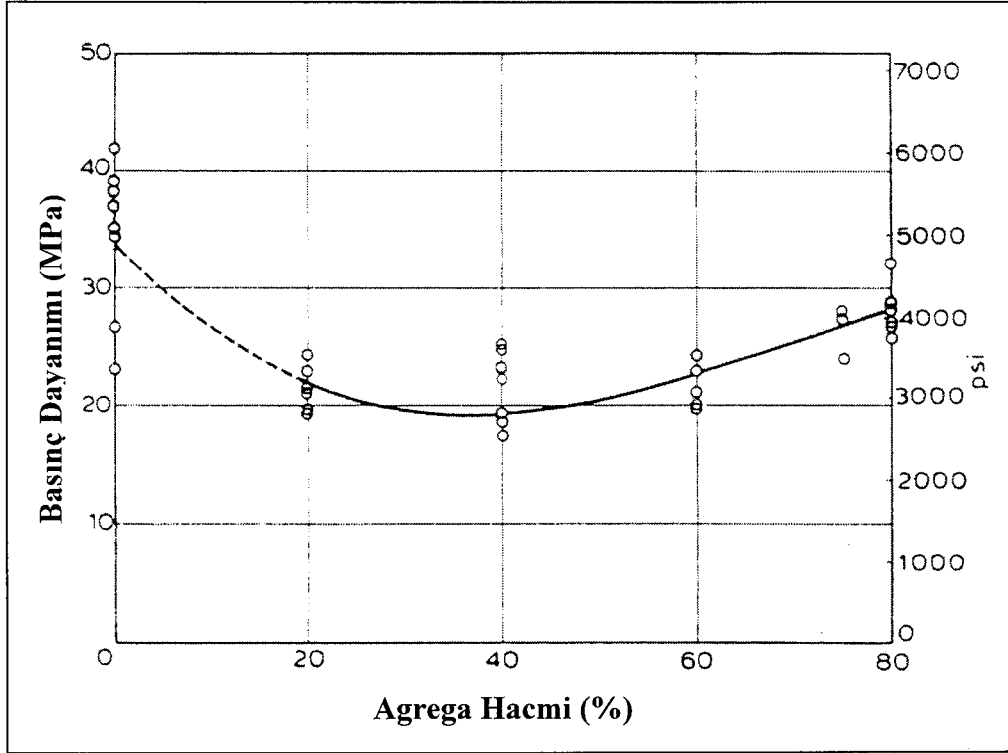


Şekil 3.2. Çimento harcının Jel/Boşluk oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki [1]

3.1.3. Agrega/çimento oranının dayanıma etkisi

Agrega/çimento oranı beton dayanımını etkileyen ikincil bir unsurdur. Ancak sabit su/çimento oranlarında, çimento dozajı düşük karışımların daha yüksek dayanım gösterdikleri gözlenmiştir. Bunun nedeni açık olmamakla birlikte, bazı durumlarda, karışım suyunun bir kısmı agregâ tarafından emilmekte ve agregâ miktarı fazlalaştığında ise emilen su miktarı da fazla olmakta ve bu da etkili su/çimento oranının azalmasına yol açmaktadır. Sonuçta beton dayanımını artırmaktadır. Diğer bir neden ise, yüksek agregâ içeriğinin betonda meydana gelebilecek büzülme ve terlemenin (su salma) daha az olmasına yolaçması ve böylelikle agregâ ile çimento hamurunun arasındaki bağın daha az hasar görmesini sağlamasıdır. Böylelikle, çimentonun hidratasyonu sonucu meydana gelen ısı değişikliklerin etkisi de azalmaktadır. Bu da beton dayanımını

artırmaktadır. Beton karışımındaki agrega içeriğinin dayanım üzerindeki etkisi Şekil 3.3’de gösterilmiştir [1]. Agreganın hacminin toplam beton hacmine oranı sıfırdan %20’ye kadar arttığında, beton basınç dayanımında keskin bir azalma olmakta ancak, bu oran %40 ila %80 arasındayken, beton basınç dayanımında bir artma gözlenmektedir. Bu sonuçların nedenleri çok açık olmasa da değişik su/çimento oranlarında da aynı etki gözlenmiştir [1].



Şekil 3.3. Agreganın hacmi ile silindirik beton numunelerin (100 mm çapında ve 200 mm boyunda) basınç dayanımı arasındaki ilişki [1]

Felix E. Amparano ve ark. tarafından gerçekleştirilen çalışmada agrega içeriğinin betonun kırılma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Agreganın hacim oranının %45’den %75’e çıkmasıyla beton basınç dayanımında %15’e varan küçük düşmeler gözlenmiştir. Ancak, bu, pratikte sabit olarak alınabilir. Doğal olarak agrega oranı arttığında beton dayanımı da artmaktadır. Ancak bu durumda agrega-çimento hamuru arayüzeyi de arttığından ve bu bölge betonda zayıf bir bölge olduğundan beton basınç dayanımı da düşebilmektedir. Böylelikle basınç dayanımı dengelenmektedir [37].

3.2. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

Beton üretiminde başlıca iki hedeften sözedilmektedir. Bunlar, betonun istenilen kalite ve özelliklerde olmasıyla birlikte, istenilen kalitedeki betonun ekonomik tarzda üretilmiş olmasıdır. Betonun kalitesinden vazgeçmek mümkün değildir. Öte yandan, istenilen dayanım ve performansa sahip betonun ekonomik olarak üretilmesi de en az kalite kadar önemlidir [4]. Beton kompozit bir malzemedir ve agrega, çimento, su ve bazen katkı maddelerinin birlikte karılmasıyla üretilmektedir. Böyle olunca, betonu oluşturan malzemelerin özellikleri de taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini önemli ölçüde etkiler.

3.2.1. Çimento özelliklerinin beton dayanımına etkisi

Çimentoların kimyasal kompozisyonu ve çimento tanelerinin inceliği çimento tipini de belirleyen unsurlardır. Bu özellikler, hidratasyon olarak da bilinen, su ile çimento arasındaki reaksiyonun hızını etkilemektedir. Dolayısıyla, çimento hamurunun dayanım kazanma hızı ve ne ölçüde dayanım kazandığı da çimentoların bahsedilen özellikleri ile yakından ilgilidir [4,38].

3.2.2. Agrega özelliklerinin beton dayanımına etkisi

Agrega, beton hacminin kabaca dörtte üçünü oluşturduğundan, agrega özellikleri de taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli bir şekilde etkilemektedir. Agreganın maksimum tane boyutu, tane şekli, yüzey özellikleri, dayanımı ve agrega üzerinde bulunabilecek zararlı malzemeler beton dayanımını önemli ölçüde etkileyen unsurlardır [4,39]. Dolayısıyla agrega çeşidi de beton dayanımını etkilemektedir. Basınç dayanımı 30 MPa civarında olan betonlar için bu etki az olmasına karşın, yüksek dayanımlı betonlarda agreganın çeşidi önem kazanmaktadır [32,40,41]. Çünkü yüksek dayanımlı betonlarda çekme dayanımı harç tarafından kontrol edilirken basınç dayanımı agreganın dayanımı ve yüzey karakteristikleri tarafından belirlenmektedir [32].

3.2.3. Karma suyu kalitesinin beton dayanımına etkisi

Betondaki karışım suyu, agrega ve çimento ile birlikte betonu oluşturan temel malzemelerden birisidir. Karışım suyu, taze betonda agrega tanelerinin üzerini ıslatarak betonda yağlayıcı etki oluşturmakta ve betonun işlenebilirliği olarak ifade edilen karma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerinin kolaylaşmasını sağlamaktadır. Karışım suyu aynı zamanda, çimento ile reaksiyona girerek, sertleşmiş çimento hamurunda dayanım veren ürünleri oluşturmaktadır [42].

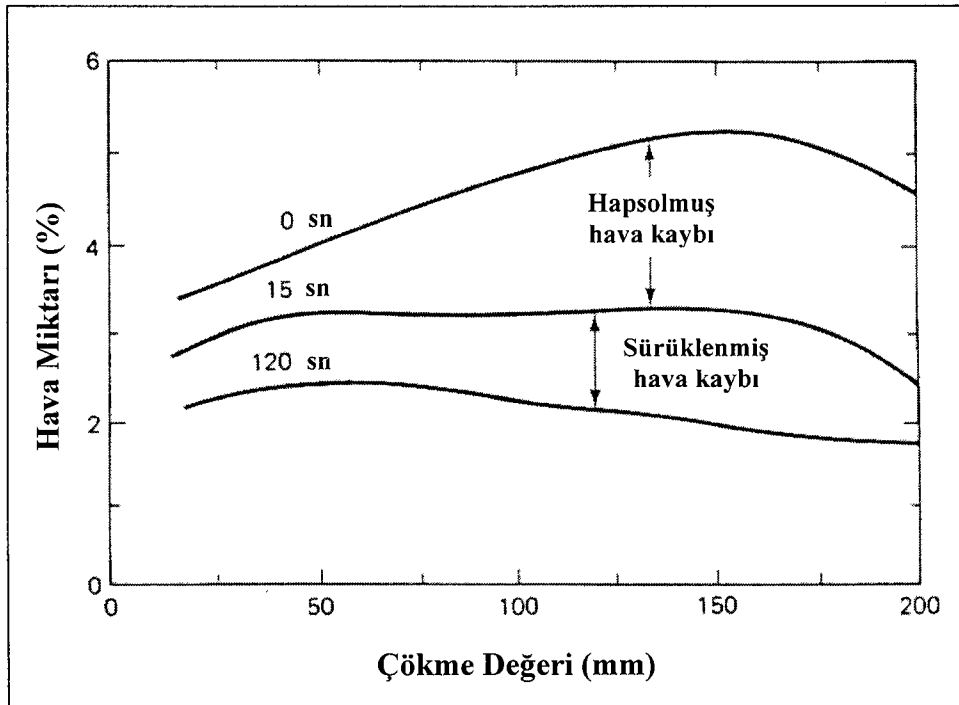
Betonda kullanılacak olan karışım suyunun miktarı ve özellikleri, taze betonun tüm özelliklerini ve sertleşmiş betonun ise dayanım ve çevresel etkilere karşı göstereceği dayanım olarak da adlandırılan, durabilite gibi çok önemli özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, beton yapımında karışım suyu olarak kullanılacak su çok temiz olmalı ve içerisinde sertleşmiş betonun özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilecek kil, şist, asit, klorür, sülfat, yağ gibi zararlı maddeler bulunmamalıdır. Karışım suyunun içindeki zararlı maddelerin miktarı, çimento hamuru ve betonun katılma süresini, basınç dayanımını ve hacim sabitliğini olumsuz yönde etkileyebilmektedir [42].

3.3. Betona Uygulanan Sıkıştırma İşleminin Beton Dayanımına Etkisi

Beton üretimi esnasında malzemeler karılırken ve taze betonun kalıplara yerleştirilmesi işlemleri yapılırken beton içerisinde bir miktar hava kalmaktadır [4]. Bu miktar, yüksek işlenebilirliğe sahip bir betonda hacimsel olarak yaklaşık %5-20 arasındadır [1]. İçerisinde hava bulunan beton sertleştiğinde boşluklar içermekte ve bu yüzden dayanımı ve dayanıklılığı düşük bir beton elde edilmektedir [4]. Bu nedenle taze beton kalıplara yerleştirildikten sonra içerisindeki hava dışarı çıkarılmalı, beton kalıbın köşelerinde ve tüm donatı çeliklerinin çevresinde sıkıştırılmalıdır [2]. Beton içerisinde hapsolmuş havanın çıkarılabilmesi için beton taze haldeyken sıkıştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem, elle tokmaklayarak veya mekanik yöntemlerle yapılabilir [4].

Taze betonun elle sıkıştırıldığı yöntemde bir çubukla, kısa aralıklarla yukarıdan aşağıya doğru darbe uygulanır. Bu yöntem daha çok akıcı kıvamdaki

betonlara uygulanmakta, kuru veya çok kuru kıvamdaki betonlara uygulandığında iyi sonuç alınmamaktadır. Çökme değeri 50 mm den az olan kuru kıvamdaki betonlar daha çok mekanik yöntemler kullanılarak sıkıştırılmaktadır [2,4,5]. Mekanik yöntemler içerisinde en çok kullanılanı betonun vibrasyon (titreşim) vasıtasıyla sıkıştırıldığı yöntemdir. Bu yöntemde betonun sıkışması iki aşamada gerçekleşmektedir. İlk aşamada vibrasyon etkisiyle betondaki harç sıvılaşarak dibe doğru gitmekte, ikinci aşamada ise beton içerisinde kalmış olan hava kabarcıkları dışarı çıkmaktadır [1,4]. Vibrasyon etkisiyle beton karışımı sıvı özellik göstermekte böylece kalıbı tamamıyla doldurmakta, betonarme demirleri arasındaki boşluklara iyi bir şekilde yerleşmekte ve iri agregalar arasındaki boşluklar harçla dolmaktadır. Beton içerisindeki hava kabarcıkları da betonu terk ettiğinden beton dayanımı ve dayanıklılığı da artmaktadır [4]. Ancak, fazladan yapılan vibrasyon işlemi çimento hamurunu yüzeye taşır, su salmayı artırır ve sürüklenmiş havanın kaybına neden olur. Vibrasyonun betonun hava içeriği üzerindeki etkisi Şekil 3.4’de gösterilmiştir [2].



Şekil 3.4. Vibrasyonun betonun hava içeriği üzerindeki etkisi [2]

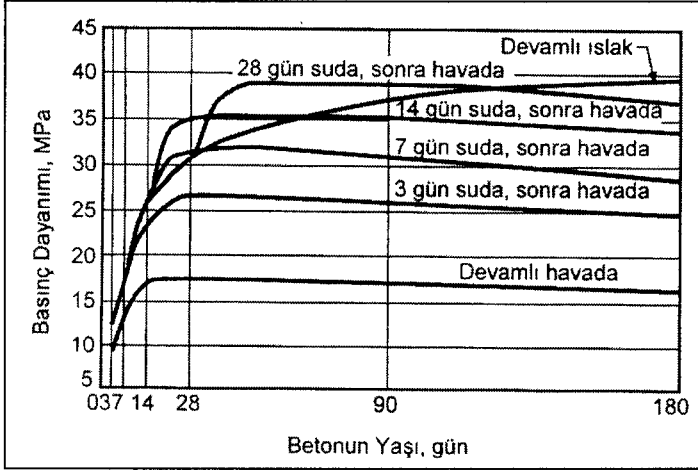
3.4. Beton Kür Ortamının Beton Dayanımına Etkisi

Betonda, özellikle erken yaşlarda, yeterli hidrasyonun sağlanması ve bu ortamın korunması işlemine betonun kür edilmesi adı verilmektedir. Betonun kürü için beton sıcaklığının belirli bir ısıdan aşağıya düşmemesi ve hidrasyon için yeterli miktarda su bulunması gerekmektedir [4].

3.4.1. Kür sürecinde ısı ve nemin beton dayanımına etkisi

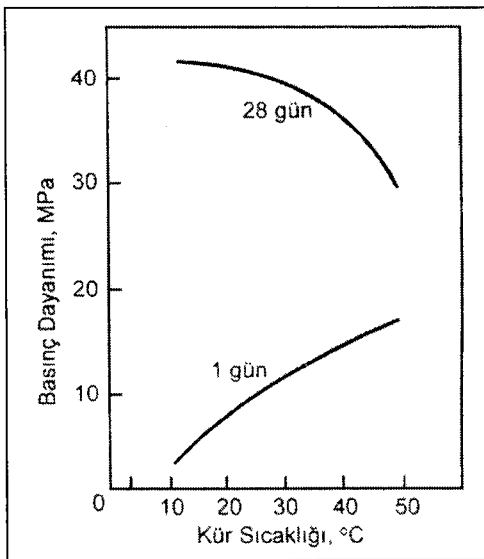
Betondaki nem kaybı belirli bir değeri aştığında ve beton üzerindeki bağıl nem %80'den aşağıya düştüğünde hidrasyon çok yavaşlar, hatta durur ve betonun dayanımı gelişmez. Bu durumda beton, olması gereken potansiyel dayanımından daha az bir dayanıma ulaşabilecektir. Bu etki yüksek dayanımlı (düşük su/çimento oranı ile üretilen) ve puzolanlı çimento ile üretilen betonlarda daha fazladır [2,43]. Böylece, kür süresince ek bir nem sağlamak hidrasyonu maksimum yapacaktır. En iyisi, betona, istenilen dayanımı kazanana kadar sürekli olarak su kürü uygulamaktır [2]. Islak kür ile hava kürü uygulanmış 6 aylık bir betonda dayanım farkı % 58 civarındadır. İlk kür süresinin uzatılması bu farkı azaltmaktadır. Aitcin ve ark. hava kürü ve ıslak küre maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımları arasındaki farkı % 17-22 arasında bulmuştur [43].

Farklı ortamlarda fakat 21 °C sıcaklıkta kür edilen betonların dayanımlarının zamanla değişimi Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Bu şekilden, 7 gün boyunca su kürü yapılarak 28 günlük su kürü ile elde edilebilecek dayanıma erişilebileceği anlaşılmaktadır. Zaten ACI 308 (Recommended Practice for Curing Concrete – Beton kürü için önerilen pratik) çoğu yapısal beton için en az 7 günlük bir kür süresi önermektedir [2, 43].



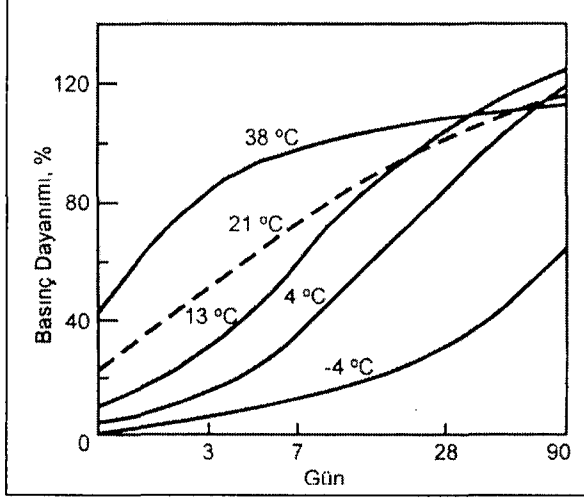
Şekil 3.5. Farklı ortamlarda kür edilen beton numunelerin basınç dayanımı gelişimleri [2,4]

Ancak nem miktarı kadar kür sıcaklığı da beton basınç dayanımı gelişiminin hızını önemli ölçüde etkiler. Şekil 3.6 kür sıcaklığının betonun 1 ve 28 günlük basınç dayanımları üzerindeki etkisini göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda artan erken dayanım çimentonun hızlı reaksiyonu ile açıklanabilir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda düşen geç dayanım kolaylıkla açıklanamaz. Hidratasyon ürünlerinin kimyasal ve fiziksel yapısı 45 °C sıcaklığa kadar radikal olarak değişmez. Ancak, bu yüksek sıcaklıklarda dayanım veren ürünler düzgün dağılmamakta ve bu da zayıf bölgelerin oluşmasına neden olarak geç yaşlarda dayanımı düşürmektedir [2].



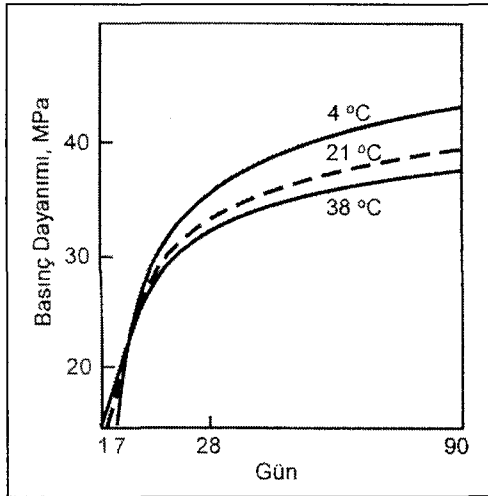
Şekil 3.6. Kür sıcaklığının basınç dayanımı üzerindeki etkisi [2,4]

Değişik sıcaklıklarda kür edilen betonların dayanım gelişimleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Kür sıcaklığının etkisi her sıcaklık için karşılaştırıldığında, 4 °C kür sıcaklığının erken yaşlarda bir miktar daha düşük ancak sonuçta oldukça yüksek bir basınç dayanımının elde edilmesini sağladığı görülmektedir [2,4].



Şekil 3.7. Kür sıcaklığının beton basınç dayanımı gelişimine etkisi [2,4]

Şekil 3.8 ise farklı sıcaklıklarda yerleştirilip daha sonra 21 °C sıcaklıkta kürlenen betonların dayanım gelişimlerini göstermektedir. Buradan düşük sıcaklıklarda uygulanan kürün dayanım gelişim hızını yavaşlatsa dahi yüksek nihai dayanımları sağladığı anlaşılmaktadır [2].



Şekil 3.8. Farklı sıcaklıklarda yerleştirilen ancak 21 °C sıcaklıkta kür edilen betonların basınç dayanımı gelişimleri [2,4]

Kür koşulları, yerinde dökülen betonların kalite kontrolünde kullanılan silindir numunelerin basınç dayanımı üzerinde de etkilidir. Bu fark kür yöntemine de bağlı olarak 10 MPa değerine kadar ulaşabilmektedir [44]. Betonlar için uygulanması önerilen minimum kür süreleri Çizelge 3.1’de özetlenmektedir [1]

Çizelge 3.1. Beton için önerilen minimum kür süreleri (gün) [1]

Beton Dayanımı Gelişim Hızı	Hızlı			Orta			Yavaş		
Beton Sıcaklığı, °C	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Kür Süresince Ortam Koşulları									
Güneş yok, RH* $\geq$ 80	2	2	1	3	3	2	3	3	2
Ortalama güneş veya Ortalama rüzgar veya RH $\geq$ 50	4	3	2	6	4	3	8	5	4
Kuvvetli güneş veya Kuvvetli rüzgar veya RH $<$ 50	4	3	2	8	6	5	10	8	5

*RH= bağıl nem (relative humidity)

3.4.2. Zararlı çevre koşulları ve kür ortamlarının beton dayanımına etkisi

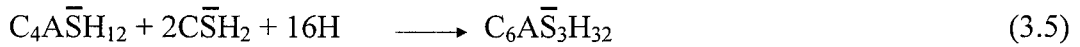
Beton, servis süresi boyunca bünyesinde yıpranmaya yol açacak bir çok kimyasal ve fiziksel etkilere maruz kalabilmektedir. Beton içerisine sızan asitli, sülfatlı sular veya klor gibi maddeler betonda kimyasal olayların meydana gelmesine neden olmakta ve betonu yıpratmaktadır [4]. Betonun zarar görme oranı kimyasal etkinin sudaki konsantrasyonuna, bu etkiye maruz kalınan süreye ve betonun direncine bağlıdır [45]. İslanma-kuruma, donma-çözülme, ısınma-soğuma gibi olaylar da betonu yıpratıcı fiziksel etmenlerdir [4].

Betonda meydana gelen fiziksel ve kimyasal olaylar sonucunda beton aşınmakta, beton içerisindeki donatılar paslanmakta ve önemli gerilmelere neden olmaktadır. Bütün bu gerilmeler betonun yıpranmasına ve servis veremez duruma gelmesine neden olur. Dolayısıyla, beton dayanımı kadar dayanıklılığı da önemlidir. Beton dayanıklılığı, ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı fiziksel ve kimyasal olaylar karşısında betonun direnme kabiliyeti olarak tanımlanır. Beton dayanıklılığını etkileyen en önemli olaylardan ikisi sülfat etkisi ve donma çözülmedir [4].

3.4.2.1. Sülfat etkisi

Yeraltı sularında ve bazı zeminlerde yüksek miktarlarda sodyum sülfat, kalsiyum sülfat, magnezyum sülfat gibi tuzlar bulunmaktadır. Sertleşmiş beton içerisine sızan suların içerisinde bulunan sülfatlar betonun genişlişip çatlamasına ve dayanım kaybetmesine neden olan kimyasal reaksiyonların başlamasına neden olur. Sülfat etkisine maruz kalan betonlar çatlayıp parçalanarak dayanımlarını kaybeder [4,46]. Betonda sülfat hücumunun mekanizması çok iyi anlaşılmış değildir. Birçok önemli yapı sülfata karşı dayanıklı olmadığından zarar görmüştür. Bu hasarların çoğu, yapı pratiğine değil, uygun bir beton kullanmamaya ve sülfat etkisi mekanizmasının tam olarak anlaşılamamasına bağlanmıştır [47].

Beton sülfat etkisine maruz kaldığında kısaca aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir [4];



Sertleşmiş çimento hamurunda kalsiyum hidroksit, hidratasyon ürünü olarak oluşmaktadır. Kalsiyum hidroksit ile sülfatlar reaksiyona girerek alçıtaşı oluşturur. Oluşan bu alçıtaşı ile çimento hamurunun bünyesinde bulunan yarı kararlı yapıdaki $\text{C}_4\text{A}\bar{\text{S}}\text{H}_{12}$ reaksiyona girerek $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ (etrenjit) oluşturur. Sertleşmiş betonun içerisindeki alçıtaşı oluşumu bir miktar genişlemeye yol açmaktaysa da, esas genişleme, alçıtaşı ve yarı kararlı durumdaki kalsiyum-alümino-monosülfhidrat arasındaki reaksiyonlar sonucunda yer almaktadır. Beton içerisinde etrenjit kristallerinin oluşması, çok büyük genleşmeler yaratmakta bu da betonun çatlayıp parçalanmasına yol açmaktadır [4].

Betonla temas halinde bulunan topraklardaki sülfat miktarı ne kadar fazla olursa betondaki bozulma o kadar hızlı gerçekleşmekte ve beton daha çok hasar görmektedir. Sudaki sülfat konsantrasyonu toplam SO_3 veya SO_4 miktarının, ağırlık olarak, bir milyonda kaç kısım (ppm) oluşturduğu belirtilerek ifade edilmektedir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), suda veya toprakta bulunabilecek sülfat konsantrasyonuna bağlı olarak betonun sülfat hücumuna maruz kalabileceği

ortamları az etkili, etkili, çok etkili ve aşırı etkili ortam olarak sınıflandırmıştır. Çizelge 3.2 ACI tarafından tanımlanan sülfatlı ortamları ve önerilen su/çimento oranlarını göstermektedir [4].

Çizelge 3.2. Amerikan Beton Enstitüsü tarafından tanımlanan sülfatlı ortamlar ve beton karışımları için önerilen su/çimento oranları [4]

Sülfat ortamı	Topraktaki suda çözünebilir SO ₄ miktarı (%)	Sudaki SO ₄ miktarı (ppm*)	Beton karışımındaki maksimum su/çimento oranı
Az etkili	0-0.1	0-150	-
Etkili	0.1-0.2	150-1500	0.50
Çok etkili	0.2-2	1500-10000	0.45
Aşırı etkili	>2	>10000	0.45

*ppm=bir milyon içerisindeki kısım (part per million)

Sülfat konsantrasyonunun etkisinin yanında bağlayıcı malzemenin özellikleri ve betonun geçirimsizliği de sülfat hücumunda önemli rol oynar. Betonların performansını sadece geçirimsizlik veya sadece kimyasal dayanım ile açıklayabilmek mümkün değildir. Bu iki özelliğin birlikte bilinmesiyle betonların performansı daha doğru tahmin edilebilir [48].

Bazı karakteristikleri özel bir uygulama alanı ve çevresel koşul için geliştirilen betonlar yüksek performanslı beton olarak adlandırılır. Sülfat ve deniz suyu etkisine maruz kalan betonlarda en dayanıklı olanlarının belirli oranlarda silis dumanı ve doğal puzolan içeren betonlar olduğu bilinmektedir. Silis dumanı ve doğal puzolanların çeşitli kombinasyonlarını içeren yüksek performanslı betonların hem dayanımları hem de dayanıklılıkları normal betonlara oranla daha iyidir [45,46].

3.4.2.2. Donma-çözülme etkisi

Beton düşük sıcaklıklara maruz kaldığında, çimento ve su arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon yavaşlamakta ve sıcaklık belirli bir değere ulaştığı zaman durmaktadır. Beton içerisinde büyük kapiler boşluklarda bulunan

su, 0 °C veya biraz daha düşük sıcaklıklarda donarken, çok küçük kapiler boşluklardaki su -15 °C veya -20 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda donmaktadır. Jel boşluklarında bulunan su ise yaklaşık olarak -78 °C sıcaklıkta donmaktadır. Buza dönüşen suyun hacmi %9 kadar artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda, eğer kapiler boşluklardaki su miktarı %91'den fazla ise donmanın başlamasıyla meydana gelen hacim genişmesi donmamış su üzerinde hidrolik basınç meydana getirmekte ve suyu dışarı doğru itmektedir. Dışarıya doğru itilen su etrafındaki çimento hamuru üzerinde önemli gerilmeler oluşturmaktadır. Betonun sıcaklığı arttığında, buz çözülme ve bu gerilmeler ortadan kalkmaktadır. Ancak, sıcaklığın düşmesi ile tekrar aynı olaylar meydana gelmektedir. Donma-çözülme fiziksel bir olaydır. Islanarak doygun hale gelen ve donma çözülme döngülerine maruz kalan betonlar hasar görmekte, çatlayıp parçalanmaktadır. Dolayısıyla, donma çözülme döngüleri sonrasında beton dayanımları da azalmaktadır [4].

DeneySEL sonuçlar betondaki hasar miktarının yükleme ve donma-çözülme döngülerinin birlikte meydana gelen etkisiyle daha fazla olacağını göstermiştir. Eğer beton dayanımı seviyesi de düşükse hasar daha da fazla olmaktadır. Bu durum yüksek gerilme oranları için de geçerlidir. Otoyol kaplamaları, havaalanları, köprüler ve barajlar yükleme ve donma-çözülmenin ikili etkisine maruzdur [49]. Ayrıca, yükleme, donma-çözülme ve bir de kimyasal etkiye maruz kalan betonlar en çok hasar gören betonlardır. Bu üç önemli faktörün birlikte etkisiyle betonun bozulması oldukça hızlanmaktadır [50].

Öte yandan yüksek dayanımlı betonlar donma-çözülme etkisine karşı daha dayanıklıdır. Yüksek dayanımlı betonların 700 döngüden sonra bile dayanımlarının ancak %10-15 oranında azaldığını fakat normal betonların 250-300 döngüden sonra önemli ölçüde dayanımını yitirdiği belirlenmiştir [51].

4. DAYANIM TESTLERİNİN SONUÇLARINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yapı malzemesi olarak betonun kullanıldığı yapılarda beton kalitesi, sahada dökülen betondan alınan standart silindir veya küp numunelerin basınç dayanımlarının ölçülmesiyle düzenli olarak denetlenmektedir. Deney numuneleri genellikle iki şekilde kür edilmektedir. Standart bir şekilde laboratuvarında belirli sıcaklıkta ve su içinde kür edilen standart numuneler, betonun erişebileceği potansiyel dayanımın hesaplanmasında kullanılır. Bu deneylerin sonuçları, aynı zamanda, karışım oranlarının istenen beton özelliklerini sağlama yeterliği konusunda önemli bilgiler verir. Sahada kür edilen numuneler ise, sahadaki sıcaklık ve nem şartlarında beton dayanımının ne şekilde etkilendiğini göstermekte olup, yapının kullanıma açılacağı süre konusunda faydalı bilgiler verir [3].

Beton üzerinde uygulanan test sonuçlarının doğru ve güvenilir bir şekilde yorumlanabilmesi için, sonuçları etkileyen test koşullarının da hesaba katılması gerektiği unutulmamalıdır. Deney numunelerinin şekil ve boyutları, deney makinesinin alt ve üst plakalarıyla temas eden numunenin uç durumları, numunenin test esnasındaki sıcaklığı, nem içeriği ve test sırasında numunelere uygulanan yükleme hızı gibi unsurlar test sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir [1-4].

4.1. Boyut Etkisi

Dayanım testleri için kullanılacak beton numunelerin boyutları, ilgili standartlar tarafından tavsiye edilmektedir. Ancak her zaman tartışılmasına rağmen, küçük numunelerin kullanılması, bazı avantajlar sağlamaktadır. Bunlar, küçük numunelerin daha kolay kullanılması, hasar görme olasılıklarının daha az olması, daha az kapasiteli bir makine ile kırılabilmesi, daha az beton kullanılması ve böylece laboratuvarında daha az yer kaplaması olarak özetlenebilir [1,51,52]. Öte yandan, numunenin boyutu, dayanım testi sonuçlarını ve sonuçlardaki değişkenlikleri etkileyebilmektedir [1].

Beton, bilindiği gibi kompozit bir malzeme olduğundan, dayanımı da değişken kısımlardan oluşmaktadır. Beton içerisinde boşluklar ve gözenekler gelişigüzel bir şekilde dağılmıştır. Bu durumda şu kabulü yapmak yerinde olur; daha büyük hacimdeki bir beton gerilmeye maruz kaldığında, bu betonun düşük dayanımlı bir kısım içirme olasılığı daha yüksektir. Bu nedenle, numunenin boyutları büyüdüğünde, ölçülen dayanımlarında düşme gözlenmektedir. Boyut etkisi daha homojen betonlarda azalmaktadır [1,52].

Silindir şeklinde fakat daha büyük boyuttaki numuneler küçük numunelere oranla daha düşük dayanım göstermektedir [3,53]. Numune boyutları büyüdüğünde belli bir noktadan sonra bu etki de azalmaktadır. Silindir deney numunelerinde, numune boyunun numune çapına oranı arttığında, basınç dayanımı testinde ölçülen dayanım azalmaktadır [3]. Ancak yapılan bir araştırmada, göreceli olarak yüksek dayanımlı betonlarda, 75 mm çapındaki silindir numunelerin ve 75 ve 100 mm boyutundaki küp numunelerin görünen dayanımlarının daha büyük boyutlardaki numunelerin dayanımlarından daha küçük olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç duvar etkisine bağlanmıştır. Aynı çalışmada, beton dayanım seviyesi yükseldikçe boy/çap oranının etkisinin azaldığı saptanmıştır [52]. Öte yandan 50 MPa basınç dayanımı seviyesine kadar 75 ve 150 mm çapındaki silindirler istatistiksel olarak birbirine benzerdir [51].

4.2. Şekil Etkisi

Basınç dayanımı testlerinde kullanılan standart numunelerin şekli ülkelere göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri, Kanada, Fransa ve Avustralya'da silindir numuneler, Almanya ve diğer bazı Avrupa ülkelerinde ise küp şekilli numuneler kullanılmaktadır. Türkiye'de ise hem küp hem de silindir şekilli numuneler kullanılabilmektedir [4,52].

Basınç dayanımı testi esnasında, test makinesi plakalarının tutucu ve kısıtlayıcı etkisi küp numunenin tüm boyu üzerinde etkili olmakta ancak bu etki, silindir numunelerde, orta kısımlara yaklaştıkça ortadan kalkmaktadır. Böyle olunca, aynı betondan yapılmış küp numunelerin dayanımları da, silindir numunelerin dayanımlarından daha yüksek çıkmaktadır [1].

İngiliz standardında, silindir numunenin dayanımının küp numune dayanımına oranı 0.8 olarak verilmektedir. Ancak, gerçekte, bu iki farklı şekildeki numunenin dayanımları arasındaki ilişkiyi her beton karışımı için yorumlamak kolay değildir. Silindir numune dayanımının küp numune dayanımına oranı, betonun dayanım seviyesi arttıkça artmakta, bu oran, 100 MPa ve daha yüksek dayanımlı betonlarda 1.0'e kadar yükselmektedir [1]. Basınç dayanım seviyeleri 40, 60 ve 75 MPa civarında olan beton numuneler üzerinde yapılan deneylerde boy/çap oranı 2 olan silindir numunelerin basınç dayanımlarının küp numunelerin basınç dayanımına oranı 0.74 ile 1.16 arasında bulunmuştur [52].

4.3. Boy/Çap Oranının Etkisi

Beton dayanımı testinde kullanılan standart silindir numunelerin boyu çapının iki katıdır. Ancak bazen, başka boy/çap oranları ile karşılaşılmaktadır. Özellikle, beton elemanlardan karot numuneleri alındığında, karotun çapı karot delme makinesinin uç çapına bağlı olmakta, karotun boyu ise yapı elemanı tarafından kısıtlanabilmektedir. Örneğin, döşeme kalınlığının küçük olduğu binalarda, döşeme betonlarından uzun karotların alınması mümkün olmamaktadır. Karot numunesinin boyu çok uzun olduğunda, boy/çap oranı 2.0 olacak şekilde uçlarından kesilmektedir. Ancak boyu çok küçük olan numuneler, olduğu gibi test edilmekte ve bu testin sonucunda elde edilen dayanım değeri, boy/çap oranı 2.0 olan numunenin dayanım değerine uyarlanmaktadır. Standartlar farklı boy/çap oranları için dayanım düzeltme faktörleri vermektedir. Ancak şu da unutulmamalıdır ki, boy/çap oranının etkisi beton dayanım seviyesi ile de ilgilidir [1].

4.4. Numunenin Nem Durumunun Etkisi

Türk, İngiliz ve ASTM standartları, standart yöntemle beton dayanımlarının belirlenmesi halinde, tüm numunelerin, suya doygun durumda test edilmesini şart koşmaktadır [1,4]. Numunenin kuru durumda test edilmesi, ölçülen dayanımın bir miktar yüksek çıkmasına neden olmaktadır [1,54]. Bu durumun şöyle

gerçekleştirdiği önerilmektedir; numunenin yüzeyden itibaren kurumaya başlamasıyla kuruma büzülmesi olmakta ve bu da yanal ekseninde bir basınç gerilmesi yaratmakta ve sonuçta yükün uygulandığı yönde malzeme mukavemeti artmaktadır. Ancak, çok iyi kür edilmiş harç prizmaları üzerinde yapılan deneyler, kuru numunelerin dayanımlarının ıslak test edilenlere göre daha yüksek çıktığını göstermiştir. Bu deneylerde, numuneler kuruma büzülmesine maruz kalmamış olsalar bile, kuru numunelerin dayanımları daha yüksek çıkmıştır. Bu da diğer bir öneriye uyum sağlamaktadır. Bu öneriye göre, numunenin ıslanmasıyla, çimento jeli emilen su ile genişlemekte ve bu da dayanımın düşmesine neden olmaktadır [1]. Ayrıca, kuru çimento hamurunun daha yoğun olması ve suya doymun haldeki çimento hamurunda hidrostatik basıncın oluşması da kuru test edilen numunelerin dayanımlarının daha yüksek çıkmasına neden olabilir [3].

4.5. Numune Sıcaklığının Etkisi

Test sırasında numunenin sahip olduğu sıcaklık basınç dayanımı testi sonuçlarını etkilemektedir. Test sırasında numunenin sıcaklığının yüksek olması, daha düşük dayanımların ölçülmesine neden olmaktadır [3].

4.6. Numune Uç Durumlarının ve Başlığın Etkisi

Basınç dayanımı deneyi esnasında yük, deney numunelerine, deney makinesinin alt ve üst plakaları tarafından düzgün dağılımlı olarak uygulanmalıdır. Aksi takdirde, numune üzerindeki gerilme dağılımları, hesaplamalarda kabul edilen gerilme dağılımlarından farklı olacaktır. Başlıktan ve uç durumlarındaki düzensizlikten kaynaklanan ve böylece yükün düzgün bir şekilde uygulanmadığı durumlarda, belirli bölgelerde yoğunlaşan gerilmelerin neticesinde, numunenin basınç etkisinde kırılması, yarıma şeklinde gerçekleşebilmektedir [3].

Beton dayanımı testinde kullanılan küp numuneler döküm yönüne dik olan yüzeyleri düzgün olduğundan, deney öncesi başka ek bir işlem gerektirmemektedir. Ancak, silindirik numunelerin üst uçları mala ile

düzeltildiğinde, mükemmel bir düzlük sağlanamamakta ve bu yüzden silindir numunelerin basınç dayanımı deneyinden önce, numune uçlarına başlık yapılmaktadır [3,4]. Burada, başlık malzemesi ve bu malzemenin dayanımı önem kazanmaktadır. Başlık malzemesinin dayanımı, numunenin dayanımından düşük olmamalıdır. Ancak, başlığın dayanımı, başlığın kalınlığı ile de değişmektedir. Yine de başlık 3-8 mm kalınlıkta olmalıdır [4].

4.7. Yükleme Hızının Etkisi

Deney numunelerinin statik yükler altında normalden hızlı bir şekilde kırılması yüksek dayanım değerlerinin ölçülmesine neden olmaktadır [3]. A.Tuncan ve ark. yaptıkları çalışmada deneylerde yükleme hızının artmasıyla beton numunelerin yarmada çekme dayanımlarının da arttığı gözlenmiştir [55]

5. KONUSUN İLE İLGİLİ ARAŞTIRMALARIN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

Beton, daha önce de bahsedildiği gibi, zemin altı ve zemin üstü birçok yapıda, taşıyıcı sistemlerin imalatında kullanılan en popüler yapı malzemesidir. Yılda 40 milyon tona yakın bir çimento üretimine sahip olan Türkiye’de, büyük yeraltı yapıları bir yana, yerüstü yapıların hemen hepsinde beton, taşıyıcı sistemin temel malzemelerinden birisi olmuştur. Böylesine çok üretilen ve kullanılan bir malzemenin de denetlenmesi gereği bugüne kadar hep duyulmuş, bundan sonra da hep duyulacaktır [6].

Beton denetiminde, evrensel bir büyüklük olan basınç dayanımı kullanılmaktadır. Tasarım hesaplarında, betonun belirli dayanım değerlerine ulaşacağı varsayılmakta ve projeler bu dayanım değerlerine göre oluşturulmaktadır. Beton kalitesinin denetlenmesinde ve değerlendirilmesinde ise, değişik yöntemler kullanılmaktadır. En çok kullanılan yöntem, yapıda, beton dökümü esnasında, standart silindir veya küp numunelerin alınarak bu numunelerin, aksi belirtilmedikçe, 28 gün sonra kırılmasıyla basınç dayanımlarının bulunması esasına dayanmaktadır. Ancak, betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürlenmesi işlemlerindeki farklılıklar, yapıdaki betonun yerinde dayanımının da belirlenmesi ihtiyacını doğurmuştur [6]. Ayrıca, standart deney yönteminde, test edilecek beton numunesi, eksenel ve düzgün dağılımlı bir basınç yükü uygulanmak suretiyle kırılmaktadır. Ancak, yapıdaki beton, sadece eksenel yüklerin etkisinde değildir. Bunlara ek olarak, standart deney yönteminde kullanılan numunelerin hacimleri, yapıdaki betonun hacmine oranla oldukça küçüktür. Bu etmenler de, yapıda, betonun yerinde dayanımının belirlenmesini önemli kılmaktadır [4]. Yapıdaki beton dayanımlarının belirlenmesi için, karot alma, yerinde dökme silindir, çekip çıkarma, çekip koparma, batma direnci, sesüstü atım hızı, beton test çekici ve olgunluk gibi yöntemler kullanılmaktadır [6,56]. Çizelge 5.1 bu yöntemlerden bazılarının, çeşitli kıstaslara göre karşılaştırmasını özetlemektedir [6].

Çizelge 5.1. Yerinde beton dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan yöntemlerin karşılaştırılması [6]

Yöntem	Maliyet	Deney Hızı	Hasar	Temsil Etme Özelliği	Korelasyon Güvenilirliği
Karot alma	Yüksek	Yavaş	Orta	Orta	İyi
Çekip çıkarma	Orta	Hızlı	Az	Sadece yüzeye yakın	Orta
Sesüstü atım hızı	Düşük	Hızlı	Yok	İyi	Zayıf
Beton test çekici	Çok düşük	Hızlı	Yok	Sadece yüzey	Zayıf
Olgunluk	Orta	-	Çok az	İyi	Orta

5.1. Standart Yöntemler

Betonun dayanım, dayanıklılık (durabilite) ve diğer mekanik özelliklerini temel ve esas (değişmez) özellikler olarak düşünmemek gerekir. Çünkü, test numunesinin şekli, boyutları, numunelerin hazırlanışı, test esnasındaki sıcaklıkları, deneydeki yükleme hızı ve yükleme yapılan makinenin çeşidi gibi değişkenler gözlenen mekanik davranışı önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, farklı deneyler ve deney koşulları doğal olarak farklı sonuçlar verir. Böylece, numunenin bazı mekanik özellikleri, örneğin basınç dayanımı belirtildiğinde, deney yöntemini de belirtmek gerekir. Ayrıca, farklı şekillerde belirlenmiş mekanik özellikler arasında tekil bir ilişki de yoktur. Örneğin, beton dayanımının, test edilecek numunenin silindir veya küp olması durumunda farklı olmasıyla birlikte, silindir ve küp dayanımları arasındaki oran da beton çeşidine göre değişkenlik gösterebilmektedir. Bu nedenle, her araştırmacı ve uygulamacının farklı bir deney yöntemi uygulamasından kaynaklanacak karışıklıkları minimize etmek için numunelere standart deney yöntemleri uygulanmaktadır [2].

Standart deney yöntemlerinde test parametreleri bir nebze sabitlenmiştir. Böylece, farklı laboratuvarlarda çalışan araştırmacılar, kendi buldukları sonuçları karşılaştırabilir ve genelleyebilirler. Kuzey Amerika kıtasında test yöntemleri, genellikle ASTM tarafından geliştirilmektedir. Ancak ABD’de, Birleşik Amerika İyileştirme Bürosu (U.S. Bureau of Reclamation) başka usuller

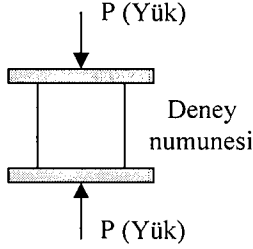
kullanabilmektedir. Birçok Avrupa ülkesi de kendi ulusal standartlarını kullanmaktadır. Bunlara ek olarak, RILEM (Malzemeler ve Yapılar için Deney ve Araştırma Laboratuvarları Uluslararası Birliği – Reunion Internationale des Laboratoires Dessais et de Recherches sur les Materiaux et les Constructions - The International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) Avrupa’da genişçe kullanılan test yöntemlerini yayımlamıştır [2]. Türkiye’de, son yıllara kadar, standart numuneler ile basınç dayanımının belirlenmesi deneyleri için TS 3068 ve TS 3114 kullanılmıştır [57,58]. Konu ile ilgili yeni yürürlüğe giren standartlar ise TS EN 12390-1, TS EN 12390-2, TS EN 12390-3 ve TS EN 12390-4 standartlarıdır [59-62]. Beton dayanımı tayini için kullanılan standart deneylerle ilgili Amerikan ve İngiliz standartları ise ASTM C 31, ASTM C 39, ASTM C 192-90a, BS 1881: Part 108: 1983, BS 1881: Part 110: 1983, BS 1881: Part 111: 1983 ve BS 1881: Part 116: 1983 standartlarıdır [63-69]. ENV 206: 1992 standardı hem küp hem de silindir numune kullanılmasına izin vermektedir [70]. Aşağıda, standart küp ve silindir testleri anlatılmıştır.

5.1.1. Küp testi

Küp testi için beton sağlam bir şekilde çelikten veya dökme demirden imal edilmiş kalıpların içine doldurulur. Türk Standartlarında küp numunelerin anma boyutları belirtilmiştir. Genellikle, standart küp numuneleri 150 mm boyutundadır. Numune kalıpları sızdırmaz olmalıdır ve kenarları birbirine iyi bir şekilde bağlanmalıdır. Kalıplar beton dökümünden önce ince bir yağ tabakasıyla yağlanmalıdır. Beton, küp kalıpların içerisine her bir katman 100 mm’den az olmamak kaydıyla en az iki katmanda doldurulur ve her bir katman bir vibratör vasıtasıyla veya çelik bir çubukla sıkıştırılır. Şişleme ile yapılan sıkıştırmalarda vuruş sayısı beton kıvamına göre belirlenir. Kalıp doldurulduktan sonra, numunenin üst kısmı bir mala yardımıyla düzeltilir ve içi beton dolu olan kalıp 24 ± 4 saat boyunca 20 ± 5 °C sıcaklıkta ve %90’dan az olmayan bağıl nem ortamında saklanır. Bu sürenin sonunda numune kalıptan çıkarılır ve 20 ± 2 °C su içerisinde kür edilir. Küp numuneler, basınç dayanımı testi esnasında döküm yönüne dik olan kenarları deney makinesinin plakalarına temas edecek şekilde

yerleştirilir. Basınç dayanımı testinde, yük numuneye 0.2-0.4 MPa/saniye hızında uygulanır [1]. TS 12390-1-4 ile BS 1881: Part 108: 1983 standart küp testi hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 5.1 numuneler üzerinde basınç dayanımı testi uygulanmasının şemasını göstermektedir.



Şekil 5.1. Küp numunede basınç dayanımı testi şeması

Numunenin basınç dayanımı da, kırılma esnasında numunenin taşıyabildiği yükün numunenin kesit alanına bölünmesiyle numunenin basınç dayanımı hesaplanır;

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5.1)$$

Burada, P, kırılma yükü ve A'da numunenin kesit alanıdır.

5.1.2. Silindir testi

Ülkemizde standart silindir numunenin boyu, genellikle 300 mm ve çapı da 150 mm'dir. Silindir numuneler de küp numuneler gibi betonun sağlam ve sızdırmaz şekilde çelikten veya dökme demirden yapılmış kalıpların içine doldurulmasıyla elde edilirler. Ancak, silindir numunenin test edilebilmesi için düzgün olmayan yüzeyinin başlık yapılarak veya tıraşlanarak düzeltilmesi gerekir [4]. Silindir numuneler de, aynı küp numuneler gibi basınç dayanımı testine tabi tutulur. Basınç dayanımı da küp numunede olduğu gibi, kırılma yükünün, numunenin kesit alanına bölünmesiyle elde edilir. TS 12390-1-4, ASTM C 192-

90a, ASTM C 39 ve BS 1881: Part 110: 1983 silindir testi hakkında bilgi vermektedir.

5.2. Tahribatlı Yöntemler (Karot Testi)

Test numunelerinin dayanımlarının ölçülmesinin temel amacı gerçek yapıdaki betonun dayanımını tahmin etmektir. Burada tahmin kelimesi vurgulanarak söylenir. Çünkü numunelerin test edilmesi sadece bir göstergedir ve yapıdaki dayanımın numune dayanımı ile aynı olduğu kesin değildir. Bunun nedeni, yapıdaki kür koşullarının ve yapıdaki betonun sıkıştırılma derecesinin standart numunelerden farklı olabilmesidir. Daha önce de bahsedildiği gibi, standart test numunelerinin boyutları, şekli ve oranları da test sonucunu etkilediğinden bu testlerin sonuçları ile yapıdaki esas dayanımın belirlenmesi kolay değildir [1].

Ayrıca bazen, kötü hazırlanmış standart deney numunelerinin sonuçlarının yetersiz çıkması, çatlakların ya da başka işaretlerin olmasının beton dayanımının araştırılmasını gerekli kılması veya bunlara ek olarak, yapının daha yüksek gerilme şartlarında kullanılma durumunun gündeme gelmesi yapıdaki beton dayanımının belirlenmesini gerektirebilir [2].

Eğer standart deney numunelerinin sonuçları belirtilen dayanımlardan düşük çıkacak olursa, iki olasılık akla gelmektedir. Birincisi, yapıdaki gerçek dayanımın da düşük olma olasılığı, diğeri ise standart deney numunelerinin yapıdaki dayanımı iyi bir şekilde temsil edemiyor olması olasılığıdır. Bu tartışma ve ikilem genellikle yapıdan karot numunesi olarak çözülmektedir. Karot numuneleri sadece bu amaçla alınmaz. Bu numuneler aynı zamanda, betondaki ayrışmayı, karbonatlaşma derinliğini, beton karışımında kullanılmış olan malzemelerin bazı özelliklerini ve yapısal birleşme yerlerindeki bağı gözlemlemek için de kullanılırlar [1,6].

Karot numuneleri yapı elemanlarından, dönerek kesen ve elmas bıçaklı bir uç ile çalışan makineler yardımıyla çıkarılır. Karot alımı sonrasında silindirik şeklinde bir numune elde edilir. Bu numunenin uçları kesilip düzeltildikten sonra karot numunesi, standart deney numunesi gibi test edilir. Tahribatlı testlerden olan

karot testi eski standart TS 10465’de, yeni standart TS EN 12504-1’de, ASTM C 42’de ve BS 1881: Part 120: 1983’de tanımlanmaktadır [71-74].

5.2.1. Karot dayanımlarını etkileyen faktörler

Karotların dayanımı genellikle standart silindir numunelerin dayanımından düşüktür. Bu, kısmen karotun kesme işlemi sırasında gördüğü zarardan, kısmen de sahadaki kür koşullarının standart deney numunelerine uygulanan kür koşullarından daha olumsuz olduğundan dolayıdır. Her ne kadar dikkatli yapılırsa yapılsın, yine de karot alma esnasında karot numunesi bir miktar hasar görmektedir. Bu etki yüksek dayanımlı betonlarda daha belirgin olmaktadır [1].

Ayrıca numune alınan betonun yaşı da önemlidir. Karot numunesi alındığında aynı yaşta standart numune bulmak mümkün olmadığından ve karotlar da genellikle 28 günden sonra alındığından, numunenin yaşı korelasyon için önem taşımaktadır. Bunlara ek olarak, karot alınan yerin mevkisi, yapı elemanının çeşidi, karotun hangi yönde alındığı, karotun çapı, boy-çap oranı ve içinde donatı demirlerinin bulunup bulunmaması da karot dayanımını etkilemektedir [1].

5.2.1.1. Karot narinliğinin (boy/çap oranı) etkisi

Karot narinliği olarak da tanımlanan, karot numunesinin boy/çap oranı karot dayanımını önemli ölçüde etkiler. Bu nedenle, boy/çap oranının etkisi karot basınç deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde belirli düzeltme faktörleri gözönünde bulundurularak değerlendirilmektedir. Karot testlerinin sonuçları ASTM C 42 ve BS 1881: Part 120: 1983’e göre Çizelge 5.2’ye uyularak düzeltilmektedir.

Çizelge 5.2. ASTM C 42-90 ve BS 1881: Part 120: 1983’de belirtilen karot narinlik düzeltme faktörleri

Boy/çap (l/d) Oranı	Düzeltilme Faktörü (ASTM)	Düzeltilme Faktörü (BS)
2.00	1.00	1.00
1.75	0.98	0.97
1.50	0.96	0.92
1.25	0.93	0.87
1.00	0.87	0.80

Çizelge 5.3 ise çeşitli araştırmacılar, kurumlar ve standartlar tarafından, farklı boy/çap oranları için önerilen düzeltme faktörlerini özetlemektedir [6].

Çizelge 5.3. Çeşitli araştırmacılara göre narinlik düzeltme faktörleri

Beton Birliği Bağıntısı (aynı zamanda BS 1881)	$K_{\lambda} = \frac{2}{1.5 + 1/\lambda}$
Chung (1979)	$K_{\lambda} = \frac{1}{[1 + 0.8(1 - 0.5\lambda)]^2}$
Chung (1989)	$K_{\lambda} = \frac{1}{1 + 0.8(1 - 0.5\lambda)^2 / \lambda}$
Bartlett ve MacGregor (1995)	
Islak kür*	$K_{\lambda} = 1 - \{0.117 - (4.3 \times 10^{-4})f_c\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Normal atmosferde, kuru*	$K_{\lambda} = 1 - \{0.144 - (4.3 \times 10^{-4})f_c\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Karotun ilk nem koşulunun muhafaza edildiği durum	$K_{\lambda} = 1 - \{0.1305 - (4.3 \times 10^{-4})f_c\} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Kaya mekaniği	$K_{\lambda} = \frac{8}{7 + 2/\lambda}$
f_c MPa olarak ölçülen karot basınç değeri, l karot boyu, d karot çapı, λ karotun boy/çap oranıdır.	

* ASTM C 42-90'da tanımlanan kür şartları dikkate alınacaktır; Nemli: 2 veya 7 gün kireçli suda bekletilmiş, Kuru: Deneye tabi tutulmadan önce 7 gün laboratuarda açık havada bekletilmiş

Bartlett ve MacGregor yaptıkları araştırmada, karot boy/çap oranının, karot dayanımları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar, aşağıdaki modellemeyi baz almışlardır [75];

$$F_{l/d} = 1 - 9 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^{0.1} \quad (5.2)$$

Bu denklemde, $F_{1/d}$, karotun boy/çap oranı ilgili faktördür. Θ ve β_1 sabitleri regresyon analizi ile belirlenir. Çalışmanın sonucunda, yüksek dayanımlı betonlar için gerekli olan boy/çap (l/d) oranı ile ilgili dayanım düzeltmesinin azaldığı belirlenmiştir. Beton dayanım seviyesi yükseldikçe, 1.0'e daha yakın olan oran değerleri daha uygun olmaktadır. Ayrıca, gerekli olan dayanım düzeltmesi, karot numuneler suya doygun olduğunda, laboratuvarında 7 gün boyunca hava kürüne maruz kaldığı duruma oranla, az fakat belirgin şekilde azalmıştır. Son olarak, boy/çap oranı 2.0 ve 1.0 olan standart karotların dayanımlarının değişkenlik katsayıları arasında farkların olmadığı da gözlemlenmiştir [75].

5.2.1.2. Karot çapının etkisi

Yapılardan karot alınması sırasında, karot numunesine ait karot yüzey alanı/karot hacmi büyüklüğü karotun örselenme olasılığını etkilemektedir. Bu büyüklük karot çapı ile ilintilidir. Burada, daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, karot çapı küçüldükçe, yüzey alanı/karot hacmi oranı artmakta ve buna bağlı olarak da değişimler gözlenmektedir. Uygulamalarda, sıkça kullanılan karot çapı 100 mm olup, karot çapının aynı zamanda karışımda kullanılan en büyük agrega tane boyutunun en az üç katı olmasına da özen gösterilmelidir. Karot çapı, karışımdaki en büyük agrega tane boyutunu gözeterek şekilde 50 mm'ye kadar olabilir [6].

Bartlett ve MacGregor, çalışmalarında, karot çapının karot dayanımları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada dokuz ayrı kaynaktan alınan değerlerin regresyon analizi ile karot çapının ortalama karot dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Burada, karotların bir kısmı beton döküm yönüne paralel, bir kısmı ise dik olarak alınmıştır. Tüm karotların boy/çap (l/d) oranları 2'dir. Numuneler bir kısmı suya doygun hale, bir kısmı ise laboratuvarında hava kurusu durumuna getirilmiştir. Beton numuneler 1 ve 3 aylık yaşlar arasındayken test edilmiştir [76].

Karotlar, kesme işlemi sırasında oluşabilecek mikroçatlaklar gibi yüzey hasarlarına karşı hassastır. Kesme işlemi sırasında, agrega parçaları da kesilir ve bu agrega parçaları test sırasında karot yüzeyinden çıkabilir. Çünkü, kesilen

agrega parçaları artık tamamen çimento hamuru matrisi içerisinde yer almamaktadır. Eğer delinme sırasında etkilenen bölgenin kalınlığının, karot çapından bağımsız olarak, sabit bir kalınlığa sahip olduğunu düşünürsek, küçük çaplı karotlarda, karot kesitindeki hasarlı bölgenin alanının tüm karot alanına oranı, büyük çaplı karotlardakine nazaran daha büyük olacaktır. Karotun kırılma yükü, hasarlı ve hasarsız bölgelerin karşıladıkları yükün toplamı olarak aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir [76];

$$P = f_t A_t + k f_t A_0 \quad (5.3)$$

Burada,

P: kırılma yükü

f_t : hasar görmemiş kabul edilen A_t alanına sahip bölgenin dayanımı

A_t : hasarsız kabul edilen iç bölgenin alanı

$k f_t$: hasar görmüş dış bölgenin dayanımı

A_0 : hasar görmüş dış bölgenin toplam alanı

Eğer hasar görmüş bölgenin uniform bir t kalınlığına (bu kalınlık karot çapına oranla çok küçüktür) sahip olduğu kabul edilirse aşağıdaki eşitlik yazılabilir [76];

$$A_0 \approx 3.75 \left(\frac{t}{d} \right) A \quad (5.4)$$

Burada, A, karotun toplam kesit alanıdır.

Böylece, kırılmadaki gerilme, f_c , aşağıdaki gibi yazılabilir [76];

$$f_c = f_t \left\{ 1 - 3.75 \left(\frac{t}{d} \right) (1 - k) \right\} \quad (5.5)$$

Böylece, f_i , t ve k 'nin gelişigüzel bağımsız değişkenler olduğu kabul edilecek olursa, f_c 'nin beklenen değeri de aşağıdaki gibi olur [76];

$$E[f_c] = E[f_i] \left\{ 1 - \left(\frac{3.75}{d} \right) E[t] (1 - E[k]) \right\} \quad (5.6)$$

ve f_c 'nin değişkenliği ise,

$$\begin{aligned} Var[f_c] = E[f_i] \left\{ 1 - \left(\frac{3.75}{d} \right)^2 E[t]^2 (1 + E[k]^2) \right\} \\ + \left(\frac{3.75}{d} \right)^2 E[f_i]^2 \left\{ (1 + E[k]^2) Var[t] + E[t]^2 Var[k] \right\} \end{aligned} \quad (5.7)$$

olur [76].

5.2.1.3. Karot alma yönünün etkisi

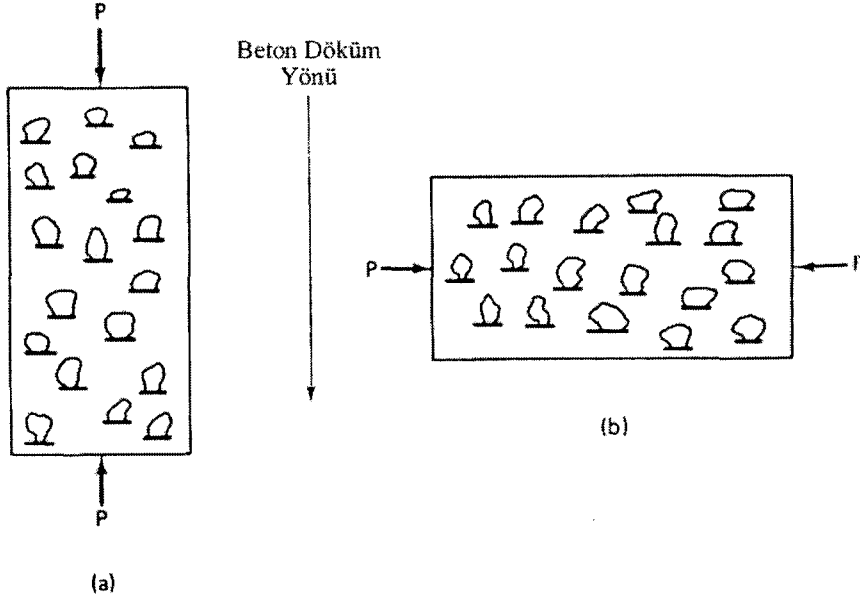
Yapılarda, beton döküm yönünden kaynaklanan betonun heterojenliği, karot numunelerin basınç dayanımı sonuçlarını etkilemektedir. Deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, yatay olarak kesilerek çıkarılmış karotlar düşey alınmış karotlara göre narinlik ve beton yaşından bağımsız olarak %12 - %7-9 dolaylarında daha düşük dayanım gösterirler. Bu oran, Beton Birliği 1987 kaynağında %8 olarak belirtilmiştir. Uygulamada, karotun alınma yönü ile ilgili düzeltme faktörü aşağıdaki gibi belirtilmektedir [6].

$$K_y = \frac{f_{\lambda,d}}{f_{\lambda,y}} = 1.08 \quad (5.8)$$

Burada, $f_{\lambda,d}$ ve $f_{\lambda,y}$ sırasıyla 1.0 narinlik oranına sahip düşey ve yatay alınmış karotların basınç dayanımı değerleridir [6].

Terleme (su salma), özellikle iri agrega parçalarının altlarında, agrega ile çimento hamuru arasındaki bağ kuvvetinin azalmasına neden olur. Şekil 5.2'de de

görülebileceği gibi, zayıf plakalar (düzlemler) yerçekiminin etkisiyle, her zaman beton döküldüğünde yatay olarak uzanırlar [2].



Şekil 5.2. Beton döküm yönüne göre beton içerisinde terleme sonucu oluşan boşlukların pozisyonu [2]

Böylece boşluk ve gözenekler, ilk şekilde (Şekil 5.2a) uygulanan yüke dik, diğer şekilde (Şekil 5.2b) ise uygulanan yüke paralel olarak uzanırlar. Uygulanan yüke dik olan çatlaklar, çekme dayanımını, basınç dayanımını etkilediklerinden daha fazla etkiler. Tersine, uygulanan gerilmeye paralel olan çatlaklar ise basınç dayanımını, çekme dayanımından daha fazla etkiler. Bu nedenle, terlemeden kaynaklanan zayıf düzlemler ilk durum için çekme dayanımının daha fazla azalmasına ve ikinci durum için ise basınç dayanımının daha fazla azalmasına neden olurlar. Deneysel çalışmaların neticesinde, dikey alınan karotların yatay alınan karotlara oranla %8 daha yüksek basınç dayanımına ve %8 daha düşük çekme dayanımına sahip oldukları bulunmuştur [2].

5.2.1.4. Örselenmenin etkisi

Yapı elemanlarından keserek karot numunesi çıkarma işlemi sırasında, her ne kadar dikkatli çalışılırsa çalışılsın, kesilen agreganın çimento hamurundan

ayrılma olasılığı vardır. Bir başka deyişle, karot alma işlemi esnasında karot numunesi örselenmektedir. Bu nedenle, karot numunelerin basınç dayanımları, aynı boy/çap oranındaki ve aynı çaptaki standart silindir döküm numunelerin basınç dayanımına nazaran daha düşük olacaktır [6].

5.2.1.5. Karot numunesinde bulunan donatı parçalarının etkisi

Betonarme yapı elemanlarından karot numunesi kesilip çıkartılırken, bazen betonarme elemanın içindeki çelik donatılar da kesilmekte ve kesilen donatının bir parçası karot numunesinin içinde kalabilmektedir. Bu durumda test edilen bir karot numunesinin basınç dayanımı bir düzeltme faktörü gözönünde bulundurularak değerlendirilmelidir. Genelde, içinde donatı parçası bulunan karot numunenin basınç dayanımında beklenen azalma %10'dan azdır. Örneğin, Bartlett-MacGregor 1995 kaynağında tek ve çift donatı parçası durumu için önerilen düzeltme faktörleri sırasıyla $K_{do}=1.08$ ve 1.13 tür. Beton Birliği (Greig, 1988) kaynağında bu faktör aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanabilmektedir [6]. Standartlar yük yönüne paralel şekilde donatı içeren karot numunelerini kabul etmemektedir;

$$K_{do} = \frac{f_k}{f_{k,d}} = 1.0 + 1.5 \frac{\sum d_d * h}{d * l} \quad (5.9)$$

Burada,

K_{do} : donatı parçası için düzeltme faktörü

f_k : donatısız karot basınç dayanımı

$f_{k,d}$: donatı parçası içeren karotun basınç dayanımı

d_d : donatının çapı

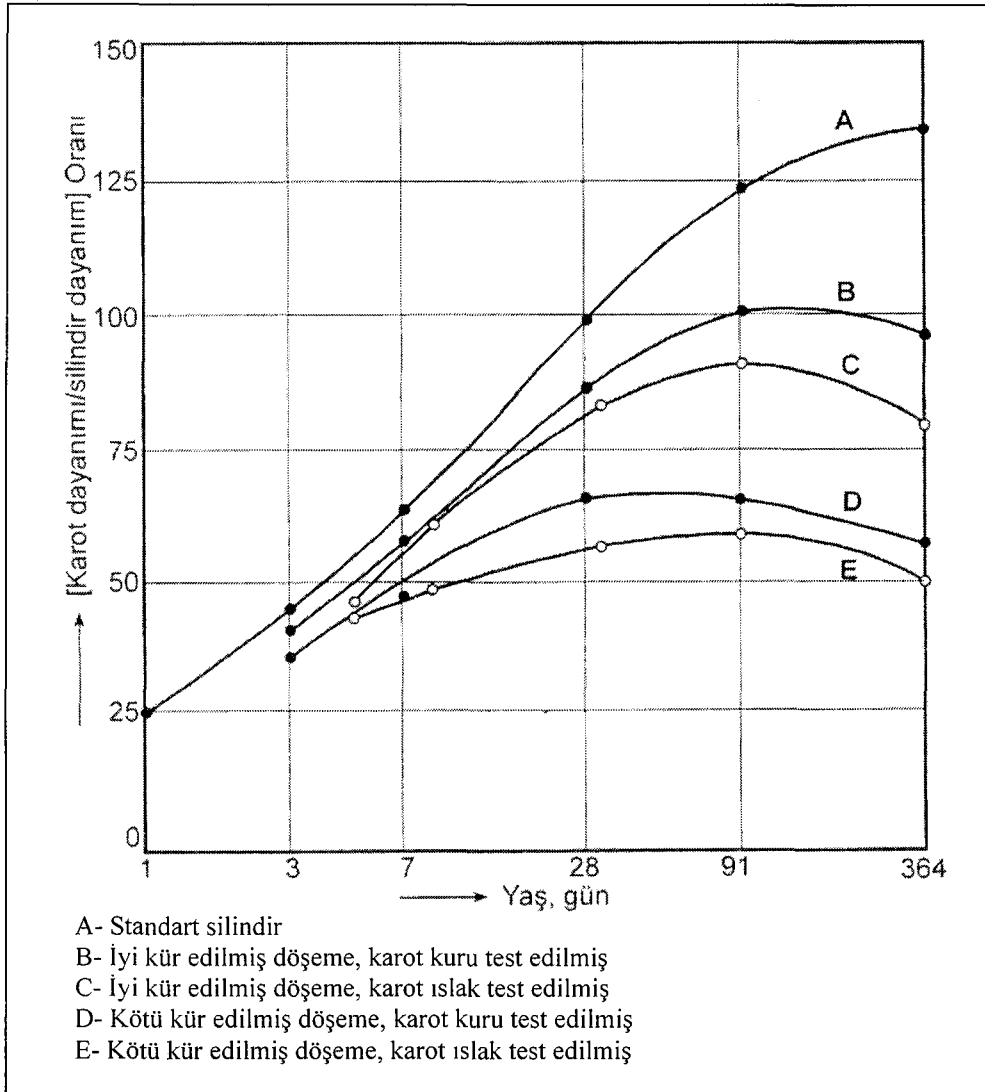
h : donatının karot üst tabanından olan uzaklığı

d : karot çapı ve

l : karot yüksekliğidir.

5.2.1.6. Kür süresi ve kür koşullarının etkisi

Beton yapılardan kesilerek çıkarılan karot numunelerinin basınç dayanımları kür süresi ve kür koşullarına göre farklılıklar sergilemektedir. Şekil 5.3 değişik ortamlarda ve sürelerde kür edilmiş yapı elemanlarından alınan karot numunelerinin basınç dayanımlarının, 28 günlük standart silindir basınç dayanımına oranlarını özetlemektedir [6].



Şekil 5.3. Kür süresi ve koşullarının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi [6]

Burada, su içinde kür edilen standart silindir numunelerin basınç dayanımlarında sürekli bir artış gözlenmektedir. Standart numunelerin bir yıllık

basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımına oranla, kabaca %30 artmıştır. Ayrıca, 3 aylık bir kürlenme sonunda, tüm karotlara ait basınç dayanımı değerleri, kür koşullarına da bağlı olarak azalma göstermiştir. Basınç dayanımlarında en belirgin azalmaya iyi bir şekilde kür edilmemiş döşemeden kesilerek çıkarılan ve suya doymun halde test edilen karot numunelerinde rastlanmıştır [6].

5.2.1.7. Karot numunelerinin nem durumunun etkisi

Basınç dayanımı testi uygulanan karot numunelerinin nem içerikleri test sonuçlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Suya doymun bir şekilde test edilen karot numunelerinin basınç dayanımları, kuru halde test edilen karotların basınç dayanımlarından %10-15 oranında daha düşük olmaktadır [6]. Türk, ASTM ve İngiliz standartlarına göre karot numuneleri test edilmeden önce bir süre suda bekletilerek suya doymun hale getirilmektedir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından ACI 318-89'da önerilen yöntemde karot numuneleri, numunenin alındığı yapı elemanı kuru durumda bulunuyorsa, kuru durumda ve olduğu gibi test edilmektedir [77].

Bartlett ve MacGregor yaptıkları araştırmada, karot nem durumunun karot dayanımlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, hava-kurusu, suya doymun ve kesildiği durumda test edilen karot numunelerinin dayanımları arasındaki ilişki regresyon analizi ile gerçekleştirilmiştir. Seçilen model ise aşağıdaki gibidir [78];

$$f_{c,dry} = \beta_6 + \beta_7 \left(\frac{l}{d} \right) + \beta_8 f_{c,wet} + \varepsilon \quad (5.10)$$

Burada,

$f_{c,dry}$: hava-kurusu karotların ortalama dayanımı

$f_{c,wet}$: suya doymun karotların ortalama dayanımı

β_6 - β_8 : regresyon yardımıyla belirlenecek bilinmeyen parametreler ve

ε : hata'dır.

Regresyon analizinden elde edilen model aşağıdaki gibidir [78];

$$f_{c,dry} = 1.144 f_{c,wet} \quad (5.11)$$

Burada, regresyon R^2 değeri 0.998 ve regresyonun standart hatası ise 2.31 olarak bulunmuştur. Yüksek R^2 değeri, ıslak ve kuru ortalama karot dayanımlarının güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermiştir.

Regresyon analizinde en iyi uyumu sağlayan hava-kurusu test edilmiş karot dayanımı ile suya doymun halde test edilmiş karot numunenin dayanımı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi çıkmıştır [78];

$$f_{c,ad} = 275 + 1.044 f_{c,wet} \quad (5.12)$$

Burada,

$f_{c,ad}$: hava-kurusu karotların ortalama dayanımı ve

$f_{c,wet}$: suya doymun karotların ortalama dayanımıdır.

Bu regresyon analizinde ise R^2 değeri 0.994 ve standart regresyon hatası ise 1.32 olarak bulunmuştur. Bu analizlerde, sabit olan kısım iptal edilecek olursa, en iyi uyumu sağlayan denklem aşağıdaki gibi olmaktadır [78];

$$f_{c,ad} = 1.090 f_{c,wet} \quad (5.13)$$

Bu analizde de R^2 değeri 0.998 ve standart regresyon hatası 1.50 olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak çalışmada, karot numunesinin nem içeriği karot hacmi boyunca düzgün dağılımlı olarak arttığında, numunenin basınç dayanımında düşme gözlenmektedir. Tersine, nem içeriği uniform olarak azaldığında ise, basınç dayanımı artmaktadır. Ayrıca, çalışmanın sonucunda, ASTM C 42-90'da belirtilen suya doyurma süresi ile ACI 318-89 tarafından belirlenen havada kurutma periyotlarının, karot numunesinin tüm hacmi boyunca, uniform bir nem içeriği için yeterli gelmediği anlaşılmıştır. Bu işlemlerin etkileri nem gradyanı meydana getirmekte ve bu da yapay olarak test sonuçlarını

etkilemektedir. Sonuncusu, en doğru yerinde dayanım değerleri tahminlerinin, nem gradyanı bulunmayan test numunelerinden elde edildiği de gözlenmiştir. Böyle bir numune, hava soğutmalı veya soğutma suyunu karot üzerinden buharlaştırmaya izin veren makineler ile çıkarılabilir. Karot üzerindeki soğutma suyunun buharlaşması için, ASTM C 42-90 ve ACI 318-89 tarafından izin verilen 7 günlük bir havada kurutma işleminde zaman gereğinden fazla uzundur. 7 gün boyunca havada kurutma işlemine tabi tutulan karot numunelerinin dayanımlarının, test edilmeden önce en az 40 saat suda bekletilen numunelerin dayanımlarına oranla, ortalama olarak %14 fazla olduğu gözlenmiştir. Bu değerler 15 ila 90 MPa basınç dayanımına sahip olan betonlar için geçerli olup, başka bir beton karışımı için, genel ortalama değerlerden farklılıklar gösterebilir [78].

5.2.2. Karot testleri sonuçlarının değerlendirilmesi

Karot dayanımları, standart silindir veya küp dayanımları şekline dönüştürüldüğünde, betonun yerinde dayanımını en iyi şekilde temsil edebilmektedir. Karot dayanımları, betonun potansiyel dayanımının tayin edilmesi için kullanılan standart test numunelerinin dayanımlarına eşitlenmemelidir. Aslında, karot numunelerinin dayanımları yukarıda bahsedilen bir çok unsur tarafından etkilendiği için, test sonuçlarını da kolay bir şekilde yorumlamak ve değerlendirmek mümkün değildir. Birçok çalışmaya göre, çok iyi bir şekilde yerleştirilmiş ve kür edilmiş betonlardan alınan karotların dayanımı bile standart deney numunelerin dayanımlarının %70-85'i kadardır [1].

Bu görüş ve bulgular ACI 318-89 (Revised 1992) tarafından da desteklenmektedir. ACI 318-89 alınan üç karot numunesinin ortalama basınç dayanımının, tasarımda belirtilen dayanım değerinin en az %85'i olması ve herhangi tekil numunenin basınç dayanımının, tasarımda belirtilen beton basınç dayanımı değerinin %75'inden düşük olmaması kaydıyla yeterli olacağını belirtmektedir [1].

Ayrıca, ACI 318-89'a göre, eğer yapı kuru durumda kullanılıyorsa, karot numunesinin de kuru bir şekilde test edilmesi gerektiğini unutmamak gerekir. Böylece, ACI 318-89'a göre test edilen karot numunelerin dayanımlarının TS

(Türk Standardları), ASTM veya BS (İngiliz Standartları) şartlarına göre test edilen karot numunelerinin basınç dayanımlarından daha yüksek çıkabilmektedir.

Betonun yerinde küp veya silindir basınç dayanımı olarak tanımlanan değer, standart numunelerin boyutları cinsinden ifade edilebilen, ancak bu standart numunelerin standart sıkıştırma ve standart kür gibi koşullarını gözetmeyen efektif bir büyüklüktür. Bu büyüklük betonun yerinde dayanımını (in-situ strength) ifade etmek için kullanılmaktadır [6].

Beton Birliği (Concrete Society), 1988, BS 1881'de yeralan kaynağa göre (Greig, 1988), düşey alınmış ve donatı içermeyen, karot numunesinin alındığı betonun, 150 mm küp cinsinden yerinde dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$f_{y,küp} = K_{\lambda} * K_{\delta} * K_s * K_f * f_{\lambda,d} = \frac{2.3}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} f_{\lambda,d} \quad (5.14)$$

Burada,

$f_{y,küp}$: betonun yerinde dayanımı (150 mm küp cinsinden)

K_{λ} : narinlik oranı düzeltme faktörü, $K_{\lambda} = \frac{2}{1 + \frac{1}{\lambda}}$

(Not: buradaki narinlik oranı düzeltme faktörü 100-150 mm çaplı karot numuneleri için geçerlidir. Küçük çaplı karotlara ait düzeltme faktörlerinin normal çaplı karotlara ait düzeltme faktöründen daha küçük olduğu belirtilmektedir.)

K_{δ} : örselenme faktörü, $K_{\delta}=1.06$

Not: Yapı elemanlarından karot alınması halinde, yapı elemanının yükleme geçmişine göre ince çatlakların miktarına bağlı olarak, örselenmenin karot dayanımı üzerinde daha belirgin etkisinin bulunduğu da gözlenmiştir.)

K_s : standart silindir numunede segregasyon (ayrışma) nedeniyle meydana gelen

dayanım azalmasının faktörü, $K_s = \frac{1}{1.15} = 0.869$

K_f : küp/silindir dönüştürme çarpanı, $K_f \cong 1.25$

λ : karot narinlik oranı, $\lambda = \frac{l}{d}$ (l: karot boyu, d: karot çapı)

$f_{\lambda,d}$: λ narinlik oranına sahip ve düşey olarak alınmış karot numunesinin basınç dayanımı

Eğer karot numunesi yatay olarak alınmışsa, bu durumda, betonun 150 mm küp cinsinden yerinde dayanımı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$f_{y,küp} = \frac{2.3}{1.5 + \frac{1}{\lambda}} K_y f_{\lambda,y} \quad (5.15)$$

Burada, (5.15) eşitliğini yazabilmek için, yukarıdaki (5.14) eşitliği, karot alma yönü ile ilgili olan faktör K_y ile çarpılmıştır. Bu faktör, $K_y=1.08$ olarak alınmıştır. Ayrıca, her iki bağıntıda da, karot numunesinin içinde donatı bulunmadığı varsayılarak hesap yapılmış, yani $K_{do}=1.0$ olarak alınmıştır. Eğer betonarme elemanlardan alınan karot numunelerinin içerisinde, donatı parçası veya parçaları bulunuyorsa, yerinde dayanım değerleri ayrıca, donatı faktörü K_{do} ile de çarpılmalıdır. Yazılan son bağıntıdan (5.15) hemen görülebileceği gibi, $\lambda = \frac{l}{d} = 1$ olan yatay alınmış karot numunesinin alındığı betonun yerinde dayanımı 150 mm standart küp numunesinin dayanımına eşit olmaktadır. Bu sonuç, İngiliz beton uygulamalarında, karot numunelerinin narinlik oranlarının (λ) neden 1.0 olarak tercih edildiğini ortaya koymaktadır [6].

Bartlett, çalışmasında, ağırlıklı regresyon analizi ile sağlanan karot dayanımı düzeltme faktörlerini kullanarak hesaplanan yerinde beton dayanımlarının doğruluğunu araştırmıştır. Burada, önce, standart olmayan karot numunelerinden elde edilen dayanım değerleri, düzeltme faktörleriyle çarpılmakta ve standart bir karot numunelerinin dayanımlarına dönüştürülmektedir. Bunun için aşağıdaki model kullanılmıştır [79].

$$f_{c,S} = F_{l/d} * F_{dia} * F_r * f_{c,NS} \quad (5.16)$$

Burada,

$f_{c,S}$: standart karot dayanımı (100 mm çapında ve 200 mm boyunda) (MPa)

$f_{c,NS}$: standart olmayan karot dayanımı (MPa)

$F_{l/d}$: standart olmayan karot numunelerinin boy/çap (l/d) oranlarının, dayanım üzerindeki etksi ile ilgili faktör

F_{dia} : standart olmayan karot numunelerinin çapının, dayanım üzerindeki etksi ile ilgili faktör

F_r : standart olmayan karot numunelerinin içerisinde bulunabilecek donatı parçasının, dayanım üzerindeki etksi ile ilgili faktördür.

Yerinde beton dayanımı da standart karot numunelerinin dayanımından farklılıklar gösterebilir. Çünkü karotun koşulları yapıdaki betonun koşullarından farklıdır. İkinci bir modelleme ile standart karot numunesi dayanımı değerleri, yerinde beton dayanımına çevrilir. Bu modellemenin formülü aşağıdaki gibidir [79].

$$f_{c,ip} = F_{mc} * F_d * f_{c,S} \quad (5.17)$$

Burada,

$f_{c,ip}$: yerinde beton dayanımı

F_{mc} : karot test numunesinin nem durumunun beton dayanımı üzerindeki etkisi ile ilgili faktör

F_d : karot çevresinde ve kenarlarında kesme işlemi sırasında meydana gelen ve özellikle de küçük çaplı karot numunelerinin dayanımlarının etkilediği gözlenen faktördür.

Böylece, tahmin edilen yerinde beton dayanımı $f_{c,ip}$, önce standart olmayan karot numunelerinin dayanımlarının, standart karot numunesi dayanımlarına dönüştürülmesi ve daha sonra da bu standart karot numunelerinin dayanımlarının yerinde beton dayanımlarına çevrilmesiyle elde edilir. Kısaca, bu işlemi bir bağıntı ile özetleyecek olursak [79];

$$f_{c,ip} = F_{mc} * F_d * F_{l/d} * F_{dia} * F_r * f_{c,NS} \quad (5.18)$$

Bu son bağıntı, (5.16) ve (5.17) bağıntılarından elde edilmiştir. Standart olmayan karot numunelerinin dayanımlarının standart karot numunelerinin dayanımlarına dönüştürülebilmesi için kullanılacak düzeltme faktörlerinin değerleri ve doğrulukları Çizelge 5.4’de verilmiştir [79].

Çizelge 5.4. Standart olmayan karotlar için dayanım düzeltme faktörlerinin değerleri ve doğrulukları

Faktör	Ortalama Değer	V (%)
$F_{l/d}$ oranı *		
Suda bekletilmiş **	$1 - [0.117 - 4.3(10^{-4})f_{c,NS} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2]$	$2.5 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
Havada kurutulmuş **	$1 - [0.114 - 4.3(10^{-4})f_{c,NS} \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2]$	$2.5 \left(2 - \frac{l}{d}\right)^2$
F_{dia} : karot çapı		
2-inç (50 mm)	1.06	11.8
6-inç (150 mm)	0.98	1.8
F_r : donatı bulunması		
bir donatı	1.08	2.8
iki donatı	1.13	2.8

* $-4.3(10^{-4})$ sabitinin birimi 1/MPa’dır. Eğer $f_{c,NS}$ psi biriminde ise, bu sabit $-3(10^{-6})$ 1/psi olacaktır

** ASTM C 42-90’da belirtilen standart işlem

Standart karot numunelerinin dayanımlarının eşdeğer yerinde beton dayanımlarına dönüştürülmesi için kullanılacak düzeltme faktörleri ise Çizelge 5.5’de özetlenmektedir [79].

Çizelge 5.5. Standart karot dayanımlarından yerinde beton dayanımının tahmininde kullanılacak faktörlerin değerleri ve doğrulukları

Faktör	Ortalama Değer	V(%)
F_{mc} : karot nem içeriği		
Suda bekletilmiş *	1.09	2.5 **
Havada kurutulmuş *	0.96	2.5 **
F_d : kesme işleminden kaynaklanan hasar	1.06	2.5 **

* ASTM C 42-90’da belirtilen standart işlem

** Tahmin edilen

Son olarak, kesme işlemi sırasında oluşabilecek hasar ile ilgili olan dayanım düzeltme faktörü ise aşağıdaki gibi belirtilmiştir [79];

$$F_d = \left(1 - \frac{0.2265}{d}\right)^{-1} \quad (5.19)$$

Burada,

F_d : karot yüzeyinde kesme işlemi esnasında meydana gelebilecek hasar ile ilgili düzeltme faktörü

d : karot numunesinin inç biriminde çapıdır.

Yapıdaki betonun dayanımını ölçmek için en genel yöntem yapıdan karot numunelerinin kesilip çıkarılmasıdır. Bu yöntem beton kalitesinin tahmin edilmesinde oldukça açık bir yöntem olmasına karşın, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde birçok unsur yeralır [2]. Karotların dayanımı genellikle standart silindir numunelerin dayanımlarından düşüktür. Çünkü sahadaki kür koşulları, nemli odanın kür koşulları kadar elverişli olmayabilir. Karot numunesi ne kadar dikkatli alınırsa alınsın, karot alma işlemi sırasında numunenin bir miktar örselenme olasılığı vardır. Karot dayanımının silindir numunenin dayanımına oranı da sabit bir değer değildir. Beton dayanımı yükseldikçe bu değer azalır. Bu değer, 20 MPa dayanıma sahip betonlar için 1.0'e yakın olup, 60 MPa civarında basınç dayanımına sahip betonlarda 0.7'lere kadar düşebilmektedir. Karot dayanımı, yapıda karotun alındığı yere ve bölgeye göre de değişkenlik gösterebilir. Genellikle, bir yapı elemanının üst yüzeyine yakın noktalardan alınan karot numunelerinin dayanımları, alt noktalardan alınan karot numunelerinin dayanımlarına oranla daha düşüktür. Burada, betonda meydana gelen terlemenin (su salma) ve iri agreganın yerleşmesinin etkilerinden bahsetmek mümkündür. Bu nedenle elde edilen karot dayanımı testi sonuçları dikkatli bir şekilde yorumlanmalıdır.

5.2.3. Küçük karotların kullanımı

İngiliz ve ASTM standartları, karot çapının en büyük agrega tane çapının en az üç katı olması şartının sağlanmasıyla birlikte, en küçük karot çapının 100 mm olmasını tavsiye etmektedir. (Not: ASTM C 42-90 mutlak minimum olarak karot çapı ile maksimum agrega tane boyutu arasındaki oranın 2 olması halini de kabul etmektedir). Ancak yine de, yapısal hasar riskinin yüksek olduğu durumlarda ve ayrıca çelik donatının çok sık olduğu yapı elemanlarında veya görüntü ve estetik açıdan problem yaratacak durumlarda küçük çaplı karot numunelerin kullanılması gereksinimi duyulabilir. Bu gibi durumlarda, bazı standartlar çapı 50 mm'ye kadar olan karotların kullanılmasına izin vermektedir. Bu küçük çaplı karotlar, karot çapının en büyük agrega tane çapına olan oranı konusunda standartların verdiği limit değerleri ihlal etmekte ve agrega ile çimento hamuru arasındaki bağ zedelenmektedir. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre, maksimum agrega tane boyutu 20 mm olan betonlardan alınan 50 mm çaplı karotların basınç dayanımları 100 mm çaplı karotların basınç dayanımlarından yaklaşık % 10 daha düşük bulunmuştur [1].

Genel anlamda düşünüldüğünde ve karot numuneleri basınç dayanımlarının birçok unsur tarafından etkilendiği gözönünde bulundurulduğunda, karot çapının etkisi önemsiz gibi görünmektedir. Ancak, küçük çaplı karotların dayanım değerleri, standart karotların dayanım değerlerine nazaran daha büyük değişkenlik göstermektedir. Karotlarda tipik değişkenlik katsayısı 150 mm ve 50 mm karot çapları için sırasıyla % 3-6 ve % 7-10 arasındadır. Bu nedenle tahmin edilen yerinde dayanımın yeterli derecede doğruluğu açısından, test edilmesi gereken 50 mm çapındaki karot sayısı, aynı doğruluk derecesi için test edilmesi gereken 100 mm çaplı karotların sayısından yaklaşık olarak 3 kat fazladır. Benzer şekilde, eğer karot çapı en büyük agrega tane çapından 3 kat fazla değilse daha fazla sayıda karot numunesinin test edilmesi gerekir [1].

Bungey, çalışmasında, küçük çaplı karotların kullanılmasıyla beton dayanımlarının belirlenmesi üzerinde durmuştur. Bungey çalışmasında 23 farklı karışım kullanmış ve dayanımları 10 ila 82 MPa arasında değişen betonlar üretilmiştir. Hazırlanan beton karışımları ile 100x100x500 mm boyutlarında

prizmalar ve her bir karışım için en az dört adet 100 mm kontrol küp numunesi dökülmüştür. Beton prizmalardan 44 mm nominal çaplı karotlar çıkarılmış ve test edilmiştir. Çalışmanın sonunda, boy/çap oranı etkisinin küçük çaplı karotlarda daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, 20 mm'lik maksimum agrega tane boyutunun kullanıldığı betonlardan alınan karot numuneleri dayanımlarındaki değişkenliğin 10 mm'lik maksimum agrega tane boyutunun kullanıldığı betonlardan alınan karot numuneleri dayanımlarındaki değişkenliğe göre daha fazla olduğu bulunmuş ve bunun nedeninin de, kesilme yüzeyinde meydana gelebilecek hasarlardan kaynaklandığı düşünülmüştür [80].

5.3. Tahribatsız Yöntemler

Standart deney numunelerinin ve yapılardan alınan karot numunelerinin basınç dayanımlarının belirlenebilmesi için, numuneler deney presinde yük uygulanarak kırılmaktadır. Burada, kırılma işleminin uygulanarak basınç dayanımının ölçülmesi yönteminde bazı dezavantajlar vardır. Bunlar; deney sonunda numune kırıldığı için, aynı deney numunesi üzerinde sadece bir test yapılabilmesi, karot alma aletinin ve gerek standart numunelerin gerekse karot numunelerinin kırılması için kullanılan teçhizatın çok pahalı olması ve tahribatlı yöntemlerle yapılan deneylerde, her ne kadar dikkat edilirse edilsin, yapı elemanının zarar görme olasılığının bulunması olarak özetlenebilir [4]. Hatta bazı durumlarda karot alma işlemi yapılamamakta veya yapı elemanı üzerinden çok az sayıda karot alınabilmektedir. Bu da deney sonuçlarının yetersiz olmasına ve elemanın her tarafının test edilememesine neden olur. Ayrıca, belirtilen standart ve tahribatlı yöntemlerle beton dayanımının belirlenmesi işlemi, özel numunelerin hazırlanmasını, taşınmasını ve laboratuarlarda test edilmesini gerektirir. Bu yeni yapılmakta olan bir yapının beton dayanımını gözlemek için iyi bir yol olabilir. Ancak, halihazırda mevcut bir yapıda beton dayanımlarının belirlenmesi için böyle bir yöntemin kullanılması, standart deney numunelerinin doğal olarak elde bulunmamasından dolayı bir takım sıkıntılar yaratabilir [81].

Bu gibi dezavantajlardan dolayı, tahribatlı testlere alternatif teşkil edecek bir çok tahribatsız deney yöntemi bulunmuş ve önerilmiştir [4]. Böylece, betonun

dayanımdan hariç diğer özelliklerini ölçen ve bu özellikleri dayanım ve dayanıklılık (durabilite) ile ilişkilendiren yöntemler geliştirilmiştir. Bu özelliklerden bazıları, sertlik, batma direnci, geri sıçrama değeri, rezonans frekansı ve sesüstü atımların beton içerisinde ilerlemesine izin verme kabiliyetleridir [81]. Tahribatsız deney yöntemleri, adından da anlaşılacağı gibi, deney uygulama esnasında ve sonrasında yapıda herhangi bir hasara neden olmayan ve yapısal davranışı etkilemeyen yöntemlerdir [4,81].

Leshchinsky hasarsız testlerin karot yöntemine göre avantajlarını, bu yöntemlerin, test için gerekli olan ve test öncesi yapılan işlerde işgücü tüketiminde tasarruf sağlaması, yapıya daha az zarar vermesi, karot numunelerinin alınamayacağı kadar ince veya karot numunelerinin alınamayacağı kadar sık donatıya sahip kesitlerde betonun test edilebilmesini sağlaması ve test teçhizatının daha ekonomik olması olarak özetlemiştir. Başarılı bir hasarsız test yöntemi ise, beton yapılara sahada uygulanabilmeli, kolayca taşınabilir ve kurulabilir olmalı ve az bir masraf ile kolayca işletilebilmelidir [81].

Tahribatsız deney yöntemleri, köprü, otoyollar, limanlar ve havaalanları gibi önemli yapıların yaşlanması ve çevresel etkiler nedeniyle zarar görmesinden dolayı, son yıllarda daha çok önem kazanmıştır. Bu yapıların onarımı için ayrılan bütçenin de kısıtlı olması nedeniyle, mevcut yapıların içinde bulunduğu durumun en ekonomik, en hızlı ve en iyi şekilde betimlenmesi gerekmektedir. Bu da araştırmacıları geliştirilmiş tahribatsız tekniklerin incelemeye yönlendirmiştir. Tahribatsız yöntemlerin birincil kazancı, bir bünye içerisindeki anormalliklerin ve düzensizliklerin çeşidinin ve konumunun belirlenmesidir. Donatılı betonda, bu teknikler, kalınlıkların değişimini, donatıların çapları ve konumunu, çatlakları, boşlukları, katmanlaşmayı, zarar görmüş bölgeleri ve nem içeriğini ölçebilir. Genel olarak tahribatsız test yöntemleri, X-ışını ve Gama-ışını radyografisi, bilgisayarlı radyoaktif tomografi, radar ve akustik teknikleridir. Bu tekniklerin hepsi, bazı kısıtlamalarla birlikte, beton üzerinde uygulanabilmektedir [82].

Beton yapıların resimlenmesi, beton homojen bir malzeme olmadığından, önemli fikirler ve ipuçları verir. Ancak, beton içerisinde yer alan malzemelerin değişken tane boyut dağılımına sahip olması ve farklı özelliklerde olması betonun doğru ve net bir şekilde resimlenmesini zorlaştırır. Betonun resimlenmesi,

radyografi, radyoaktif bilgisayar destekli tomografi, kızılötesi (infrared) termografi, radar resimlemesi ve akustik resimleme teknikleri ile gerçekleştirilebilir [82].

Tahribatsız deney yöntemleri yapısal bir problemin incelenmesinde kullanılacaksa, bu tahribatsız yöntemin uygunluğunun da araştırılması gerekir. Çizelge 5.6'da tahribatsız yöntemlerden bazılarının avantajları, dezavantajları ve bazı diğer özellikleri özetlenmiştir [83].

Çizelge 5.6. Tahribatsız testlerin bazı özellikleri

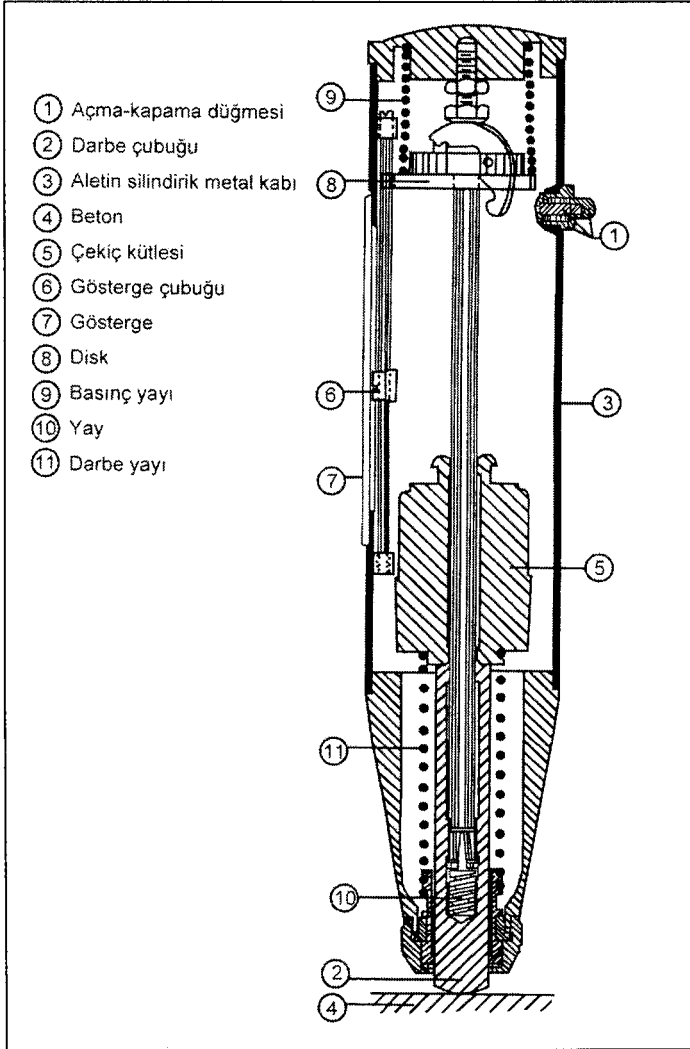
Yöntem	Avantaj	Dezavantaj	Maliyet
Görsel	Hızlıdır, az yetenek gerektirir.	Yüzeyseldir.	Düşük
Sesüstü Tahribatsız (NDT)	Nispeten hızlıdır.	Başlıca elemanlar hakkında yetersiz fikir verir.	Ortalama
Ses (sonik)	Başlıca elemanlar hakkında kullanışlıdır.	Verileri değerlendirme için yetenek ve birikim gerektirir.	Orta derecede yüksek
Radar	Hızlıdır ve iç yapının resmini verebilir.	Veriyi anlamak için yetenek ve birikim gerektirir.	Orta derecede yüksek

Tahribatsız testler arasında en çok kullanılan ve en yaygın olarak bilinenleri, beton test çekici yöntemi ve sesüstü atım hızı yöntemidir [4]. Bu iki test yöntemi birçok standartta da tanımlanmaktadır. Beton çekici ve sesüstü atım hızı testleri bazı durumlarda birlikte de kullanılmakta ve daha iyi sonuçlar elde edilmektedir [1,4,81].

5.3.1. Beton test çekici

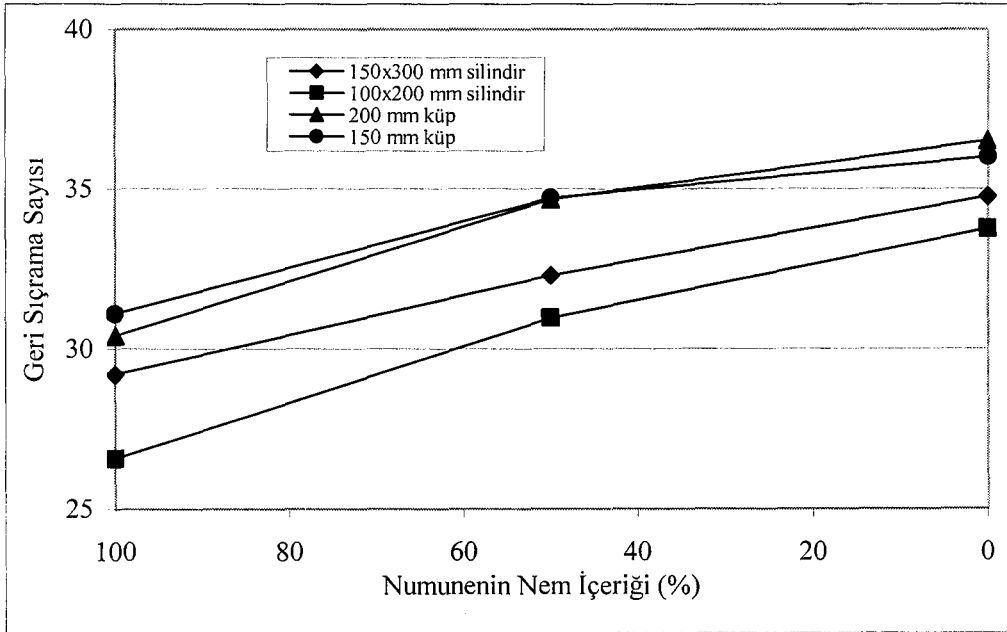
Beton çekici testi en eski tahribatsız testlerden biri olup hala kullanılmaktadır. Bu yöntem 1948 yılında Ernst Schmidt tarafından tasarlanıp icat

edilmiştir ve bu nedenle beton test çekicine Schmidt çekici de denmektedir [1]. Beton test çekici yardımıyla, sertleşmiş betonun yüzey sertliği ölçülmekte ve bu yolla beton dayanımı tahmin edilmektedir [1,10]. Beton test çekicinin uygulanmasında, aletin içerisinde yer alan bir kütle vasıtasıyla sertleşmiş betonun yüzeyine darbe vurulmaktadır. Yaylı bir sistemle çalışan bu kütle, geri sıçramakta ve aletin üzerindeki gösterge vasıtasıyla kütlenin ne kadar sıçradığı sayısal olarak ölçülebilmektedir. Daha sert bir yüzeye sahip olan betonda, doğal olarak, geri sıçrama değerleri de daha yüksek olmaktadır [1]. Beton test çekicinin uygulanması ve bu yolla beton özelliklerinin tahmini TS 3260, ASTM C 805-85 ve BS 1881: Part 202: 1986 standartlarında tanımlanmaktadır [84-86]. Şekil 5.4 ise tipik bir beton çekicinin yapısını göstermektedir [4].



Şekil 5.4. Beton test çekicinin yapısı [4]

Beton çekici testinin sonuçları birçok faktör tarafından etkilenmektedir [1,10]. Öncelikle bu test betondaki bölgesel değişkenliklere hassastır. Örneğin, beton test çekicinin vurulduğu yerin altında büyük bir agreg a parçasının yer alması, anormal olarak yüksek değerlerin okunmasına neden olur. Tersine, çekicin vurulduğu yerde boşluğun bulunması da, nispeten küçük değerler verecektir. Bunlara ek olarak beton tarafından emilen enerji betonun hem dayanımı hem de sertliği ile ilgilidir. Bu nedenle de, geri sıçrama sayısının değeri betonun sertliği ve dayanımı tarafından ortaklaşa belirlenir [1]. Ayrıca şunu da belirtmek gerekir ki; beton çekici yönteminde betonun yüzeyden 30 milimetrelık bir kısmı ancak test edilebilmektedir. Bu nedenle beton dayanımı ile geri sıçrama değerleri ile elde edilen basınç dayanımı tahminleri arasında fark olabilir. Kalıp çeşidi, nem durumu, betonun karbonatlaşma seviyesi de geri sıçrama değerlerini etkiler. Beton nemi arttığında beton çekici ile ölçülen geri sıçrama değerleri azalmaktadır. Şekil 5.5 betonun nem miktarı ile geri sıçrama değerleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir [54].

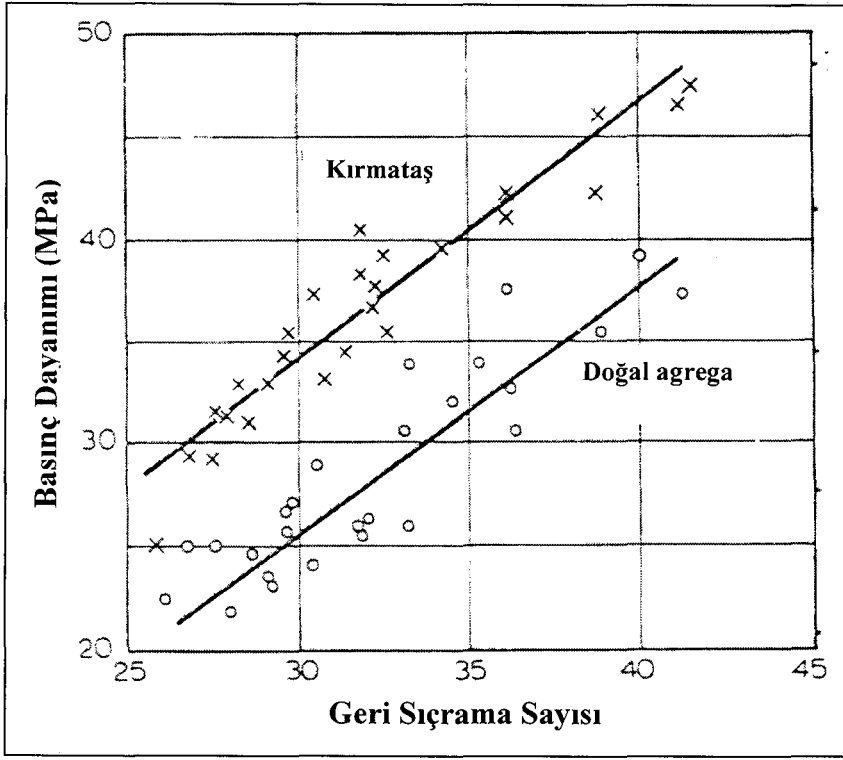


Şekil 5.5. Beton nem içeriğinin geri sıçrama sayıları üzerindeki etkisi [54]

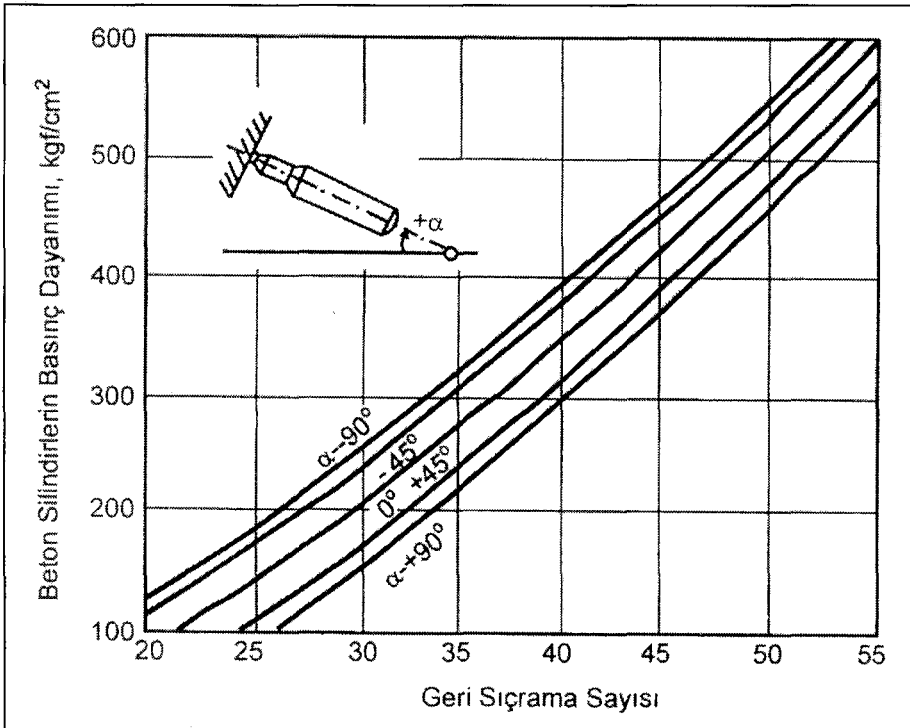
Bu sınırlandırmalarla beraber beton çekici testi beton kalitesinin üniformitesinin ölçülmesinde başarıyla kullanılmaktadır [1,21]. Bazı durumlarda

bu test betonun istenilen dayanıma ulaşp ulaşmadığını belirlemek için de bir çare olabilir. Böylece, kalıp sökümü ve yapının kullanıma açılabilme süreleri daha verimli bir şekilde tahmin edilebilir. Beton çekici testinin başka bir kullanım alanı da, betonun dayanım gelişiminin, donma çözünme etkisine maruz kalıp kalmadığını anlamak içindir. Ancak, böyle bir durumda, beton çekici beton donmuş halde değil de, çözülmüş haldeyken uygulanmalıdır. Çünkü, beton donma-çözülme etkisine maruz kaldığında dayanımı azalmasına rağmen yüksek geri sıçrama değerleri gösterebilir. Zira, ASTM C 805-85, testin uygulanması esnasında hala donmuş halde bulunan betonun, yüksek geri sıçrama değerleri vereceği konusunda uyardır. Beton test çekicinin özel bir kullanım alanı da, aşınma direnci büyük ölçüde yüzey sertliğine bağlı olduğundan, beton döşemelerin, kaldırımların ve yürüme yollarının aşınma direncini tahmin etmektir. Ancak, genel bir bakış açısıyla, beton çekici testi kısıtlı hallerde kullanılabilir ve dayanım testi değildir, dayanım testinin sonuçları yerine geçemez veya kabul edilemez [1]. Ancak yine de eskiden beri beton basınç dayanımı geri sıçrama değerleriyle ilişkilendirilmiştir.

Aşağıda Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenen geri sıçrama değerleri ile basınç dayanımı arasında kurulmuş ilişkileri göstermektedir. Betonda kullanılan agreganın çeşidi ile beton çekicinin uygulama açısı geri sıçrama değerlerini etkilemektedir [1,4].



Şekil 5.6. Geri sıçrama sayısı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki [1]



Şekil 5.7. Geri sıçrama sayısı ile silindir basınç dayanımı arasındaki ilişki [4]

Qasrawi yaptığı çalışmada, beton çekici testinden elde edilen geri sıçrama değerleri ile küp dayanımı arasındaki en uyumlu ilişkiyi şöyle bulmuştur [81].

$$S = 1.353(RN) - 17.393 \quad (5.20)$$

Burada,

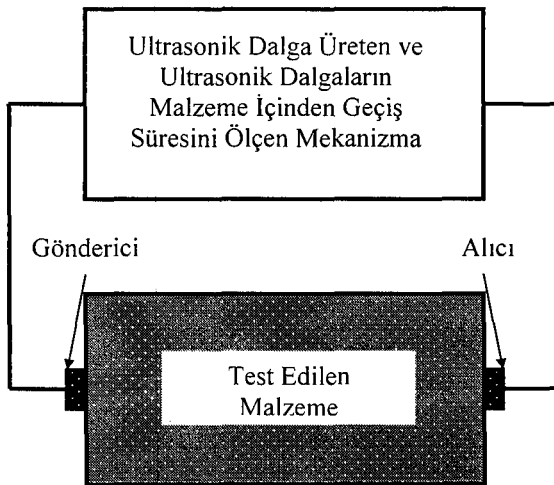
S: beton basınç dayanımı (MPa)

RN: beton test çekici geri sıçrama değeridir.

Bu denklemin regresyon analizinde, R^2 değeri 0.88'dir.

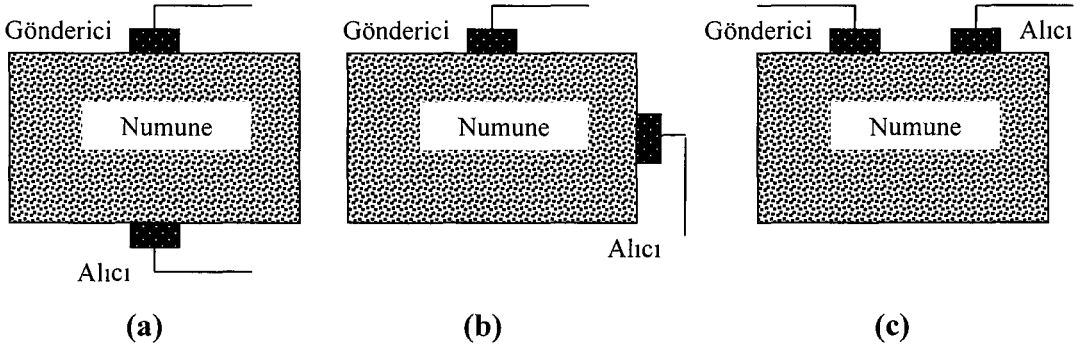
5.3.2. Sesüstü atım hızı yöntemi

Sesüstü atım hızı yönteminde (UPV-Ultrasonic Pulse Velocity), test edilmek istenen betonun bir yüzüne sesüstü atım uygulanarak, beton içerisinde basınç dalgaları oluşturulur. Beton içerisinde ilerleyen dalgalar, betonun diğer yüzüne konulan bir alıcı sayesinde toplanır. Ultrason hızı yönteminde kullanılan test cihazı, ses üstü dalgaların, gönderilen yüzey ile alındığı yüzey arasındaki mesafeyi ne kadar sürede katettiğini ölçmektedir. Böylece, ses üstü dalgaların beton numune içerisinde geçiş hızı hesaplanabilmekte ve buradan da, beton dayanımı ve bazı diğer özellikleri hakkında yorum yapılabilir. Şekil 5.8 sesüstü atım hızı cihazının ve deneyin yapılışının şemasını göstermektedir [1,4].



Şekil 5.8. Sesüstü atım hızı test cihazının mekanizması [4]

Sesüstü atım hızı yönteminde cihazın gönderici ve alıcı uçları, beton yüzeyinde değişik konumlarda yer alabilmektedir. Şekil 5.9 sesüstü atım hızı yönteminin uygulaması esnasında gönderici ve alıcının bulunabileceği konumları göstermektedir. Zorunlu kalmadıkça, daha iyi sonuçlar elde edebilmek için alıcı ve göndericinin Şekil 5.9a'da gösterildiği gibi karşılıklı olmasına dikkat edilmelidir.



Şekil 5.9. Sesüstü atım hızı ölçümlerinde gönderici ve alıcının konumu (a) doğrudan iletim (b) yarı-doğrudan iletim (c) dolaylı iletim [4]

Sesüstü atım hızı, V , homojen, izotropik ve elastik bir kütlede, dinamik elastiklik modülüne, E_d , aşağıda formülde belirtildiği gibi ilişkilendirilebilir [1].

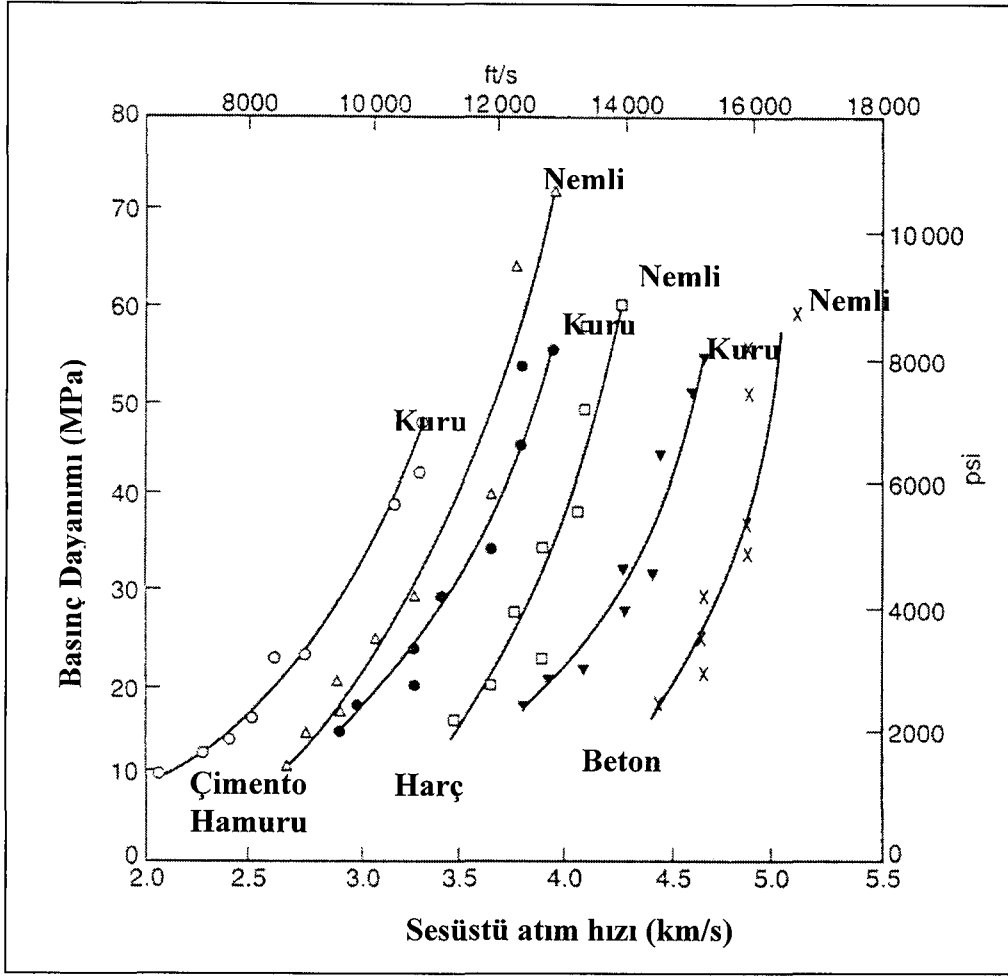
$$V^2 = \frac{E_d(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)} \quad (5.21)$$

Burada, ρ , yoğunluk ve μ , Poisson oranıdır.

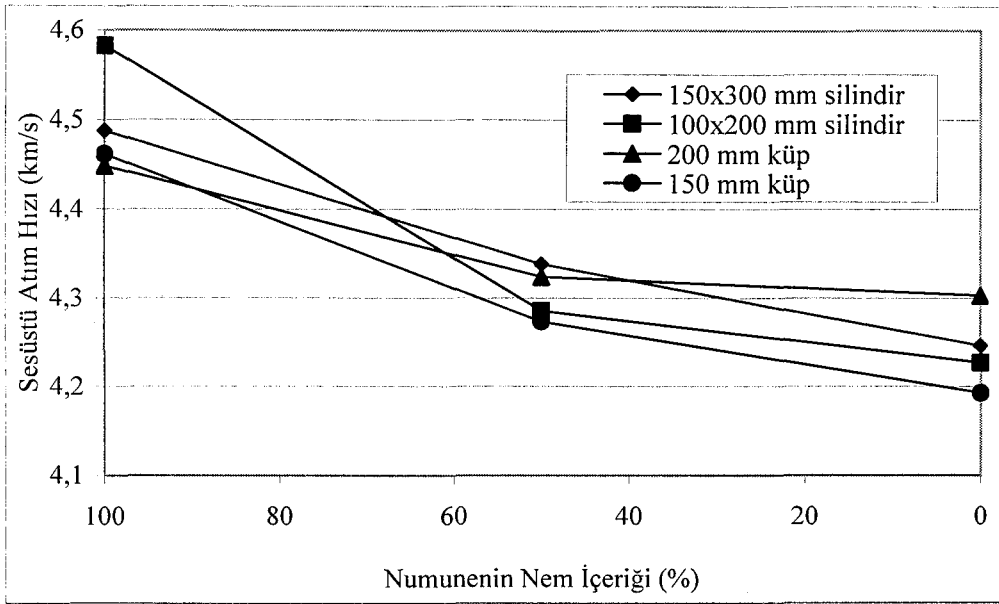
Beton, aslında, (5.21) bağıntısı için gerekli olan fiziksel gerekleri yerine getirememektedir ve bu nedenle de, elastiklik modülünün sesüstü atım hızı yardımıyla belirlenmesi normalde önerilmez. Bunlara ek olarak, betonun Poisson oranı da her zaman doğru ve tam bir şekilde belli değildir ve bilinmez. Şunu da belirtmek gerekir ki; fiziksel olarak sesüstü atım hızı ile beton dayanımı arasında fiziksel bir ilişki yoktur. Hatırlanırsa, elastiklik modülü basınç dayanımına ilişkilendirilse de, bu ilişkinin de fiziksel bir tabanı bulunmaz. Ancak, sesüstü

atım hızı, yukarıdaki formülde belirtildiği gibi, betonun yoğunluğu ile ilişkilendirilebilir. Bu son anlatılan ilişki makuldür ve böylelikle sesüstü atım hızı beton dayanımının tahmininde kullanılabilir [1].

Sesüstü atım hızı testinin çıktısı, uygulanan atımın, sertleşmiş çimento hamuru ve agregası içerisinde geçiş süresinin ölçülmesiyle elde edilir. Agreganın elastiklik modülü oldukça değişkendir ve bu yüzden de betonun içinden geçen sesüstü atımın hızı, agreganın elastiklik modülüne ve karışımındaki agregası içeriğine doğrudan bağlıdır. Sonuç olarak, sesüstü atım hızı ve basınç dayanımı arasında tekil bir ilişki yoktur. Şekil 5.10 çimento hamuru, harç ve beton için farklı ilişkileri göstermektedir. Ancak, belirli bir agregası ve belirli bir çimento içeriği için sesüstü atımın hızı sertleşmiş çimento hamurundaki değişimler tarafından etkilenmektedir. Sesüstü atım hızı yöntemi, bu kısıtlamaların sınırları içerisinde, beton dayanımı tahmininde kullanılabilir. Bu yöntemin kullanılmasındaki bir diğer kısıtlayıcı faktör ise, sesüstü atımların su ile dolu boşluklarda, kuru boşluklara oranla daha hızlı ilerlemesidir [1,54,87]. Bunun sonucunda, Şekil 5.10-11’de de görüleceği gibi, betonun nem durumu sesüstü atım hızını etkilemektedir. Bunlara ek olarak, donatılı betonlarda, özellikle, donatıların sesüstü atım hızının ölçüldüğü doğrultuda uzanıyor olduğu durumlarda, sesüstü atım hızlarının değeri normalden büyük çıkabilmektedir [1].



Şekil 5.10. Çimento hamuru, harç ve beton için sesüstü atım hızı ve basınç dayanımı ilişkisi [1]



Şekil 5.11. Beton numunesi nem durumunun sesüstü atım hızı değerine etkisi [54]

Yukarıda anlatılan eksiklerine rağmen, sesüstü atım hızı testi beton elemanın içyapısı hakkında önemli bilgiler verir. Bu nedenle de, sesüstü atım hızı testi beton içerisinde yeralan çatlak, boşluk ve kusurlar ile donma-çözünme ve yangın neticesinde betonda meydana gelen bozunmaları belirlemede kullanılabilir. Not olarak eklemek gerekirse, betondaki gerilmeler sesüstü atım hızını etkilemez [1]. Ancak gerilmelerin neticesinde meydana gelen kusurlar ve çatlaklar beton içerisinden geçen sesüstü atımların hızını etkileyecektir [88].

Sesüstü atım hızı testi erken yaşlarda, örneğin, beton dökümünden hemen 3 saat sonra, beton dayanımını tahmin etmek amaçlı olarak kullanılabilir. Bu, kalıp sökülmesi ve öngermeli sistemlerde yükün uygulama zamanının belirlenmesi açısından önemlidir. Aynı zamanda, bu yöntem, beton elemanlara buhar kürü uygulamalarında, zaman ve harcamalardan tasarruf sağlar. Ayrıca, sesüstü atım hızı yönteminin eko türü yol kaplamalarının kalınlıklarının belirlenmesinde sıkça kullanılmaktadır [1]. Sesüstü atım hızı yönteminin kayaların bazı özellikleri hakkında da bir fikir verdiği bilinmektedir [89,90].

Sesüstü atım hızı test yöntemi ASTM C 597-83 (Reapproved 1991) ve BS 1881: Part 203: 1986 tarafından tanımlanmıştır [91,92]. Bu yöntem Türk Standartlarında henüz yer almamaktadır. Test katı bir malzeme içerisindeki sesin hızının, malzemenin elastiklik modülü ile yoğunluğunun bir fonksiyonu olması prensibi ile kullanılmaktadır. Dolayısıyla, aşağıdaki bağıntı yazılabilmektedir [81].

$$V = f \sqrt{\left(\frac{gE}{d} \right)} \quad (5.22)$$

Burada,

V: sesüstü atım hızı

E: malzemenin elastiklik modülü

d: malzemenin yoğunluğu

g: yerçekimi ivmesidir.

Yöntem, sesüstü dalgaların beton içerisinde geçiş süresini belirlemekle başlar. Daha sonra, sesüstü hız hesaplanır. Hız bilindiğinde, betonun kalitesi, uniformitesi ve dayanımı hakkında bir fikir edinilmiş olur. Yukarıdaki eşitliğe göre, sesüstü hızı betonun elastiklik modülüne de bağlıdır. Sesüstü atım hızı ile beton elastiklik modülü arasındaki ilişki farklı referanslarda dile getirilmiştir. Öte yandan, elastiklik modülü ile beton dayanımı da ilişkilendirilebilir [81].

Sesüstü atım hızı testinde önce dalgaın beton içerisinde geçtiği zaman ölçülür ve aşağıdaki basit formül yardımıyla hız hesaplanır.

$$V = \frac{L}{T} \quad (5.23)$$

Burada,

V: sesüstü atım hızı, [(m/s) veya (km/s) biriminden]

L: dalgaların katettiği mesafe, [(m) veya (km) biriminden]

T: zaman, [saniye biriminden]

Çizelge 5.7 betonun sesüstü atım hızının fonksiyonu olarak kalitesini göstermektedir [81].

Çizelge 5.7. Sesüstü atım hızına bağlı olarak beton kalitesi

Sesüstü atım hızı (USPV) (m/s)	>4500	3500-4500	3000-3500	2000-3000	<2000
Beton kalitesi	mükemmel	iyi	şüpheli	kötü	Çok kötü

Sesüstü atım hızı ile beton dayanımı arasında tekil bir ilişki yoktur. Testi uygulamak hızlı ve kolaydır. Böylece, bu test hızlı karşılaştırmalarda, başarılı bir saha testi olarak kabul edilebilir [81].

Sesüstü atım hızı testinde ise dayanım ile sesüstü atım hızı arasındaki ilişki şöyle kurulmuştur [81];

$$S = 36.72(USPV) - 129.077 \quad (5.24)$$

Burada,

S: beton basınç dayanımı (MPa)

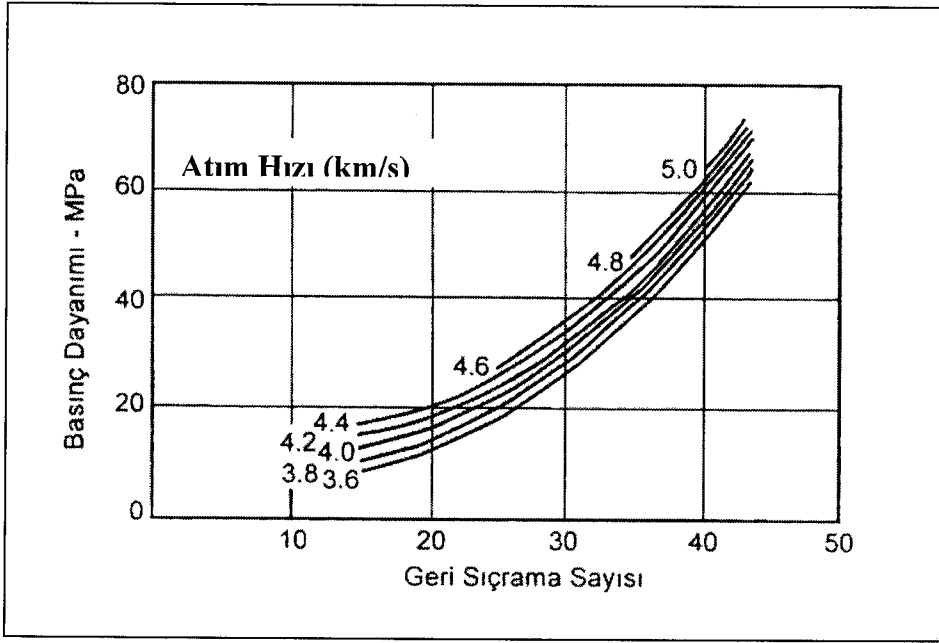
USPV: sesüstü atım hızıdır (km/s).

Regresyon analizinde R^2 değeri 0.9562 olarak hesaplanmıştır.

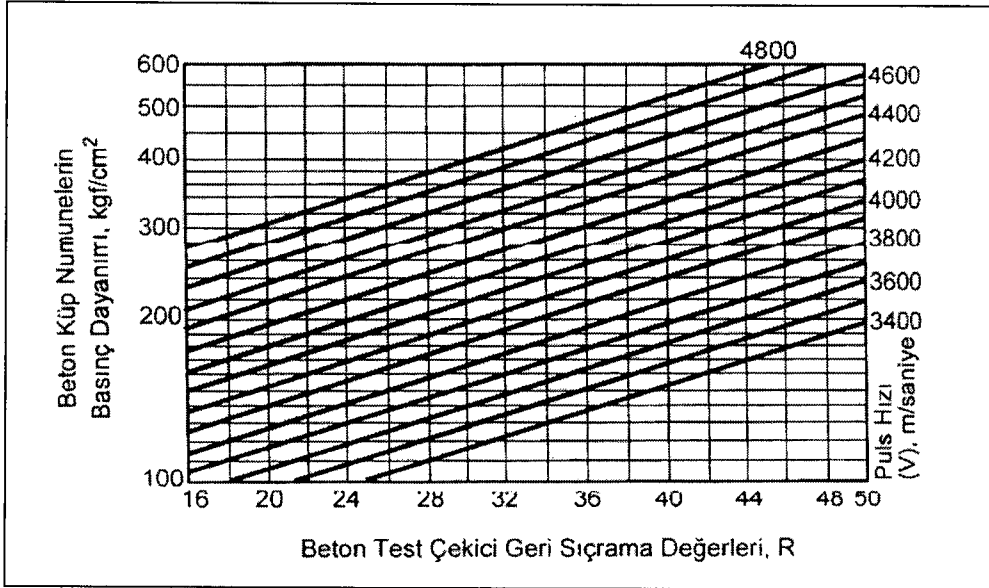
Yaman ve ark. [93], betonda sesüstü atım hızının doğrudan ve dolaylı iletim yolu ile ölçülmesi konusunda araştırma yapmışlardır. Araştırma sonunda, dolaylı iletim ile doğrudan iletim arasında istatistiksel olarak bir fark bulunmadığı belirtilmiştir. Tomsett [94], sesüstü atım hızı ölçümlerinin beton kalitesinin tahmin edilmesindeki pratik kullanımlarına değinmiştir.

5.3.3. Beton çekici ve sesüstü atım hızı yöntemlerinin birlikte kullanılması

Tahribatsız deney yöntemlerinde, bazen, iki ayrı yöntemi aynı anda kullanabilmek mümkündür. Bu, test sonuçları farklı yönde etkilendiğinde avantaj sağlamaktadır. Örneğin, betonun içinde bulunan nem içeriği sesüstü atım hızını artırmakta, ancak beton test çekici ile ölçülen geri sıçrama değerini düşürmektedir. Bu iki yöntemin birlikte kullanılmasıyla elde edilen sonuçlarda hata payı daha düşüktür ve daha iyi sonuçlar elde edilmektedir. Buna örnek, Şekil 5.12’de verilmektedir [1,4]. Şekil 5.13’de ise, sesüstü atım hızı ve beton test çekici sonuçlarının logaritmik bir eksenle gösterimi yer almaktadır [4].



Şekil 5.12. Sesüstü atım hızı ve beton test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılması [1,4]



Şekil 5.13. Sesüstü atım hızı ve beton test çekici yöntemlerinin birlikte kullanılması (logaritmik) [4]

Daha önceden de sözedildiği gibi, pratikte en çok kullanılan tahribatsız yöntemler, beton test çekici ve sesüstü atım hızı yöntemleridir. Qasrawi çalışmasında, beton test çekici ve sesüstü atım hızı yöntemlerini birlikte kullanarak, test sonuçlarının elde olmadığı hallerde betonların daha güvenilir ve

uygun bir şekilde değerlendirilebileceği basit dayanım değerlendirme kartları elde etmeyi amaçlamıştır [81].

Bu çalışmanın sonuçlarından şunlar çıkarılmıştır; beton dayanımlarının tahmininde beton çekici testinin tek başına kullanılması uygun değildir. Test sonuçlarında yüksek değişkenlikler gözlenmiştir. Bu da mühendislik muhakemesini oldukça zorlaştırmaktadır. Beton test çekici ile kıyaslandığında, sesüstü atım hızı yöntemi, beton dayanımlarının tahmin edilmesinde daha etkili ve verimli görünmektedir. Ancak, bu test yönteminin de tek başına kullanılması beton dayanımlarının güvenilir sınırlar içerisinde tahmin edilebilmesine engel olmaktadır. Birleştirilmiş yöntemlerin kullanılması daha uygun ve etkili sonuçlar vermektedir. İki yöntemin birlikte kullanımıyla, %95 tahmin aralığı oldukça dar olarak bulunmuştur. Bu da mühendislik muhakemesini kolaylaştırmaktadır. Qasrawi iki yöntemi birlikte kullanarak basit ve kullanışlı bir grafik elde etmiştir. Qasrawi çalışmasında sesüstü atım hızı ile beton geri sıçrama değerlerini arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi bulmuştur [81];

$$USPV = 0.0329RN + 3.166 \quad (5.25)$$

Burada;

USPV: Sesüstü atım hızı (km/s)

RN: Geri sıçrama değeridir.

Regresyon analizinde R^2 değeri de 0.7358 olarak hesaplanmıştır.

Beton dayanımının beton çekici ve sesüstü atım hızı tekniklerinin birlikte kullanılması yoluyla tahmin edilmesi ile ilgili olarak farklı araştırmacılar tarafından çeşitli formüller ve ilişkiler önerilmiştir. Çizelge 5.8 bu formüllerden beş tanesini göstermektedir [95].

Çizelge 5.8. Beton çekici ve sesüstü atım hızı tekniklerinin birlikte değerlendirildiği formüller [95]

Formül No	Formül	Öneriyi Yapan
1	$f_c = -25.5680.000635 + 1.427(RN)^3 + 8.397(UPV)$	Bellander
2	$f_c = -24.668 + 1.427(RN) + 0.0294(UPV)^4$	Meynink ve Samarin
3	$f_c = -39.570 + 1.532(RN) + 5.061(UPV)$	Tanigawa ve ark.
4	$\log f_c = 3.077\sqrt{\log(RN^3UPV^4)} - 6.680$	Yapı Merkezi
5	$f_c = 0.00153(RN^3UPV^4)^{0.611}$	Arnoğlu ve Köylüoğlu

5.3.4. Diğer tahribatsız yöntemler

Uygulamalarda, sahada kullanılan birçok tahribatsız test tekniği bulunmaktadır ve bu tekniklerden bazıları hala geliştirilme aşamasındadır. Bunlar, gama ışınlarını kullanan radyografi tekniği, boşlukları belirlemek için kullanılan x-ışını difraksiyon tekniği, yoğunluk ölçmek amacıyla kullanılan radyometri tekniği, betonun nem içeriğini tahmin etmek için kullanılan nöron taşınım veya yansıtma tekniği ve boşlukları, çatlakları ve katmanlar arasındaki birleşmeleri belirlemek için kullanılan yüzey penetrasyon radar tekniği olarak özetlenebilir [1]. Bunların dışında sesüstü yöntem, manyetik yöntem ve radyoaktif yöntemler de beton özelliklerini araştırmak için kullanılmaktadır [4]. X-ışını kırınım tekniği ile, betonda çimento ve suyun reaksiyonu sonucu oluşan bazı ürünler göreceli olarak izlenebilmektedir. Bu da beton davranışı ve dayanımı hakkında önemli ipuçları sağlamaktadır [96]. Reaksiyon çıktılarının, yine göreceli olarak gözlenmesinde, DTA (Differential Thermal Analysis-Diferansiyel Isı Analizi) yöntemini de kullanmak mümkündür [97].

Darbeli yansıma (impact echo) tekniğinde, darbe ile geçici ve kısa süren gerilme dalgaları indüklenmekte ve bu gerilme dalgaları da, beton içerisinde bulunan çatlak ve boşluklar tarafından yansıtılmaktadır. Meydana gelen yüzey

deplasmanları darbe uygulanan noktanın etrafında gözlenmekte ve böylece beton içinde yeralan kusurlar belirlenmektedir [1].

Akustik emisyon tekniğinde, nihai dayanımın büyük bir oranını temsil edecek bir gerilme indüklemesiyle, geçici ve kısa süren elastik dalgalar indüklenmekte ve betondaki çatlakların gelişimi izlenmektedir. Bu teknik, aşırı yüklemelere maruz kalmış bir yapının bütünlüğü konusunda bilgi edinmek için çok uygundur [1].

Betonda bağlayıcı malzeme olan çimento hamurunun gözenek yapısı, beton dayanımı ve diğer özellikleri hakkında önemli bilgiler vermektedir. Bir başka deyişle, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki gözeneklerin miktarı, büyüklüğü ve dağılımlarının bilinmesiyle, beton performansı hakkında bir fikir elde edilebilmektedir. Cıva Gözenek Metresi (MIP-Mercury Intrusion Porosimeter) yöntemi çimento hamurundaki gözenek yapısını incelemek için popüler bir yöntemdir. Son yıllarda, bu yöntem beton numuneler üzerinde de uygulanır olmuştur [97,98]. Bu yöntem ayrıca, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış yüksek performanslı betonların (HPC-High Performance Concrete) mekanik özelliklerindeki bozulmaların belirlenmesinde de kullanılmaktadır. Cıva Gözenek Metresi yöntemi ile belirlenen gözenek yapısı, beton özellikleri ile ilişkilendirilmektedir [99] .

Cıva Gözenek Metresi yöntemi ile yapı elemanlarından alınan küçük çaplı karot numunelerin gözenek miktarı ve gözenek boyutları belirlenmek suretiyle, betonun yerinde dayanımı ile gözenek özelliklerini ampirik bir model vasıtasıyla ilişkilendirebilmek ve bu sayede betonun yerinde dayanımı hakkında bir fikir sahibi olabilmek de mümkündür [100].

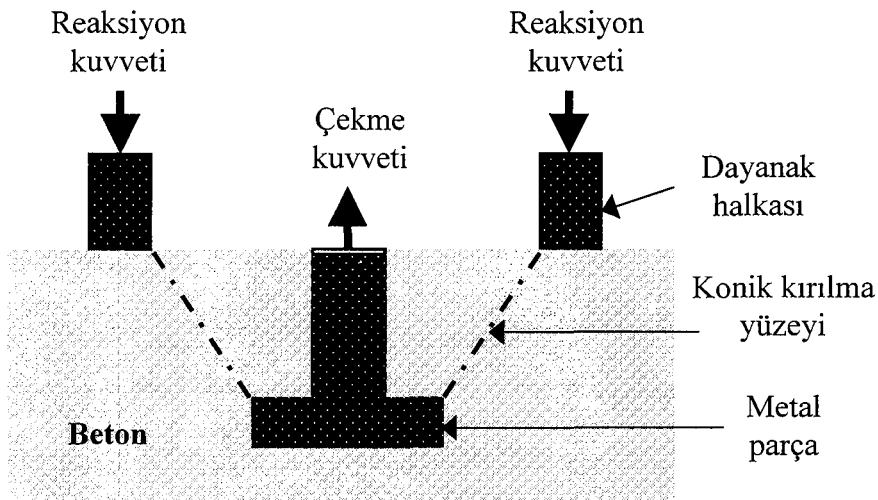
5.4. Yarı-tahribath Yöntemler

Genel olarak, yapılarda kullanılan betona uygulanan testlerin iki ana amacı vardır. Birincisi, önceden inşa edilmiş veya halihazırda inşa edilmekte olan yapılarda kullanılan beton kalitesinin değerlendirilmesi, ikincisi ise, yeni inşa edilmekte olan yapılardaki betonların dayanım gelişimlerinin sürekli olarak izlenmesidir. Son zamanlarda, hasarlı test yöntemlerinden biri olan karot alma

yönteminde yeralan karotların yapı elemanlarından kesilerek çıkarılması, hazırlanması ve test edilmesi ile ilişkili zaman kaybının ve yapı elemanına verilen hasarın önlenmesi amacıyla birçok yeni test tekniği önerilmiştir. Çekip çıkarma, çekip koparma, batma direnci, kırıp koparma testleri yapı elemanlarına ve yapısal davranışa nispeten daha az zarar veren ve bu nedenle de yarı-tahribatlı olarak adlandırılan testlerdir. Bu testlerin uygulanmasından sonra meydana gelen hasar kısa bir sürede ve kolaylıkla düzeltilebilmektedir [10].

5.4.1. Çekip çıkarma testi

Çekip çıkarma yöntemi (pull out) yerinde beton dayanımlarının belirlenmesi için hasarsız bir yöntem olarak ilk kez bir Rus inşaat mühendisi Skramatajev tarafından 1938 yılında önerilmiştir. Burada hasarsız sıfatını kazandıran şey, deney sonucunda yerel bir hasar olması ve bu kadar küçük bir hasarın yapısal davranışı etkilemeyeşidir [22]. Bu yöntemde, beton içerisinde bırakılan şekli ve boyutları belirli metal bir parça çekme kuvveti uygulayan özel bir mekanizma vasıtasıyla çekilerek beton içerisinden çıkarılır. Metal parça beton içerisinden çıkarken koni şeklinde bir beton tabakası ile birlikte çıkmaktadır. Çıkan beton tabakasının koni şeklinde olmasının sebebi metal parçanın geometrik yapısı ile beton yüzeyinde bulunan dayanak halkasıdır. Şekil 5.14 çekip çıkarma testini şematik olarak göstermektedir [10].



Şekil 5.14 Çekip çıkarma testi uygulamasının şematik anlatımı [1,10]

Belirtilen geometri için testler sonucunda ölçülen çekip çıkarma kuvvetleri beton basınç dayanımı ile ilişkilendirilir. Bu ilişki tamamen deneyseldir ve fiziksel anlamdan yoksundur. Çünkü kırılma yüzeyindeki gerilmeler sistemi, testin uygulama esnasında üç boyutlu bir şekilde oluşmaktadır. Konik yüzey boyunca çapsal ve dairesel çekme kuvvetleri ile basınç gerilmeleri aynı anda meydana gelir. Sonuç olarak, çekip çıkarma kuvvetleri Newton veya kgf cinsinden ölçülür. Çekip çıkarma deneyi ASTM C 900-87 (Reapproved 1993) ve BS 1881: Part 207: 1992 standartlarında tanımlanmıştır [101,102]. Bu yöntem Türk Standartlarında yer almamaktadır.

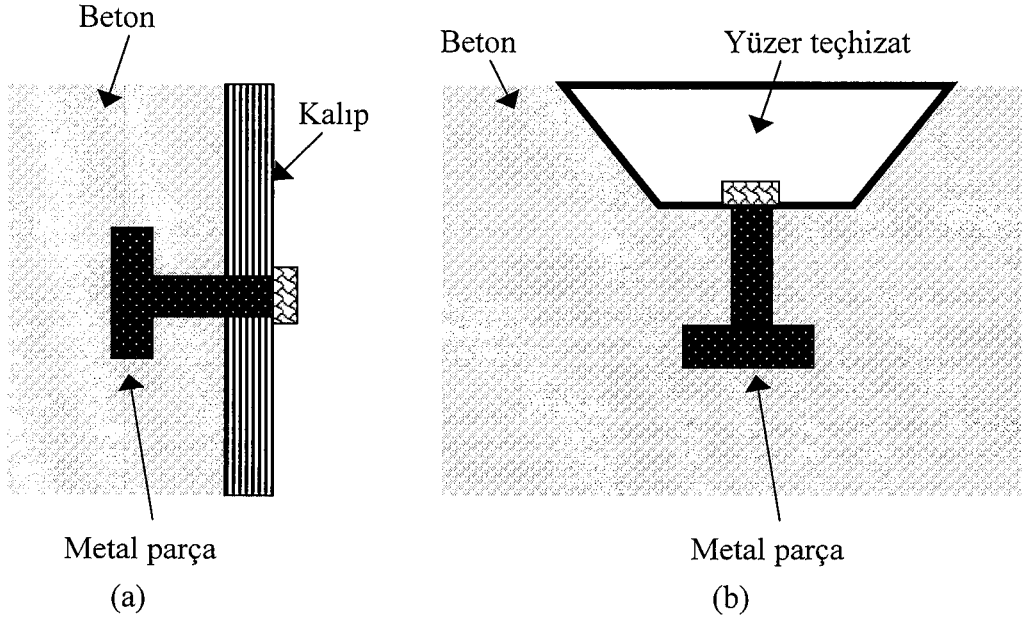
Malhotra'ya göre, çekip çıkarma testleri tahribatsız testlerden olan beton çekici testine ve yarı tahribatlı testlerden olan batma direnci testlerine göre daha üstündür. Çünkü bu testlerde daha derin ve daha büyük hacimde bir beton kütlesi test edilmektedir. Öte yandan, test sonrasında bir miktar onarım gerekmektedir. Ancak, eğer test betonun istenilen dayanım değerine ulaşmış ve ulaşmadığını kontrol etmek maksatlı yapılıyorsa, gerekli olan yük metal parçayı çekip çıkarana kadar uygulanmayabilir [1].

Çekip çıkarma testlerinin en önemli ayrıcalığı, basınç dayanımı ile olan korelasyonlarının göreceli olarak çimentonun çeşidine, hafif agrega olmaması kaydıyla agreganın çeşidine, boyutuna ve karışım içindeki oranına daha az bağımlı olmasıdır. Bu nedenle, çekip çıkarma testleri içeriği bilinmeyen betonların dayanımlarının tahmin edilmesi konusunda kısmen daha kullanışlıdır. Çekip çıkarma testinin Lok testi Capo testi ve içsel kırılma testi adı verilen değişik versiyonları mevcuttur [10].

5.4.1.1. Lok testi (döküm esnasında)

Lok testi kullanılan en genel çekip çıkarma testidir. Bu yöntem Danimarka Teknik Üniversitesi'nde 1960'ların sonlarında geliştirilmiştir. Lok testinde metal parça beton içerisine iki şekilde konulabilir. Metal parçayı beton içerisinde bırakmanın en kolay yolu parçayı beton dökümünden önce kalıba bir cıvata vasıtasıyla monte etmektir. Metal parçayı kalıp içerisine illeştirmenin mümkün

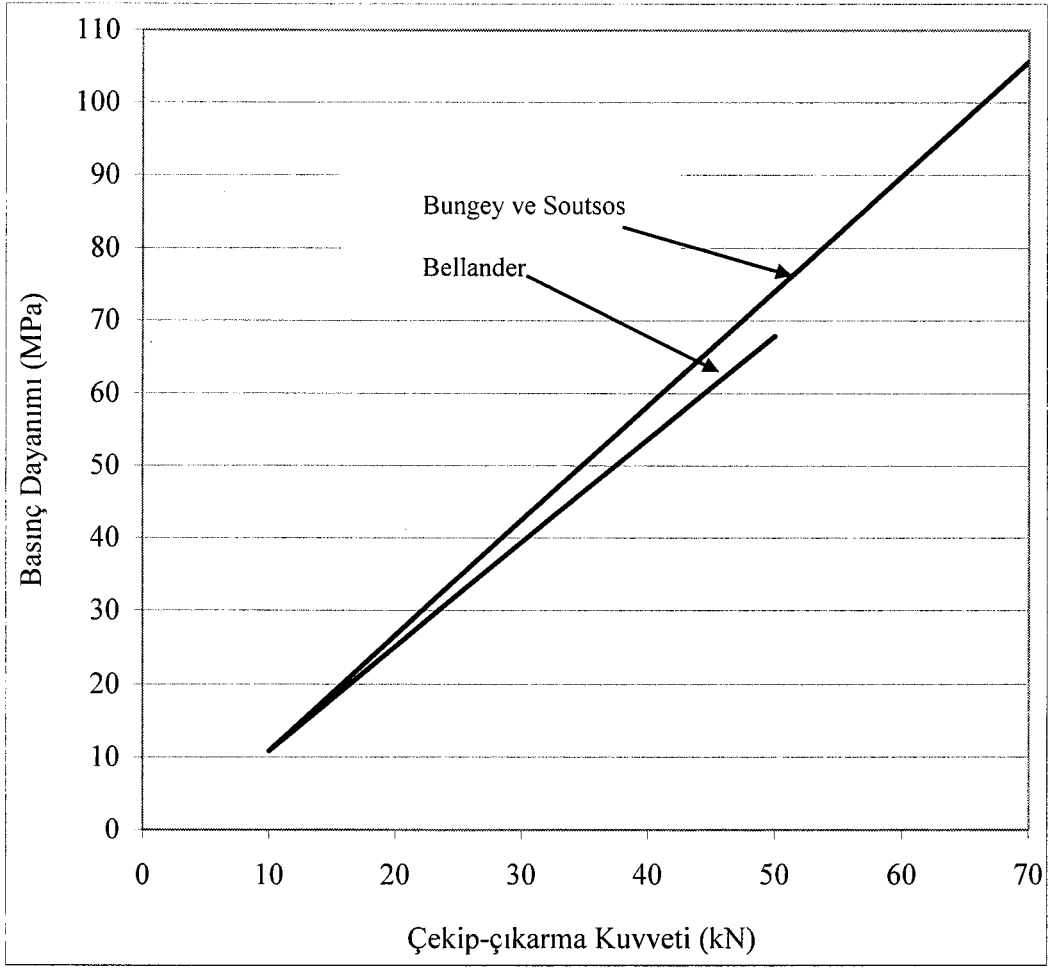
olmadığı durumlarda yüzer bir plastik teçhizat yardımıyla metal parça yüzeyden beton içerisine konulur. Şekil 5.15 bu iki farklı yöntemi göstermektedir [21].



Şekil 5.15. Çekip-çıkarma testinde metal parçanın iki farklı şekilde yerleştirilmesi [21]

Lok testinin en büyük avantajı basınç dayanımı ve çekip çıkarma kuvveti arasındaki ilişkinin, özellikle 38 milimetreden daha küçük maksimum tane boyutuna sahip ve doğal agregadan oluşmuş beton karışımları için, karışım karakteristiklerinden ve betona uygulanan kür rejiminden bağımsız olmasıdır. Lok testindeki en önemli kısıtlama, metal parçaların konumunun beton dökümü öncesinde planlanması ve bu metal parçaların beton dökümünden önce kalıba monte edilmesi veya en geç beton dökümü esnasında yüzer bir teçhizat yardımıyla beton içerisine bırakılması gerekmektedir. Ayrıca, donatı demirleri ile test sonucunda oluşan konik kırılma yüzeyi kesişmemelidir. Bu problem yüzer teçhizatların kullanılmasıyla bir nebze çözülmektedir. Lok testi, The Great Belt Link (Danimarka), the Trinity Square Head Office, The college Park Phase II Building (Kanada), ve European Concrete Building Project (İngiltere) projelerinde başarıyla kullanılmıştır [21].

Aşağıda Şekil 5.16 çeşitli araştırmacılar tarafından belirlenen basınç dayanımı ile çekip çıkarma kuvvetleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir [1,10].

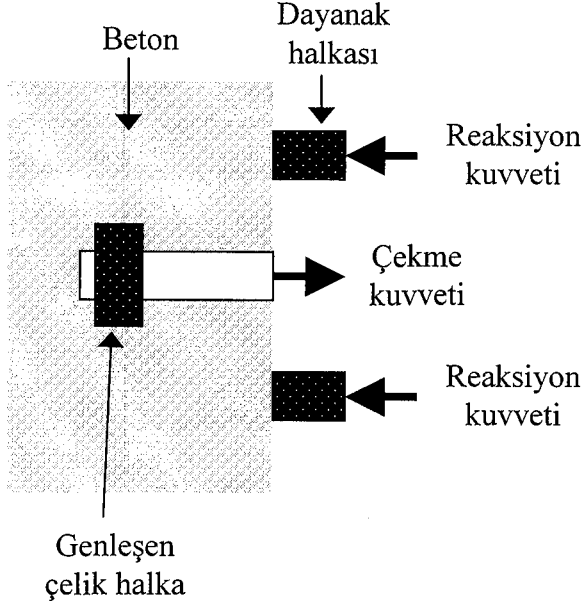


Şekil 5.16. Çekip-çıkarma kuvveti ile basınç dayanımı arasındaki ilişki [1,10]

5.4.1.2. Capo testi (delik delinerek)

Bu test, Lok testinin bir versiyonu olarak geliştirilmiştir. Capo testinin en önemli özelliği mevcut yapılar üzerinde uygulanabilmesidir. Testin uygulanışı Lok testinde anlatıldığı gibidir. Ancak, Capo testinde metal parça beton içerisine delik açılarak yerleştirilir. Delik içerisinde bulunan metal parçanın ucundaki halkanın genişmesiyle, Lok testindeki konfigürasyon aynen elde edilir. Metal parça çekilerek beton içerisinden çıkarılır ve çekip çıkarma kuvveti beton basınç dayanımı ile ilişkilendirilir [10]. Bu yöntemin en önemli kısıtlaması betonarme yapı elemanlarında bulunan donatı çeliklerinin yerlerinin test uygulanmadan önce belirlenmesi zorunluluğudur. Donatı çeliklerinin yerlerinin belirlenmesiyle hem konik kırılma yüzeyi ile donatı kesiştirilmemiş hem de donatının matkap delici

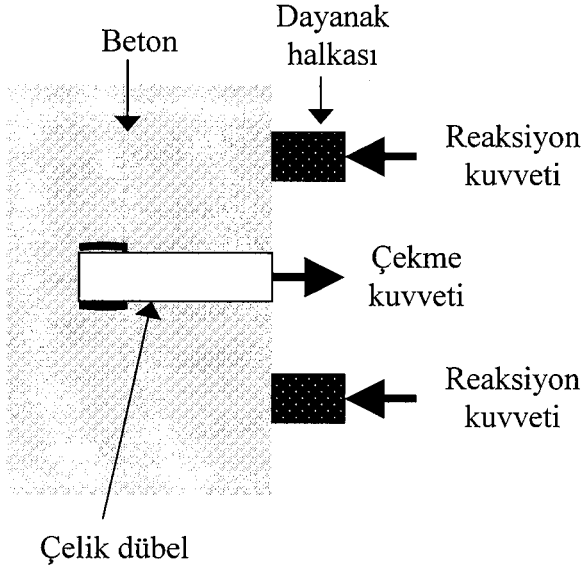
ucuna verebileceği zarar bertaraf edilmiş olur. Şekil 5.17 Capo testini şematik olarak göstermektedir [10,21].



Şekil 5.17. Capo testi uygulamasının şematik gösterimi [10,21]

5.4.1.3. İçsel kırılma testi

İçsel kırılma testi İngiltere’de geliştirilmiştir. Bu yöntemde, 6 mm çapında ve içeriden cıvata ile sıkıldığında çelik dübel kullanılmaktadır. Bu çelik dübel beton içerisine açılan 20 mm derinliğindeki deliğe yerleştirilmekte ve daha sonra içeriden cıvata ile sıkılmaktadır. Ucu genleşen dübele daha sonra Lok ve Capo testlerinde olduğu gibi çekme kuvveti uygulanmakta ve çelik dübel beton içerisinden çekilip çıkarılmaktadır. Deney sonunda dübeli beton içerisinden çekip çıkarmak için gerekli kuvvet basınç dayanımı ile ilişkilendirilmektedir. Bu yöntemde değişkenlik sayısı bir hayli fazladır. Şekil 5.18 içsel kırılma testini göstermektedir [10].



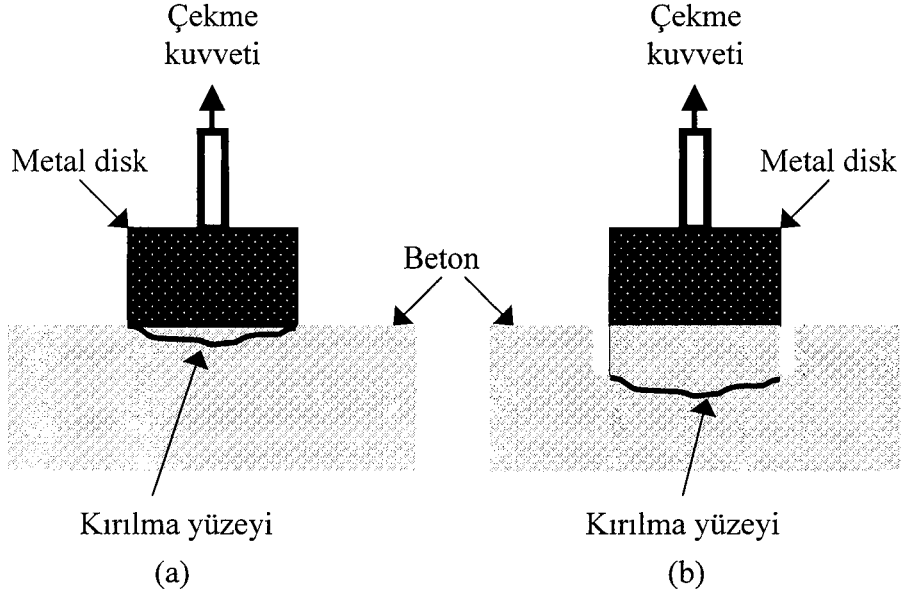
Şekil 5.18. İşsel kırılma testi uygulamasının şematik gösterimi [10]

5.4.2. Çekip koparma testi

Çekip koparma yöntemi yarı tahribatlı test yöntemlerinden biridir. Çekip koparma düşüncesinin, yerinde beton dayanımı testi için ilk modern gelişimi Belfast'ta Queens Üniversitesi'nde 1970'lerde yapılmıştır. Bu da Limpet adı verilen ticari test ekipmanının üretilmesine öncülük etmiştir. Bu yaklaşım tamirat betonlarının bağ dayanımlarının ölçülmesi için popülerdir [23]. Özellikle tamiratlarda yeni malzemenin eski malzeme üzerine iyi yapışıp yapışmadığını anlamak için kullanılabilir. Bu testte, beton yüzeyine yapıştırılan bir metal disk çekip bir miktar beton ile birlikte koparmak için gerekli olan direkt çekme kuvveti ölçülür. Bu yöntem, çekme dayanımının değerinin önemli olduğu durumlar için kısmen uygundur. Ancak yine de ampirik olarak basınç dayanımı ile ilişkilendirilebilir [10].

Bu test yöntemi için iki ayrı yaklaşım vardır. Birinci yaklaşımda, metal disk beton yüzeyi üzerinde kuvvetli bir yapıştırıcı vasıtasıyla yapıştırılır. İkinci yaklaşımda ise beton yüzeyindeki karbonatlaşmanın test sonuçlarına olan etkisini giderebilmek için kısmi bir karot deliği açılır ve metal disk yapıştırılarak ve de beton parçasına çekme kuvveti uygulanarak beton parçası koparılır. Genellikle 50 mm çaplı diskler kullanılır. Elde edilen çekme dayanımını küp basınç dayanımına

çevirmek için ampirik bir korelasyon eğrisi kullanılır. Şekil 5.19. çekip-koparma testinin uygulanışını göstermektedir [21].



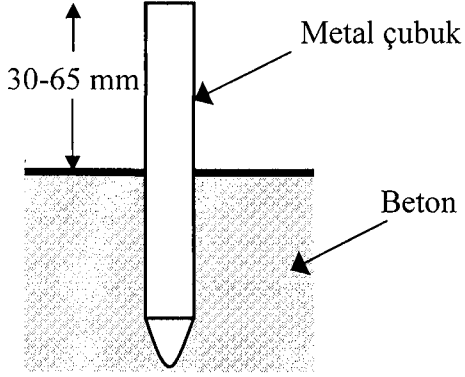
Şekil 5.19. Çekip-koparma testinin uygulanışı [21]

Çekip koparma testinin en önemli avantajı basitliği ve uygulanışının hızlı olmasıdır. Ayrıca önceden bir planlama yapılmasını gerektirmez. Test sonrasında beton yüzeyindeki hasarın fazla olmaması da bir diğer avantajdır. Bu testin en önemli dezavantajı yapışkanların kuvvetini kısa sürede alamamadır. Ancak kimyasallardaki hızlı gelişmeler bu kısıtlamayı ortadan kaldıracaktır. Çekip koparma testinin sonuçları ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon bir çok faktör tarafından etkilenir. Beton içerisinde kullanılan iri agreganın çeşidi çok etkilidir. Ayrıca karbonatlaşma olan betonlarda yüzeyden uygulanan testlerde korelasyon değişik sonuçlar verebilir. Bu nedenle de bu testin kısmi karot delinerek uygulanan çeşidi kullanılırsa herhangi bir derinlikteki beton test edilmiş olacaktır [21].

5.4.3. Batma direnci testi

Batma direnci yöntemi Kuzey Amerika'da geliştirilmiştir ve ilk kullanımı 1960 ortalarına rastlar. Bu yöntemde metal bir iğnenin veya çubuğun güç

uygulayıcı bir sistem kullanılarak beton içerisine sokulması ile girdiği derinlik ölçülür ve deney sonunda çelik çubuğun içeri girdiği miktar ile beton basınç dayanımı ilişkilendirilir. Biraz daha kalın bir çubuğun ticari olarak da kullanıldığı sistem Windsor Probe Test olarak bilinir [10]. Testin uygulanışı şematik olarak Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. Batma direnci testi uygulamasının şematik anlatımı [10]

Bu yöntemin dayandığı prensip standart test durumları için beton basınç dayanımının batma ile ters orantılı olduğudur. Ancak bu yöntem için de teorik bir temel kurulamamıştır. Bunlara ek olarak, dayanım ile batma derinliği arasındaki ilişki büyük oranda karışımda kullanılan agreganın sertliği ile yakından ilgilidir. Çünkü bu yöntemde kaba agregaların taneleri test sırasında kırılmaktadır. Özellikle yumuşak agregalar batma derinliğinin daha fazla olmasına yol açmakla birlikte basınç dayanımını fazla etkilemiyor olabilmektedir [1].

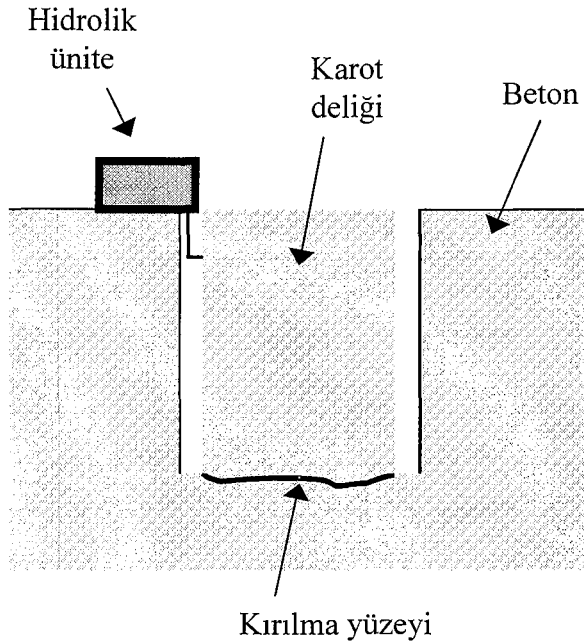
Dolayısıyla, karışımda kullanılan iri agreganın çeşidi batma direnci testinde elde edilen sonuçları önemli ölçüde etkiler. Bu test için başka bir kısıtlayıcı faktör ise betonarme elemanın uygulanan darbeye dayanabilmesidir. Yine de bu yöntem basit olduğu için ve hızlı bir şekilde uygulanabildiği için bazı durumlarda kullanılmaktadır. Ayrıca, sonuçlar yerel değişikliklerden, yüzey özelliklerinden ve betonun nem miktarından etkilenmez. Ancak beton yüzeyinde karbonatlaşma varsa bu deneyin sonuçlarını etkileyebilir [21].

Bu yöntem için farklı araştırmacılar farklı ilişkiler bulmuşlardır. Bu nedenle, dayanım ve batma derinliği arasındaki ilişki her bir beton karışımı için deney

yapılarak kurulmalıdır. Yine de batma direnci testi kalıp sökümü zamanına karar vermek maksatlı olarak kullanılabilir. Beton çekici testinden daha avantajlıdır çünkü beton çekici ile olduğundan daha büyük bir beton derinliği test edilmektedir. Bu yöntem ASTM C 803-90 ve BS 1881 Part:207: 1992 standartları ile tanımlanmıştır [102,103].

5.4.4. Kırıp-koparma testi

Kırıp koparma testi (break off) ilk olarak Norveç'te geliştirilmiştir. Aşağıdaki şekil kırıp koparma testinin uygulanmasının şematik olarak göstermektedir. Beton içerisinde delinen karotun kenarından karot parçası alt kısmından kırılana kadar yanal bir kuvvet uygulanır ve bu kuvvet beton basınç dayanımı ile ilişkilendirilir. Şekil 5.21 bu yöntemin uygulanışını şematik olarak göstermektedir [21]. Kırıp koparma testi ASTM C 1150-90'da tanımlanmaktadır [104].



Şekil 5.21 Kırıp-koparma testi uygulamasının şematik gösterimi

5.5. Betonda Olgunluk Kavramı

Beton karışımında, çimento su ile reaksiyona girmekte ve çimento hamuruna dayanım veren ürünler oluşmaktadır. Hidratasyon olarak da adlandırılan çimento ile su arasındaki reaksiyonun hızı, ortamın, dolayısıyla betonun sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Beton sıcaklığı azaldıkça, hidratasyon daha yavaş ilerlemekte ve beton sıcaklığı belli bir düzeye düştüğünde ise hidratasyon durmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkarak, beton dayanımı, betonun yaşı ve sıcaklığı ile ilişkilendirilebilmektedir. Betondaki olgunluk kavramı, kür süresi (yani betonun yaşı) ile beton sıcaklığının bir fonksiyonu olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki eşitlik ile gösterilmektedir [4].

$$Olgunluk = f(Txt) \quad (5.26)$$

Burada, T sıcaklığı, t ise zamanı göstermektedir.

Taze beton, çimento ve su arasındaki egzotermik kimyasal reaksiyon neticesinde dayanım kazanır. Bu nedenle, betonun herhangi bir yaştaki dayanımı da betonun ısısal geçmişinin bir fonksiyonudur. Bu yöntemin sınırlaması her bir dayanım-olgunluk ilişkisinin beton karışımına ve uygulanan kür rejimine özgü olmasıdır. Yine de olgunluk yöntemi, bu sınırlandırmalara rağmen dayanım gelişimini kontrol etmek, kalıpları açmak, propları çıkarmak ya da öngermeli elemanlarda yük uygulama zamanını ayarlamak gibi nedenlerle sıkça kullanılır. Olgunluk yöntemi beton çekici ve sesüstü atım hız gibi diğer hasarsız test yöntemleri ile birlikte kullanıldığı zaman daha iyi sonuçlar vermektedir [21].

Dolayısıyla, aynı malzemeler ve karışım oranları ile üretilmiş, aynı koşullarda ve aynı süreyle kür edilmiş betonların dayanımlarının da aynı olacağı söylenebilmektedir. Kür süresi ve beton sıcaklığının farklı olduğu durumlarda ise betonların dayanımları da farklı olmaktadır. Böylece, değişik sıcaklıklarda ve değişik sürelerle kür edilen betonların aynı olgunluk seviyesinde bulundukları durumda, dayanımlarının da aynı olacağı kabul edilmektedir. Betonda olgunluk kavramını en iyi ifade eden formül Nurse-Saul tarafından önerilen ve Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından da kullanılan aşağıdaki formüldür [4];

$$M = \Sigma(C + 10)\Delta t \quad (5.27)$$

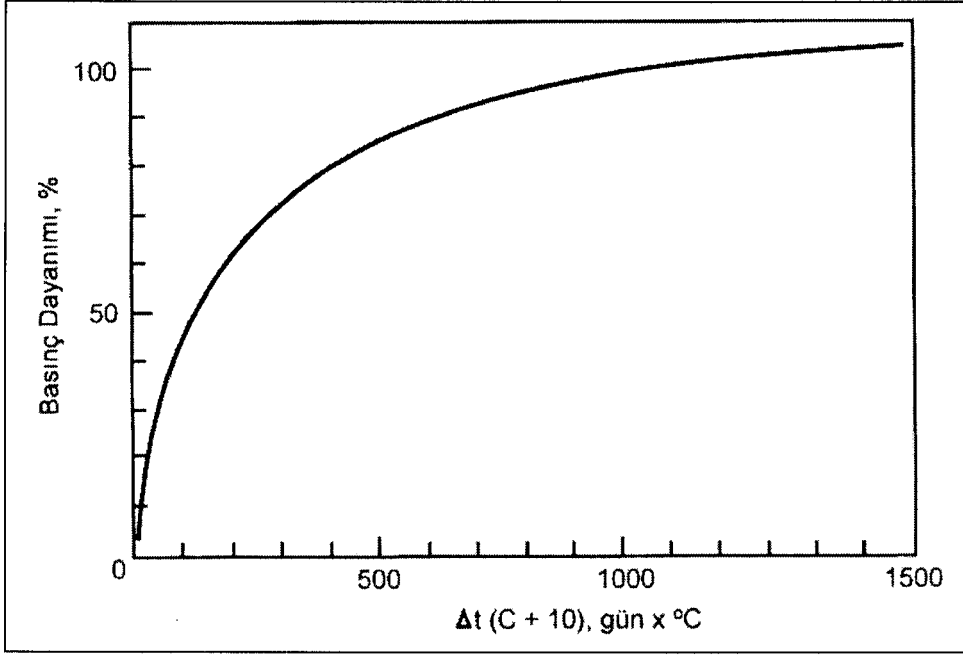
Burada,

M: Olgunluk faktörü, °C gün veya °C saat

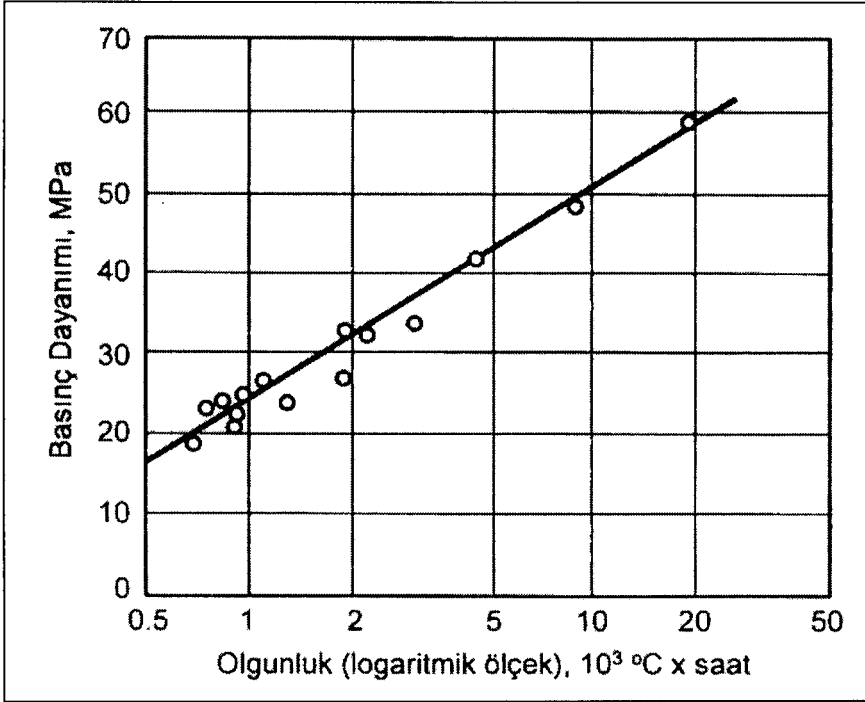
C: Beton sıcaklığı, °C

Δt : C sıcaklığındaki kür süresi, gün veya saat

Sahada, yapılarda beton dayanımının olgunluk kavramı kullanılarak tahmin edildiği sistemde şu yöntem izlenmektedir; öncelikle, yapıda kullanılacak olan betondan, standart silindir veya küp numuneler alınmakta ve bu numuneler laboratuarda standart koşullarda kür edilmektedir. Laboratuarda kürlen numunelerin dayanımları, basınç dayanımı testi yardımıyla belirlenmekte, ayrıca, bu numuneler için (5.27) bağıntısından faydalanılarak olgunluk faktörü hesaplanmaktadır. Böylece, numuneler için olgunluk-dayanım ilişkisi elde edilmektedir. Daha sonra, şantiyede kalıplara yerleştirilen betonun sıcaklığı, kür edildiği süre boyunca standartlarca belirtilen aralıklarla ölçülerek, betonun olgunluk faktörü hesaplanmakta, bu olgunluk faktörüne denk düşen dayanım bulunmakta ve böylece yapıdaki betonun o yaştaki dayanımı tahmin edilmektedir. Şekil 5.22 bir beton karışımı için kurulmuş olgunluk ile beton dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 5.23’de ise bir olgunluk-dayanım ilişkisinin logaritmik eksenle gösterilmiş şekli yer almaktadır [4].



Şekil 5.22. Beton olgunluk faktörü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin kurulması [4]



Şekil 5.23. Basınç dayanımı ile olgunluk arasındaki ilişkinin kurulması (logaritmik) [4]

Olgunluk fonksiyonunun kullanılarak beton dayanımlarının tahmin edilmesi yöntemi ASTM C 1074-87'de tanımlanmıştır [105].

Bu yöntem sahada beton dayanımlarının belirlenmesi ve tahmin edilmesi için genellikle başarıyla uygulanan bir yöntem olmasına rağmen bazı sınırlandırmaların olduğu da unutulmamalıdır. Örneğin, olgunluk hesaplarında, betonun nem durumu hesaba katılmamaktadır. Ayrıca, olgunluk hesaplarında, betondaki hidratasyon ısısının açığa çıkma hızı da gözönünde bulundurulmamıştır. Bu durum, erken yaşlarda hidratasyon nedeni ile çok yüksek sıcaklıkların gözleendiği kütle betonlar için önemli olmaktadır. Erken yaşlarda, beton için kurulan olgunluk-dayanım ilişkisi iyi sonuçlar vermemektedir. İlk zamanlarda kazanılan dayanım, hesaplanan olgunluğa göre daha düşüktür. Olgunluk-dayanım ilişkisi ancak belirli bir süre sonra uyumlu sonuçlar göstermektedir. Tüm bunlara ek olarak, betona ilk zamanlarda uygulanan kür sıcaklığı çok yüksek olduğu takdirde, betonun ileri yaşlardaki dayanımı nispeten daha düşük olmaktadır. O nedenle, erken yaşlarda çok yüksek sıcaklıklarda kürlenlen betonlarda, örneğin yüksek sıcaklıklarda buhar ile kürlenlen prekast (ön-üretimli) betonlarda, uyumlu bir olgunluk-dayanım ilişkisi elde edilememektedir. Bu durum, kür sıcaklıklarının büyük değişiklikler gösterdiği uygulamalar için de geçerlidir. Olgunluk kavramının başarıyla uygulanabildiği betonlar yerleştirildikleri andaki sıcaklıkları 16-27 °C arasında olan betonlar olarak belirtilmektedir [4].

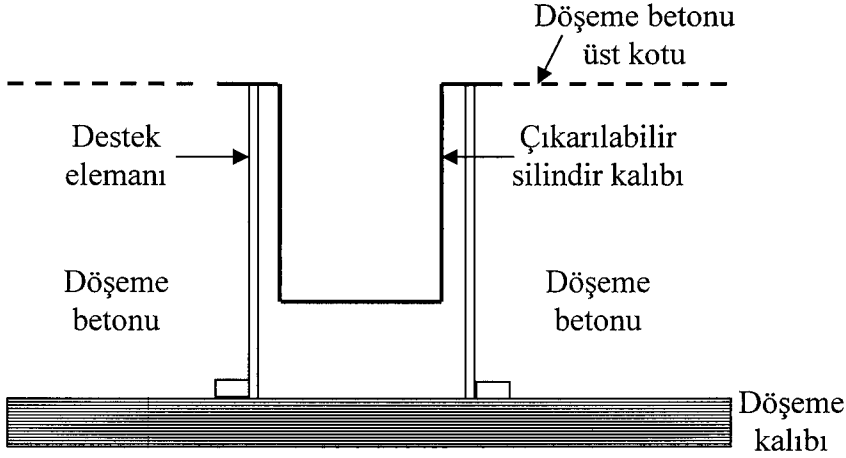
Oluokun ve ark. [106] olgunluk yöntemini kullanarak erken yaşlarda beton dayanımı tahminlerine bir bakış açısı getirmişlerdir. Kjellsen ve Detwiler [107] ise geliştirilmiş olgunluk modeli ile ileri yaşlarda beton dayanımı tahmini üzerinde çalışmışlardır.

5.6. Diğer Yöntemler

5.6.1. Yerinde dökme silindir testi

Standart numunelerin kullanılmasıyla elde edilen basınç dayanımı deneyi sonuçları betonun yapı içerisindeki dayanımını değil, potansiyel dayanımını vermektedir. Yapıdaki betonun dayanımı yapıdan ayrı bir şekilde üretilmiş ve kür edilmiş deney numuneleri vasıtasıyla doğrudan elde edilememektedir. Öte yandan

bazı durumlarda, örneğin kalıp sökümü ve öngermeli sistemlerde öngörme zamanının daha uygun bir şekilde belirlenmesi açısından ya da yapıyı kullanıma bir an önce açmak için yapıdaki beton dayanımının tahmin edilmesi gerekebilir. Bu bilginin elde edilmesinin bir yolu da yerinde dökme silindir numunelerin kullanılmasıdır. Bu deney numunelerinin özel imal edilmiş silindir şeklindeki kalıpları, beton dökümü için hazırlanan kalıba, beton dökümü öncesinde monte edilmektedir [1]. Şekil 5.24 yerinde dökme silindir kalıbının döşeme kalıbı üzerine nasıl monte edildiğini şematik olarak göstermektedir. Bu yöntem ASTM C 873-94 tarafından tanımlanmıştır [108]. Yerinde beton dayanımının bu yöntemle belirlenmesinde bile bir takım kusurlar bulunmaktadır. Örneğin, yerinde dökme silindir kalıbı içine yerleştirilen betonun sıkıştırılması ile gerçek yapıdaki betonun sıkıştırılması farklı olabilmektedir. Sonuç olarak, yerinde dökme silindir numunenin dayanımı bu numunenin civarından kesilerek çıkarılan karot numunelerin dayanımlarına oranla yaklaşık %10 daha büyük olmaktadır [1].



Şekil 5.24. Yerinde dökme silindir testi [1]

5.6.2. Hızlandırılmış kür testi

Betonun basınç dayanımının belirlenmesi için uygulanan standart test yöntemlerinde, beton, bilindiği gibi, genellikle 28 gün sonra test edilmekte ve test edilen betonun basınç dayanımının tasarımda belirtilen değerden daha düşük olmaması gerekmektedir. Betonun standart numuneler ile elde edilen 28 günlük

basınç dayanımı, tasarımda kullanılan basınç dayanımı değerinden düşük çıkacak olursa, betonun istenilen kalitede bir beton olmadığı anlaşılmakta, ancak bu süre içerisinde yapıdaki beton sertleşmiş olduğundan ve yapı inşaatı da belirli bir ilerleme kaydettiğinden, önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Standart numunelerin basınç dayanımı değeri, tasarımda kullanılan basınç dayanımı değerinden çok yüksek çıktığında ise, yapı emniyeti sağlanmış olmakla beraber, betonun ekonomik olmadığı anlaşılmaktadır. Standart deneyler ile alınan sonuçlarla böyle bir israf zamanında düzeltilememektedir [1,4].

Hızlandırılmış kür yöntemleri, betona erken yaşlarda uygulanmakta ve betonun ileride göstereceği basınç dayanımı hakkında bir fikir edinilmektedir [4]. Bir başka deyişle, hızlandırılmış kür uygulanarak numunelerin daha hızlı dayanım kazanmaları sağlanmakta ve numuneler erken yaşlarda test edilmektedir. Hızlandırılmış kür yöntemleri TS 3223, ASTM C 684 ve BS 1881: Part 112: 1983 standartlarında tanımlanmaktadır [109-111]. ASTM standardında, hızlandırılmış kür testi için dört değişik yöntem tarif edilmektedir. Bunlar sırasıyla, sıcak suda kür yöntemi, kaynar suda kür yöntemi, numunelerin kendi hidratasyon ısıyla kür edildiği yöntem ve yüksek sıcaklık ve basınç altında kür yöntemidir. İlk üç yöntem ilgili Türk standardında aynen yer almaktadır [1,4]. Çizelge 5.9 hızlandırılmış kür yöntemlerinin bazı özelliklerini özetlemektedir [1].

Çizelge 5.9. Hızlandırılmış kür yöntemlerinin bazı özellikleri [1]

Test Yöntemi	Kürleme Ortamı	Kür Sıcaklığı (°C)	Hızlandırılmış Kürün Başladığı Yaş	Hızlandırılmış Kürün Süresi (saat)	Test Yaşı (saat)
A: sıcak su	Yalıtım suyu	35	Dökümden hemen sonra	23 ½	24
B: kaynar su	Isıtan su	100	23 saat	3 ½	28 ½
C: kendi hidratasyon ısısı	Hidratasyon ısısı	Değişken	Dökümden hemen sonra	48	49
D: yüksek sıcaklık ve basınç	Dışarıdan ısı ve basınç	149	Dökümden hemen sonra	5	5 ¼

Hızlandırılmış kür yöntemleri ile bulunan basınç dayanımı değerleri, bir kriter olarak betonun denetiminde henüz kullanılmamaktadır. Bu yöntemlerin en büyük avantajı, 1-2 gün gibi kısa sürelerde, beton basınç dayanımı hakkında bir fikir elde edilebilmesidir.

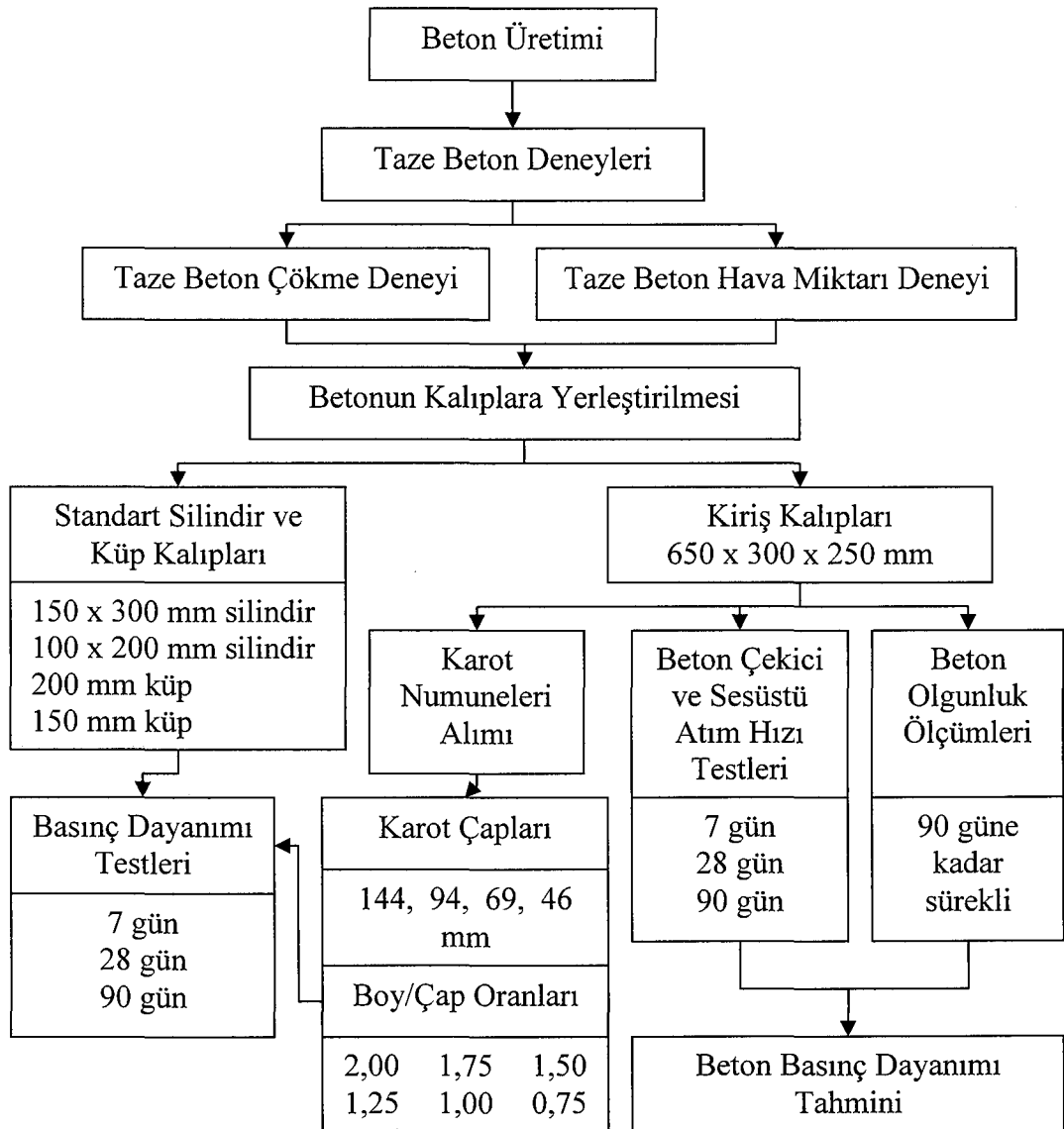
6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada kapsam geniş olduğundan deneysel çalışma iki ana bölüme ayrılmıştır. Birinci bölümde, dere çakılı ve kırmataş olmak üzere iki farklı agrega çeşidi kullanılarak ve aynı zamanda agrega maksimum tane boyutu da değiştirilerek farklı beton karışımları hazırlanmış ve bu beton karışımları ile elde edilen numuneler üzerinde standart silindir ve küp deneyleri, karot deneyleri, beton çekici deneyleri, sesüstü atım hızı deneyleri ve beton olgunluk deneyleri yapılmıştır. Beton üretildikten hemen sonra, bu beton karışımları için, taze beton deneyleri de gerçekleştirilmiş, taze betonun işlenebilirliği hakkında önemli ipuçları veren çökme değeri ile, bazı setleşmiş beton özellikleri hakkında önemli ipuçları veren taze betondaki hava miktarı, ilgili standartlara göre bulunmuştur.

Beton basınç dayanımlarının standart yöntemle belirlendiği beton deney numunelerinin hazırlanmasında, 200 mm ve 150 mm küp kalıplar ile 150x300 mm (150 mm çapında ve 300 mm boyunda) ve 100x200 mm silindir kalıplar kullanılmıştır. Böylece standart testler iki farklı şekilde ve her bir şekil için ikişer farklı boyutta kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karot deneylerinde, karot çapının, karotun boy/çap oranının, agrega çeşidinin ve karışımda kullanılan agreganın maksimum tane boyutunun kiriş beton elemanlardan alınan karot numunelerinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Karot basınç dayanımı deneyleri için, kiriş betonlarından 144, 94, 69 ve 46 mm olmak üzere 4 farklı çapta karot alınmış ve her bir karot çapı için 6 farklı boy/çap oranında karot numuneleri hazırlanarak basınç dayanımı testleri yapılmıştır.

Aynı zamanda, karot numunelerinin alındığı tüm beton karışımları için sesüstü atım hızı ile beton çekici testleri aynı yaşlarda gerçekleştirilmiştir. Seçilen bir beton karışımı için ayrıca, bu testlere ek olarak, olgunluk yöntemi de uygulanmış ve olgunluk faktörü yardımıyla beton basınç dayanımı tahmin edilmiştir. Böylece, birleşik yöntemler arasındaki bağıntılar, farklı agrega çeşidi ile ve farklı maksimum agrega tane boyutu ile üretilen beton karışımlarının her biri için ayrı ayrı belirlenmiştir.

Deneyler her bir karışım için üç farklı beton yaşında gerçekleştirilmiş, 8 değişik beton karışımından elde edilen beton numuneler üzerinde uygulanan standart küp ve silindir dayanımı testleri, karot dayanımı testleri, beton çekici ve sesüstü atım hızı testleri yardımıyla beton dayanımları, betonun 7, 28 ve 90 gün yaşlarında belirlenmiştir. Şekil 6.1 deneysel çalışmanın akım şemasını göstermektedir.



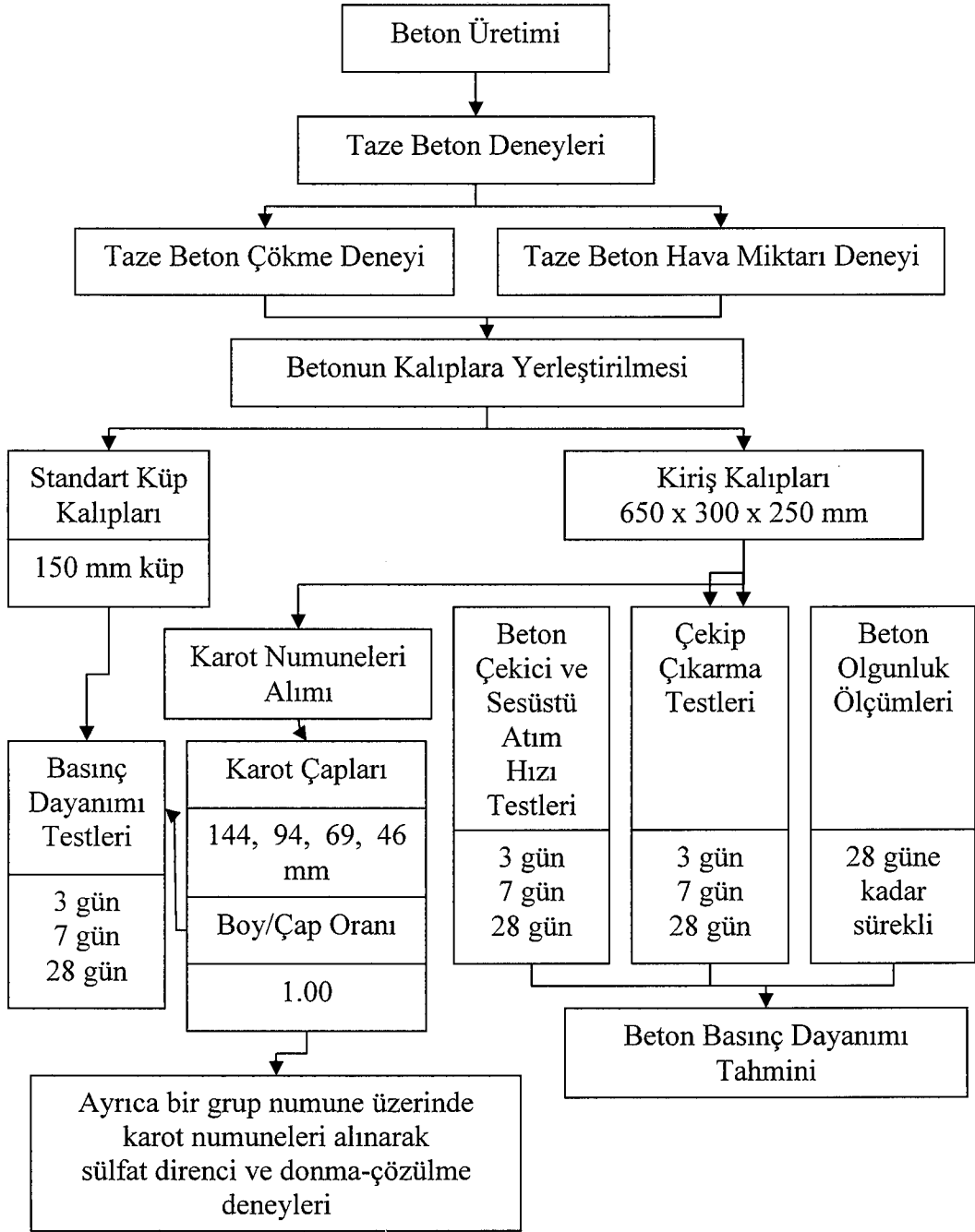
Şekil 6.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünün akım şeması

Deneyisel çalışmanın ikinci bölümünde ise yine farklı beton karışımları hazırlanarak, beton dayanım seviyesinin, beton sıkıştırma derecesinin ve beton kürünün standart, tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı testler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bölümde, standart yöntemle basınç dayanımının belirlenmesi için 150 mm boyutunda küp numuneler kullanılmıştır. Karot numunesi yine 144 mm, 94 mm, 69 mm ve 46 mm olmak üzere 4 farklı çapta alınmış ancak, boy/çap oranı 1 olarak seçilmiştir. Kiriş numuneler üzerinde birinci bölümde olduğu gibi beton çekici ve sesüstü atım hızı deneyleri uygulanmış ayrıca bu tahribatsız deneylere ek olarak yarı-tahribatlı yöntemlerden çekip çıkarma deneyleri de aynı kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde, bir grup beton numunesi üzerinde zararlı çevre ve kür koşullarından sülfat ve donma-çözülme etkisi de incelenmiştir. Zararlı sülfat etkisinin beton numunelerin dayanımı ve deney sonuçları üzerindeki etkisini incelemek için etkili, çok etkili ve aşırı etkili olmak üzere üç farklı sülfat çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltiler sırasıyla 1000, 5000 ve 20000 ppm sülfatlı su hazırlanarak elde edilmiştir. Sülfat deneylerinde sodyum sülfat tuzu (NaSO_4) kullanılmıştır. Sodyum sülfat çözeltilerinin içerisinde bekletilen kiriş numunelerinden karot numuneleri almak suretiyle sülfatın betonda meydana getirdiği etki incelenmiştir. Sülfat çözeltilerinde bekletilen kiriş numunelerinden karot alınarak 90 gün yaşında basınç dayanımı testi yapılmıştır.

Donma-çözülme deneyleri için 150 mm boyutunda küp numuneleri kullanılmıştır. Numuneler 7, 28 ve 90 günlük yaşlarda test edilmiş ve donma-çözülmenin erken, orta ve ileri beton yaşlarındaki etkisi incelenmiştir. Donma-çözülme etkisinin incelenmesi için küp numunelerden 69 mm çapında karot numunesi alınmış (boy/çap=1) ve basınç dayanımı testi uygulanmıştır.

Ayrıca yine deneyisel çalışmanın birinci bölümünde olduğu gibi, seçilen bir beton karışımı üzerinde beton olgunluk ölçümleri yapılmıştır. Şekil 6.2. deneyisel çalışmanın ikinci bölümünün akım şemasını göstermektedir.



Şekil 6.2. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünün akım şeması

6.1. Birinci Bölümde Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Beton Karışımları

Deneysel çalışmanın birinci bölümünde beton karışımlarında, kırmataş ve dere agregası olmak üzere, iki çeşit agregaya kullanılmış ve her bir agregaya çeşidi için dört farklı maksimum agregata tane boyutu ile beton üretilmiştir. Bu bölümdeki

beton karışımlarının adları, karışımlarda kullanılan agrega çeşitleri ve agrega maksimum tane boyutları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüleceği gibi, bu bölümde, 8 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Kısa karışım adlarında kullanılan K harfi, kırmataş agregası kullanılan beton karışımlarını, D harfi ise dere agregası kullanılan betonları belirtmektedir. Her iki çeşit agrega için de maksimum agrega tane boyutu 10 mm, 15 mm, 22 mm ve 30 mm olarak değiştirilmiş ve böylece, her bir ayrı agrega çeşidi için dörder adet karışım hazırlanmıştır.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde kullanılan beton karışımlarının adları, kullanılan agrega çeşitleri ve maksimum agrega tane boyutları

Karışım	Agrega Çeşidi	Maksimum Agreg Tane Boyutu (mm)
Beton K1	Kırmataş	10
Beton K2	Kırmataş	15
Beton K3	Kırmataş	22
Beton K4	Kırmataş	30
Beton D1	Dere Agregası	10
Beton D2	Dere Agregası	15
Beton D3	Dere Agregası	22
Beton D4	Dere Agregası	30

Beton üretimi öncesi, ilgili standartlara göre, agregaların elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyleri yapılmıştır. Agregaların elek analizi, özgül ağırlık ve su emme deneyleri TS 3 530 ve TS EN 1 097-6’da tanımlanmıştır [112,113]. Çizelge 6.2, deneysel çalışmanın birinci bölümünde beton karışımlarında kullanılan agregaların, özgül ağırlık ve su emme miktarı değerlerini özetlemektedir.

Çizelge 6.2. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri

Agrega Çeşidi		Özgül Ağırlık (DYK)	Su Emme (%)
Kırmataş	İri Agreg	2.72	0.5
	İnce Agreg	2.70	1.0
Dere Agregası	İri Agreg	2.65	1.5
	İnce Agreg	2.63	2.0

Ayrıca, beton üretiminden önce, hava koşullarının etkisi ile değişebilen agreg

Beton karışım hesapları yapılırken, iri agreg ve ince agreg oranlarının ve böylece miktarlarının belirlenmesinde, Türk Standartlarında yer alan gradasyon eğrilerinden yararlanılmıştır [115]. Karışım

Çizelge 6.3. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde beton karışım

Karışım	Malzeme Miktarları (kg/m ³)			
	İri Agreg (DYK)	İnce Agreg (DYK)	Çimento	Su
Beton K1	696	1043	356	215
Beton K2	729	1094	331	200
Beton K3	1034	846	315	190
Beton K4	1128	752	315	190
Beton D1	507	1259	356	195
Beton D2	833	994	331	181
Beton D3	1158	706	315	173
Beton D4	1300	565	315	173

Beton karışımlarında, bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çizelge 6.4 deneylerde kullanılan çimentonun bazı özellikleri ile Türk Standardlarında verilen limit değerleri özetlemektedir.

Çizelge 6.4. Deneylerde kullanılan çimentonun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleriyle minerolojik kompozisyonu

Özellik	Değer	Limit (alt)	Limit (üst)
Kızdırma kaybı, %	3.36		4.0
Çözünemeyen kalıntı, %	0.57		1.5
Magnezyum oksit (MgO), %	0.94		5,0
Kükürt trioksit (SO ₃), %	2.52		3.5
Klor, %	0.01		0.1
Özgül yüzey, cm ² /g.	3372	2800	
İlk priz, dakika	124	60	
Son priz, saat:dakika	2:57		10:00
Hacim genleşmesi (Le Chatelier), mm	1.0		10
Minerolojik Kompozisyon			
C ₃ S (3 CaO SiO ₂), %	38.95	-	-
C ₂ S (2 CaO SiO ₂), %	30.55	-	-
C ₃ A (3 CaO Al ₂ O ₃), %	9.91	-	5
C ₄ AF (4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃), %	11.98	-	-

6.2. İkinci Bölümde Beton Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Beton Karışımları

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde beton dayanım seviyesinin, kür koşulları ve sıkıştırma derecesinin bahsedilen tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı deneyler üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu bölümde üretilen betonlarda kırmataş agregası kullanılmış ve agreganın maksimum tane boyutu 22 mm olarak seçilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak yine CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca, akışkanlaştırıcı olarak kahverengi görünümde, yoğunluğu 1.156 g/cm³ ve pH değeri 7.10 olan bir katkı malzemesi de bazı beton karışımları içerisinde yer almıştır. Deneysel çalışmanın bu bölümünde üretilen betonların adları ve bazı özellikleri Çizelge 6.5.'de özetlenmiştir.

Çizelge 6.5. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde kullanılan beton karışımları ve bazı özellikleri

Karışım	Agrega Çeşidi	Maksimum Agreg Tane Boyutu (mm)	Numunelere Uygulanan Kür Yöntemi	Numunelere Uygulanan Sıkıştırma
Beton M1	Kırmataş	22	Su kürü	Vibratörle
Beton M2				
Beton M3				
Beton M4				
Beton SK	Kırmataş	22	Su kürü	Vibratörle
Beton SHK			3 gün su kürü sonra hava kürü	
Beton HK			Hava kürü	
Beton VS	Kırmataş	22	Su kürü	Vibratörle
Beton ŞS				Şişle
Beton HS				Hiç sıkıştırılmamış

Ayrıca zararlı ortam koşullarına maruz bırakılan numunelerin adları ve bazı özellikleri de Çizelge 6.6.'da açıklanmıştır.

Çizelge 6.6. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde zararlı ortam koşullarına maruz bırakılan beton karışımları ve bazı özellikleri

Karışım	Agrega Çeşidi	Maksimum Agreg Tane Boyutu (mm)	Ortam Koşulu	Sudaki SO ₄ Miktarı (ppm*)
Beton ES	Kırmataş	22	Etkili sülfat	1000
Beton ÇES			Çok etkili sülfat	5000
Beton AES			Aşırı etkili sülfat	20000
Beton DÇ			Donma-çözülme	-

ppm*: milyonda kaç kısım (parts per million)

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde de beton karışım hesapları birinci bölümde olduğu gibi yapılmıştır. Bu bölümde üretilen betonların adları ve 1m³

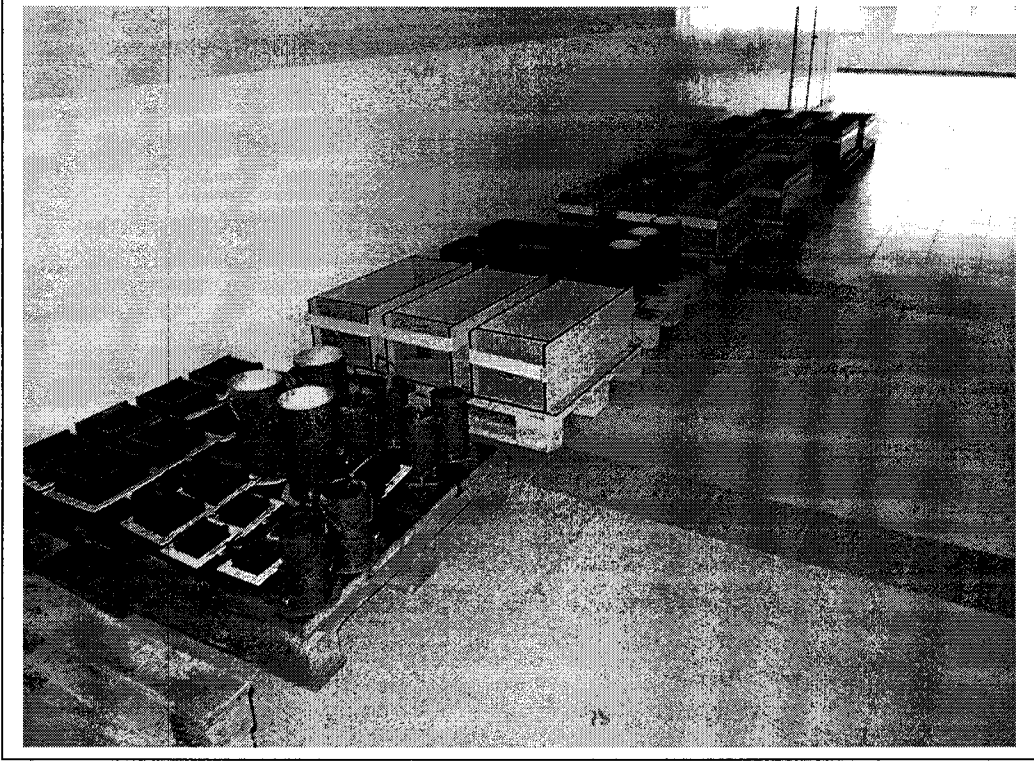
karışımında kullanılan malzemelerin miktarları Çizelge 6.7’de özetlenmiştir. Bu bölümde dökülen betonların çökme değeri 110-140 mm olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 6.7. Deneyisel çalışmanın ikinci bölümünde beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

Karışım	Malzeme Miktarları (kg/m ³)				
	İri Agregası (DYK)	İnce Agregası (DYK)	Çimento	Su	Katkı
Beton M1	1036	877	320	174	3.2
Beton M2	1043	850	360	170	3.6
Beton M3	1048	817	390	172	3.9
Beton M4	1083	640	500	200	6.0
Beton VS	1083	630	500	210	6.0
Beton ŞS	1083	630	500	210	6.0
Beton HS	1083	630	500	210	6.0
Beton SK	1083	630	500	210	6.0
Beton SHK	1083	630	500	210	6.0
Beton HK	1083	630	500	210	6.0
Beton ES	1036	877	320	174	-
Beton ÇES	1036	877	320	174	-
Beton AES	1036	877	320	174	-
Beton DÇ	1036	877	320	174	-

6.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Taze Beton Deneyleri

Beton üretimi, belirlenen karışımlarla, 2 m³ karışım hazırlayabilen otomatik kontrollü mikserde gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan beton karışımları, kısa bir süre içerisinde, daha önceden hazırlanmış olan standart kalıplara ve kiriş kalıplara yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Şekil 6.3-9, beton dökümü öncesi kalıpların hazırlanışını, beton dökümünü ve sıkıştırılmasını göstermektedir.



Şekil 6.3. Kalıpların beton dökümü için hazırlanması



Şekil 6.4. Beton dökümü için kalıpların yağlanması işlemi



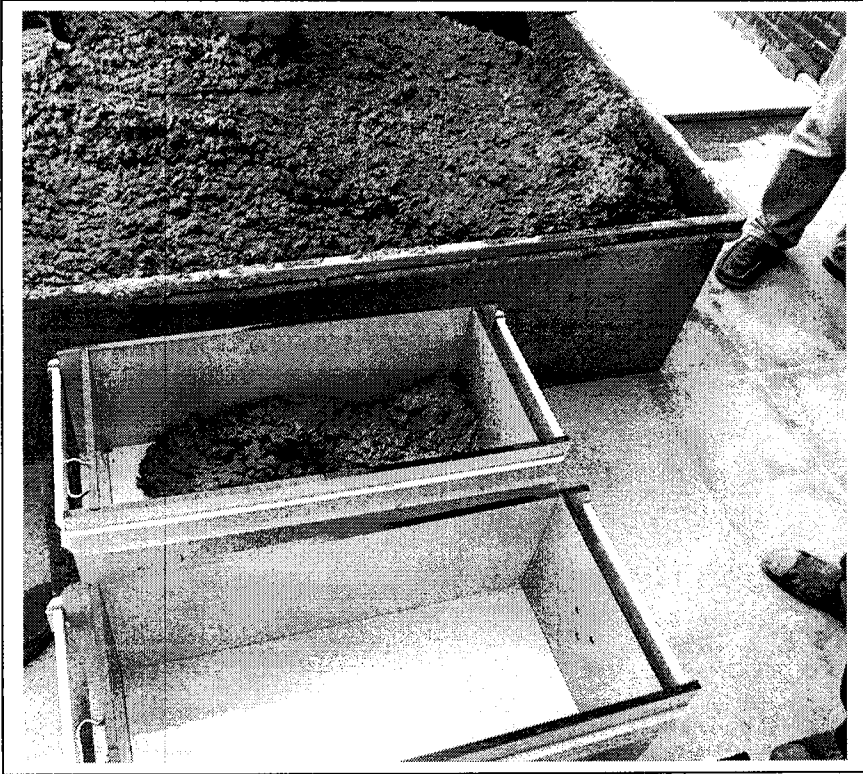
Şekil 6.5. Betonun üretildikten sonra metal hazneye dökülmesi işlemi



Şekil 6.6. Betonun standart deneylerde kullanılan kalıplara yerleştirilmesi işlemi



Şekil 6.7. Standart deney kalıplarına yerleştirilen betonun sıkıştırılması işlemi

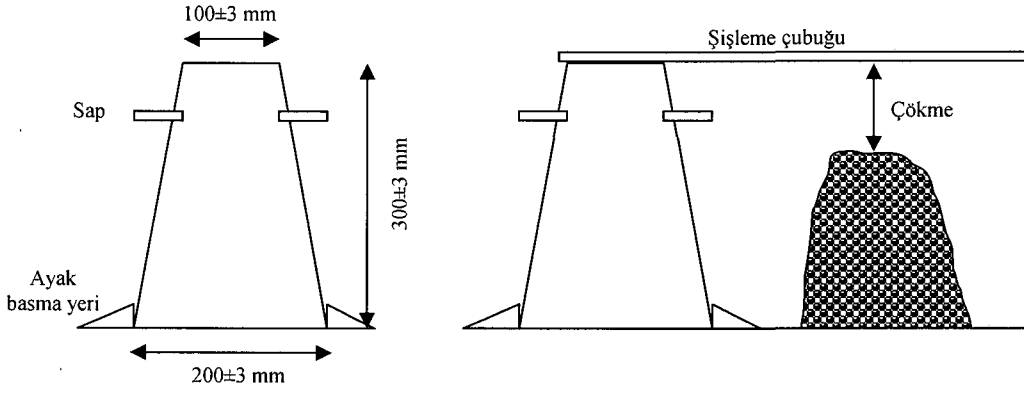


Şekil 6.8. Betonun kiriş kalıplarına yerleştirilmesi işlemi



Şekil 6.9. Kiriş kalıplarına yerleştirilen betonun sıkıştırılması işlemi

Beton üretildikten sonra her bir karışım için taze betonda, çökme ve hava miktarı deneyleri yapılmıştır. Taze betonda çökme deneyi TS 2871’de tanımlanmıştır [116]. Taze beton çökme değerinin belirlendiği deneyde üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm ve boyu 300 mm olan çökme hunisi kullanılır. Beton huni içerisine üç seferde doldurulur ve her seferinde metal bir çubuk vasıtasıyla 25 kez şişlenir. Daha sonra huninin doldurulduğu üst kısmı düzeltilir ve fazla betonlar temizlenir. Huni düzgün bir şekilde yukarıya kaldırılarak betonun aşağıya akması sağlanır. Huni tamamen alındıktan sonra, yayılan betonun üst ucu ile yanında bulunan huninin üst ucu arasındaki mesafe taze betonun çökme değeri olarak ölçülür. Şekil 6.10 taze betonda çökme değeri belirlenmesinde kullanılan huniyi ve işlemlerin sırasını ve Şekil 6.11 ise taze beton çökme deneyi uygulamasını göstermektedir.

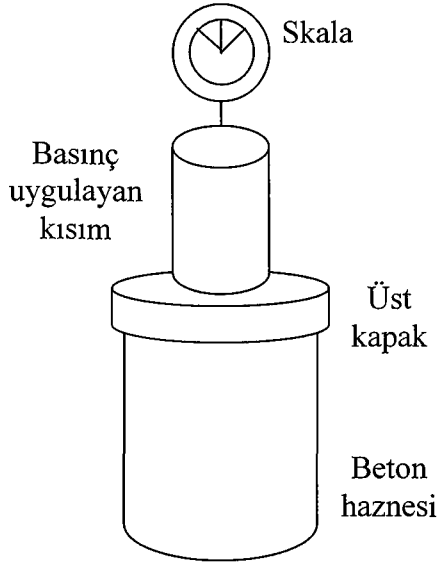


Şekil 6.10. Taze betonda çökme miktarının ölçülmesi

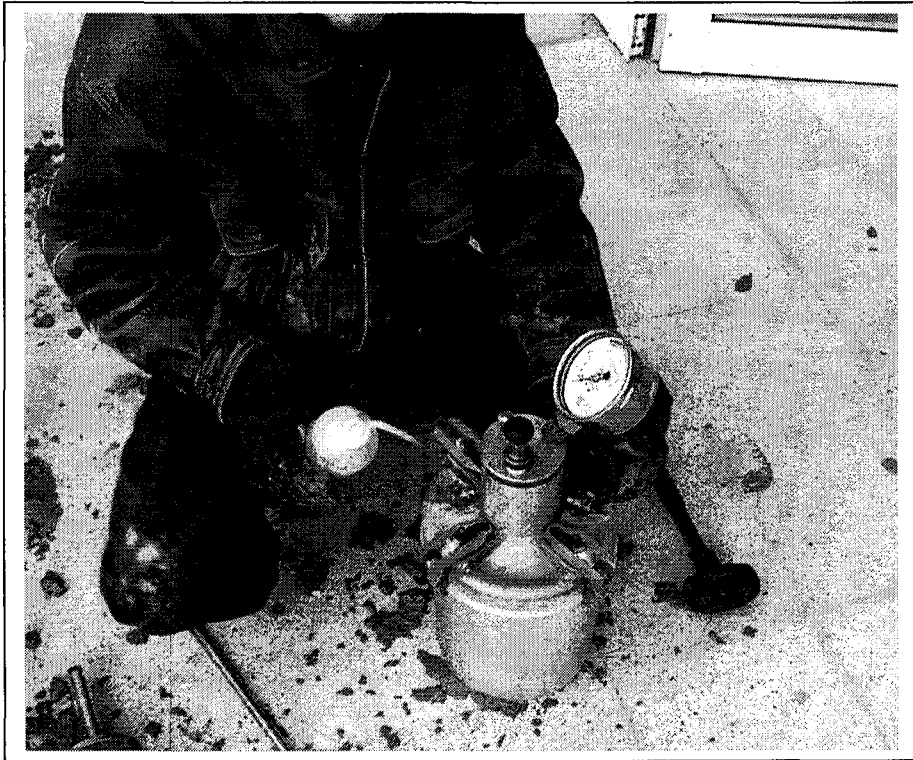


Şekil 6.11. Taze betonda çökme deneyinin uygulaması

Taze betonda hava miktarı deneyi TS 2901'de tanımlanmıştır [117]. Deney, hava ölçer cihazı yardımıyla gerçekleştirilir. Hava miktarı ölçümü için değişik tip hava ölçerler mevcuttur. Şekil 6.12 taze betonda hava miktarını ölçen cihazın bir şemasını ve deneylerde kullanılan hava ölçerin resmini, Şekil 6.13 ise taze betonda hava miktarı deneyi uygulamasını göstermektedir.



Şekil 6.12. Taze betonda hava tayini cihazının şematik gösterimi ve cihazın fotoğrafı



Şekil 6.13. Taze betonda hava miktarı tayini deneyinin uygulaması

Çizelge 6.8-9 sırasıyla deneysel çalışmanın birinci ve ikinci bölümünde her bir karışım için ölçülen taze beton çökme ve hava miktarı değerlerini özetlemektedir.

Çizelge 6.8. Birinci bölümde deneylerde kullanılan karışımların çökme ve hava miktarları

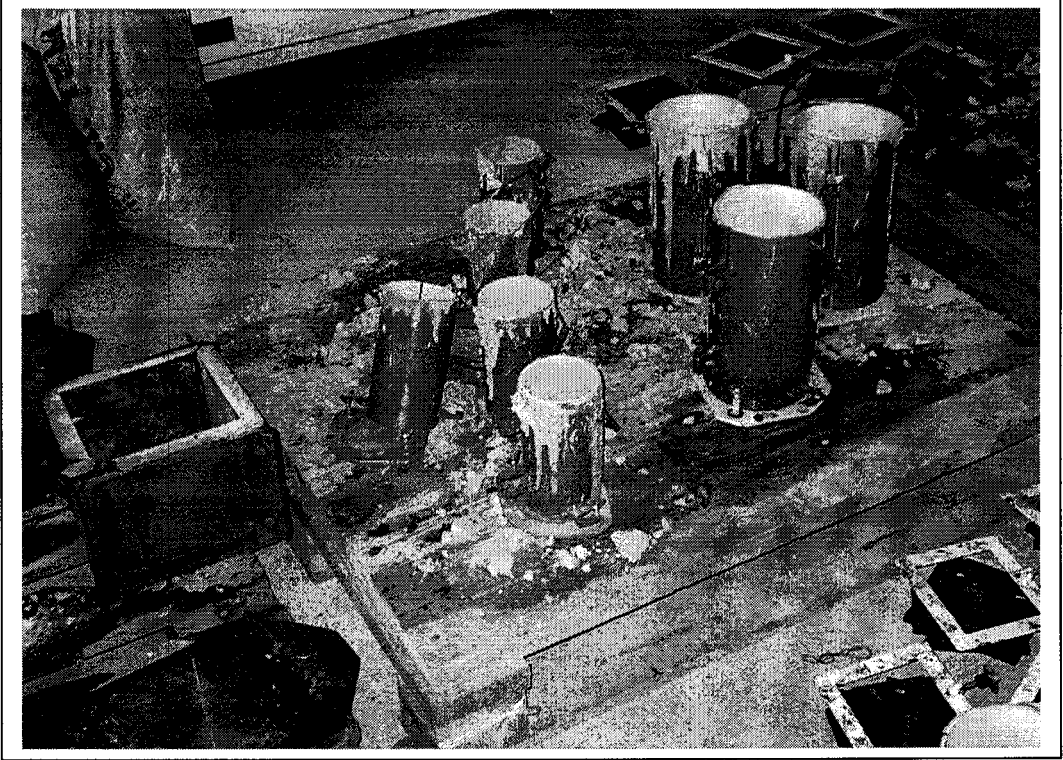
Karışım	Çökme Değeri (mm)	Hava Miktarı (%)
Beton K1	155	2.8
Beton K2	160	2.0
Beton K3	155	1.4
Beton K4	150	1.2
Beton D1	145	2.6
Beton D2	150	1.7
Beton D3	155	1.3
Beton D4	145	1.0

Çizelge 6.9 İkinci bölümde deneylerde kullanılan karışımların çökme ve hava miktarları

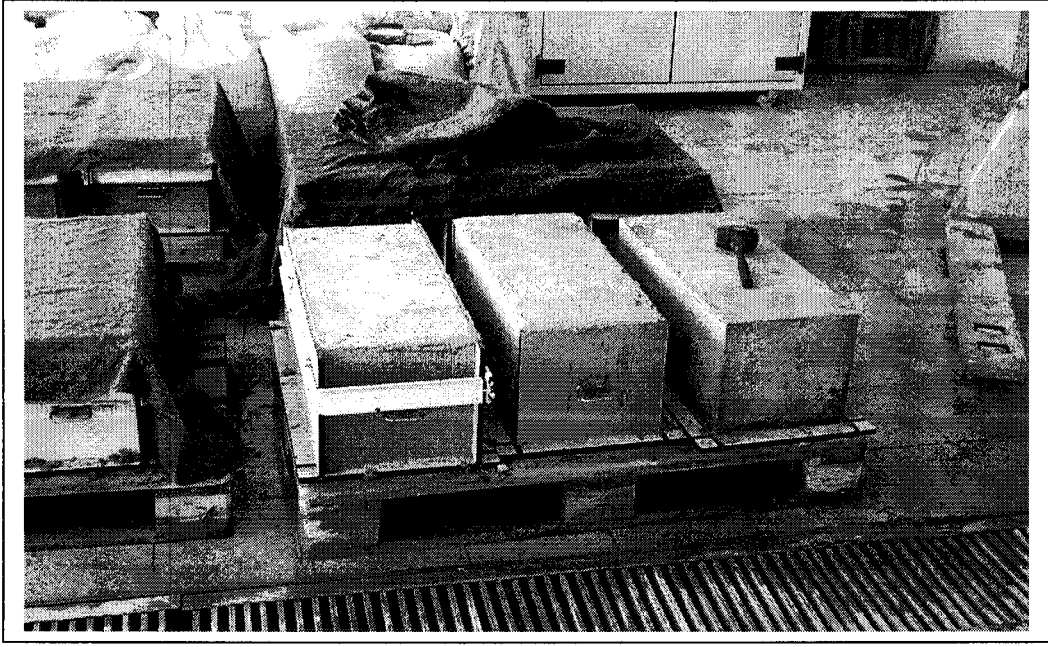
Karışım	Çökme Değeri (mm)	Hava Miktarı (%)
Beton M1	120	1.4
Beton M2	120	1.5
Beton M3	120	1.4
Beton M4	135	1.6
Beton VS	140	1.7
Beton ŞS	140	1.7
Beton HS	140	1.7
Beton SK	140	1.7
Beton SHK	140	1.7
Beton HK	140	1.7
Beton ES	110	1.5
Beton ÇES	110	1.5
Beton AES	110	1.5
Beton DÇ	110	1.5

6.4. Betonların Kalıplardan Çıkarılması ve Kürlenmesi

Standart testlerde kullanılacak deney numunesi standart küp ve silindir şekilli kalıplarına ve beton çekici, sesüstü atım hızı, çekip-çıkarma deneyleri uygulanacak, beton olgunluk ölçeri bağlanacak ve karot numunesi alınacak kiriş kalıplarına yerleştirilen beton karışımları, beton dökümünden 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve bez ile sarılarak test edilecekleri zamana kadar laboratuvar ortamında ıslak kür edilmişlerdir. Şekil 6.14-17 standart test kalıplarından ve kiriş kalıplarından betonların çıkarılmasını ve betonlara uygulanan kür işlemlerini göstermektedir.



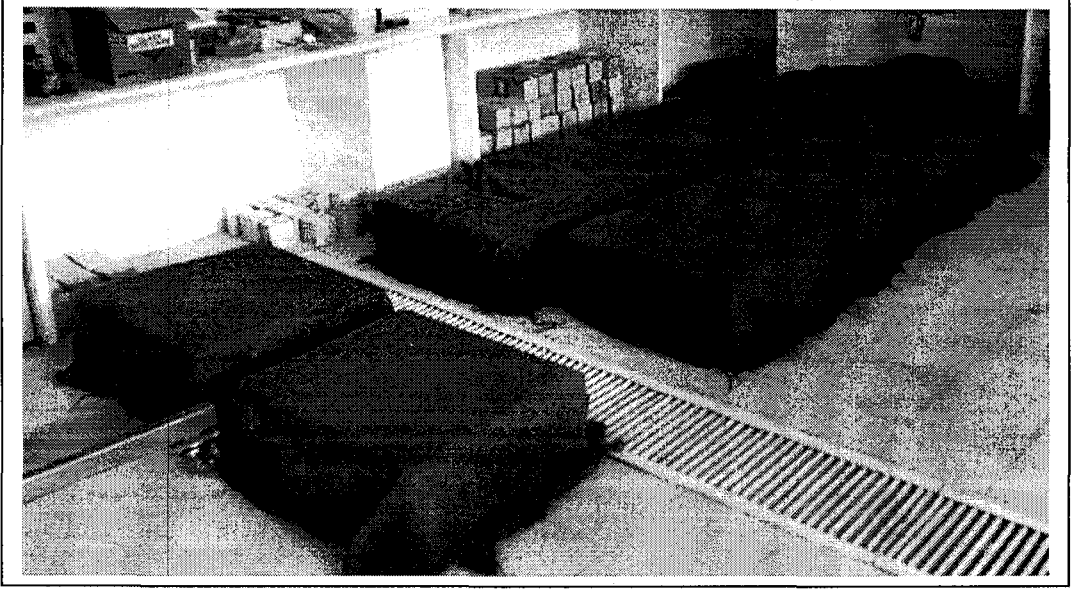
Şekil 6.14. Standart deney numunelerinin kalıplardan çıkarılması



Şekil 6.15. Kiriş beton numunelerinin kalıplardan çıkarılması



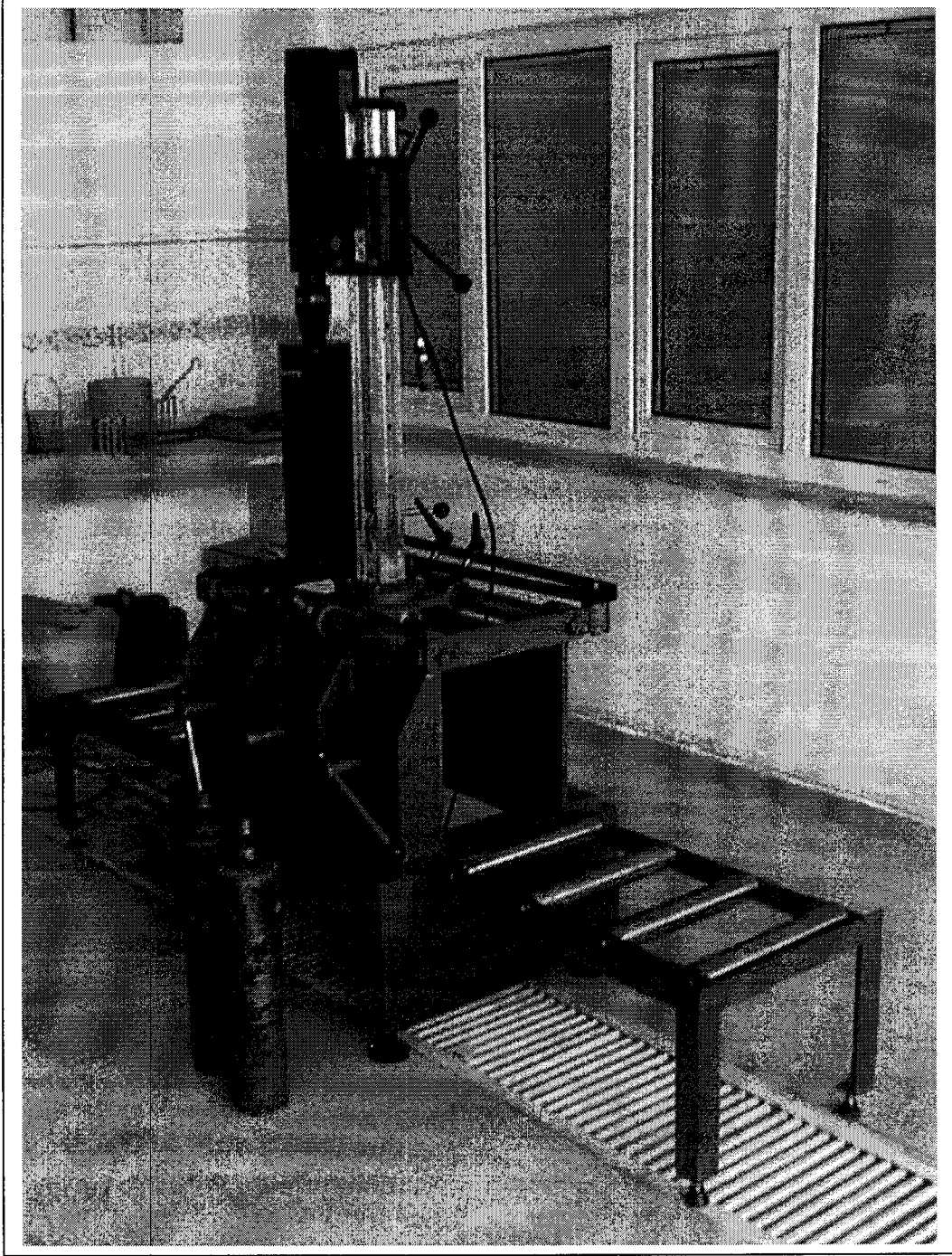
Şekil 6.16. Kalıplardan çıkarılan standart numunelerin kürleme işlemine hazırlanması



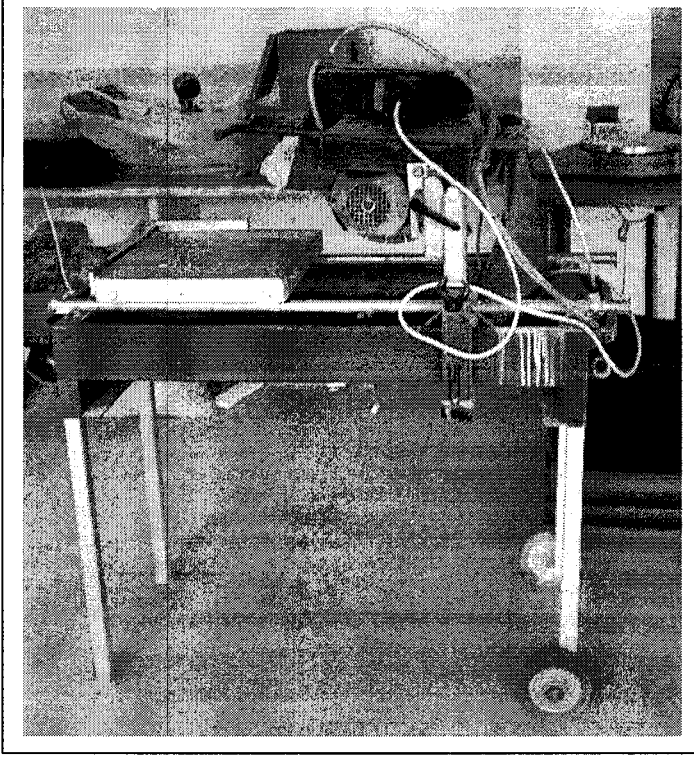
Şekil 6.17. Standart deney numunelerinin ve kiriş numunelerin laboratuvar ortamında ıslak kür edilmesi

6.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Deneyisel çalışmada, farklı beton karışımları ile hazırlanan numunelere standart testler, karot testleri, beton çekici ve sesüstü atım hızı testleri, çekip çıkarma testleri ve seçilen bazı karışımlar için beton olgunluk testleri uygulanmıştır. Kiriş elemanlardan 144 mm, 94 mm, 69 mm ve 46 mm çaplarında karot numuneleri alınmış ve birinci bölümde her bir çap için 2, 1.75, 1.5, 1.25, 1, 0.75 boy/çap oranına sahip, ikinci bölümde her bir çap için boy/çap oranı 1 olan en az altışar adet beton karot numunesi kesilerek hazırlanmıştır. Karot numuneleri daha sonra, aynı standart deney numuneleri gibi basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Kirişlerden karot numuneleri alabilmek için bir düzenek imal edilmiş ve bu düzeneğe laboratuvarında bulunan karot makinesi monte edilerek karot numunelerini çıkarmaya hazır hale getirilmiştir. Şekil 6.18 imal edilen karot makinesi düzeneğini göstermektedir. Kirişlerden karot numunelerinin alınmasından sonra bazı numuneler, deney için uygun boya kesilmiştir. Numuneleri kesmek için bir başka düzenek kullanılmıştır. Bu düzenek dikkatli bir şekilde ayarlanarak kesme esnasında numunelerin göreceği hasar miktarı en aza indirilmiştir. Şekil 6.19’de, deney numunelerini kesme işleminde kullanılan düzenek gösterilmektedir.

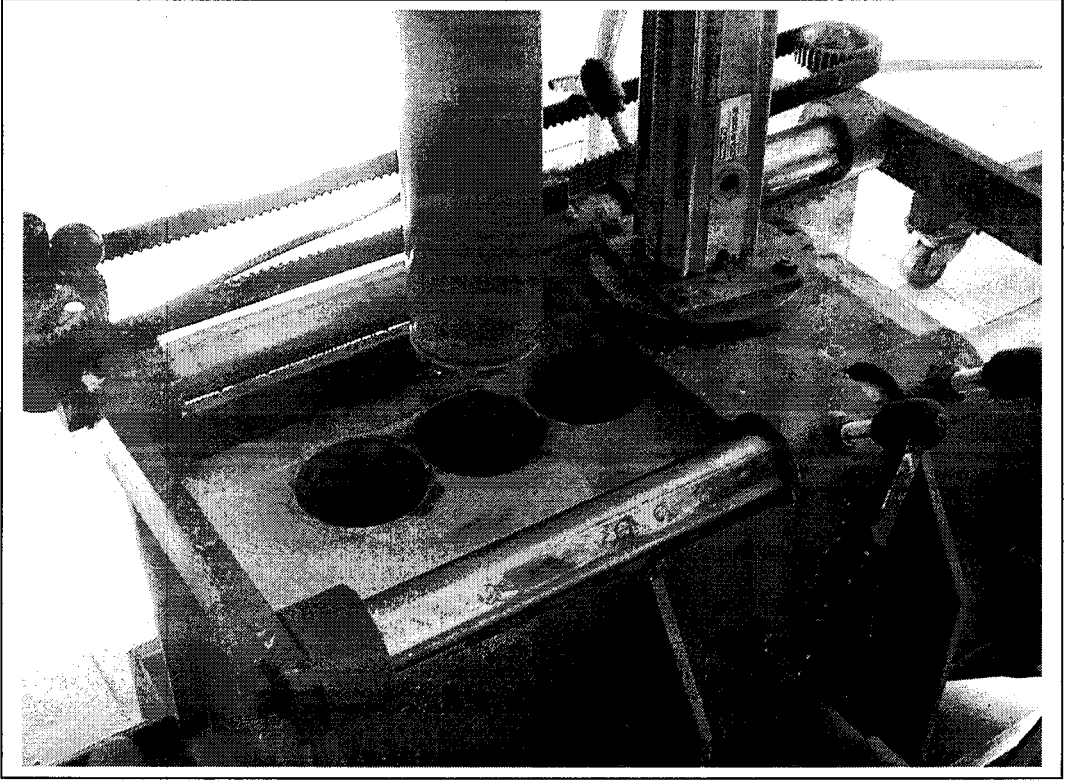


Şekil 6.18. Laboratuvarda kurulmuş karot alma makinesinin görüntüsü



Şekil 6.19. Kesme makinesinin görüntüsü

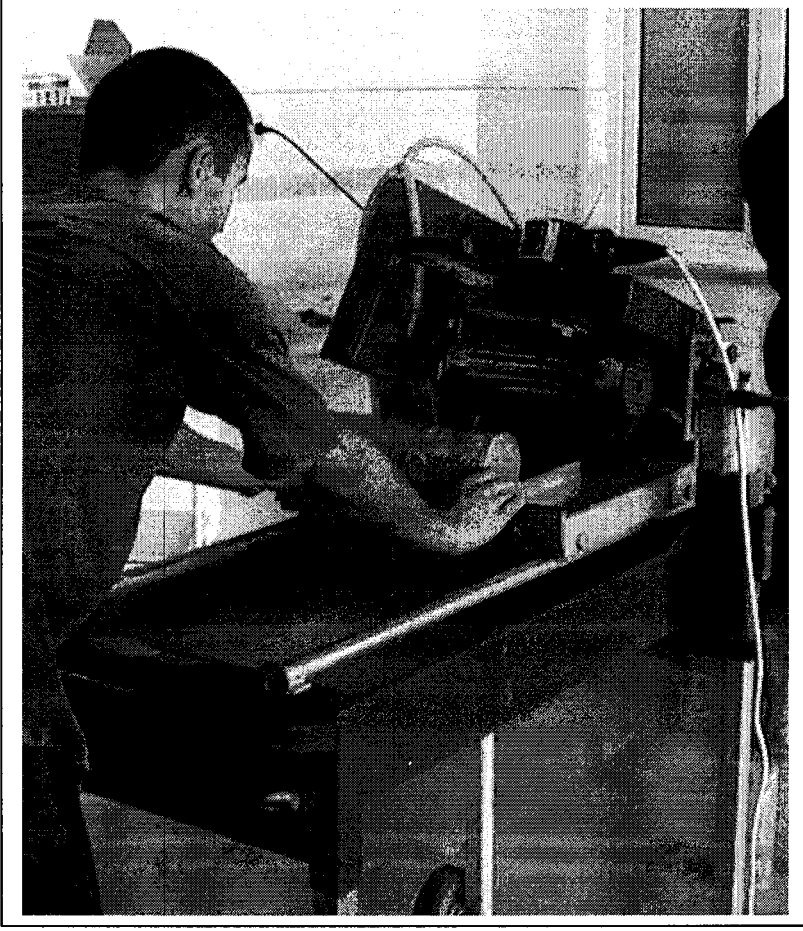
Kurulan düzenekler vasıtasıyla, kiriş beton elemanlardan karot numuneleri çıkarılmış ve belirlenen boy/çap oranlarını elde etmek için kesilmişlerdir. Şekil 6.20-6.25, sırasıyla karot numunelerinin çıkarılmasını, çıkarılan karot numunelerinin kesilerek hazırlanmasını, numunelere başlık yapılmasını ve basınç dayanımı testi uygulamasını göstermektedir.



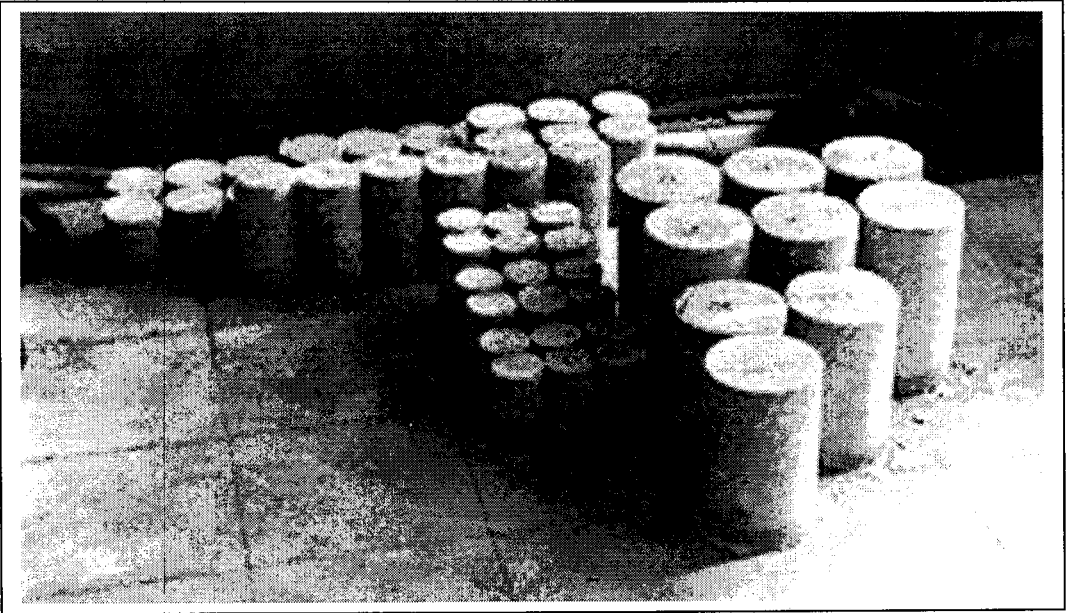
Şekil 6.20. Kiriş numunelerden karot çıkarılması



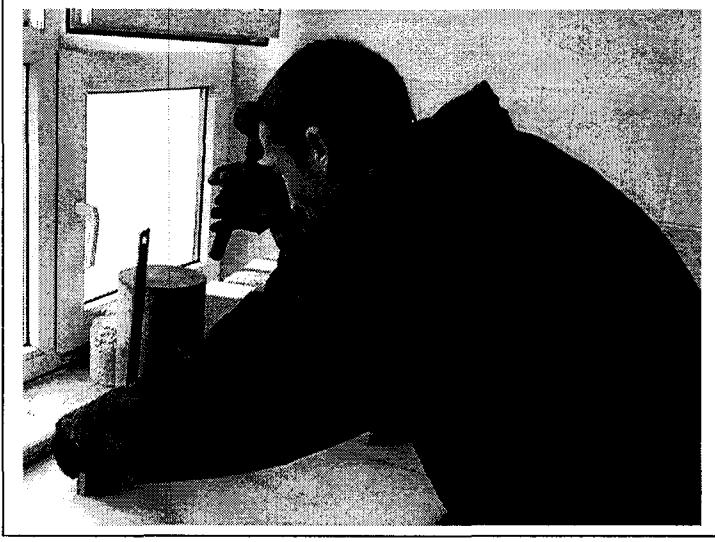
Şekil 6.21. Çıkarılan karot numunelerin görünümü



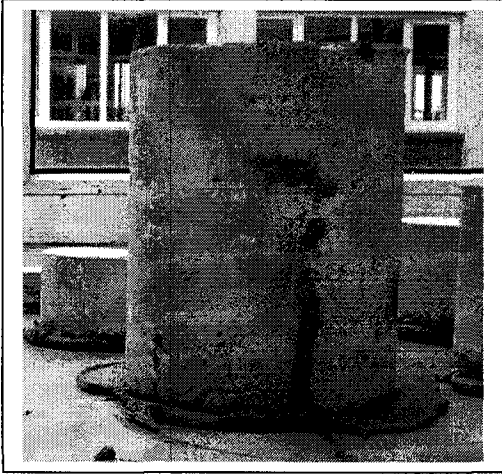
Şekil 6.22. Karot numunelerin kesilmesi



Şekil 6.23. Kesilen karot numunelerin görünümü

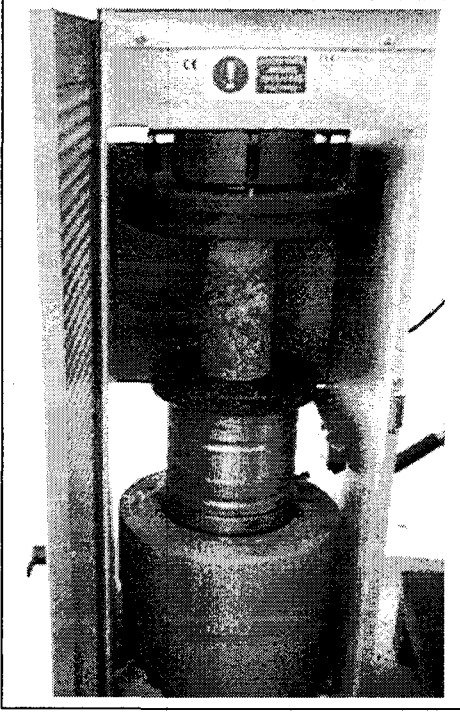


Şekil 6.24. Karot numunelere başlık yapılması



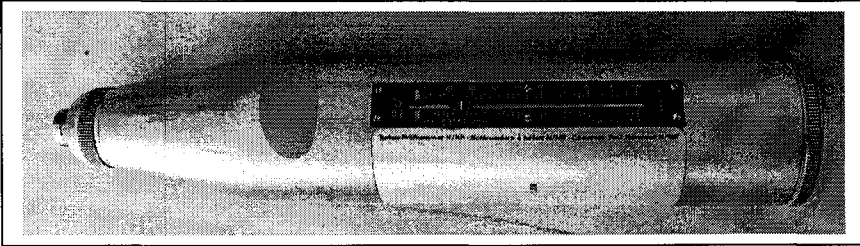
Şekil 6.25. Karot numunelerin başlık yapıldıktan sonra görünümü

Karot numuneler yukarıda anlatıldığı gibi hazırlandıktan sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuşlardır. Karot numunelerin basınç dayanımı testi standart numunelerin basınç dayanımı testi ile aynıdır. Şekil 6.26 standart numunelere ve karot numunelere uygulanan basınç dayanımı testini göstermektedir.

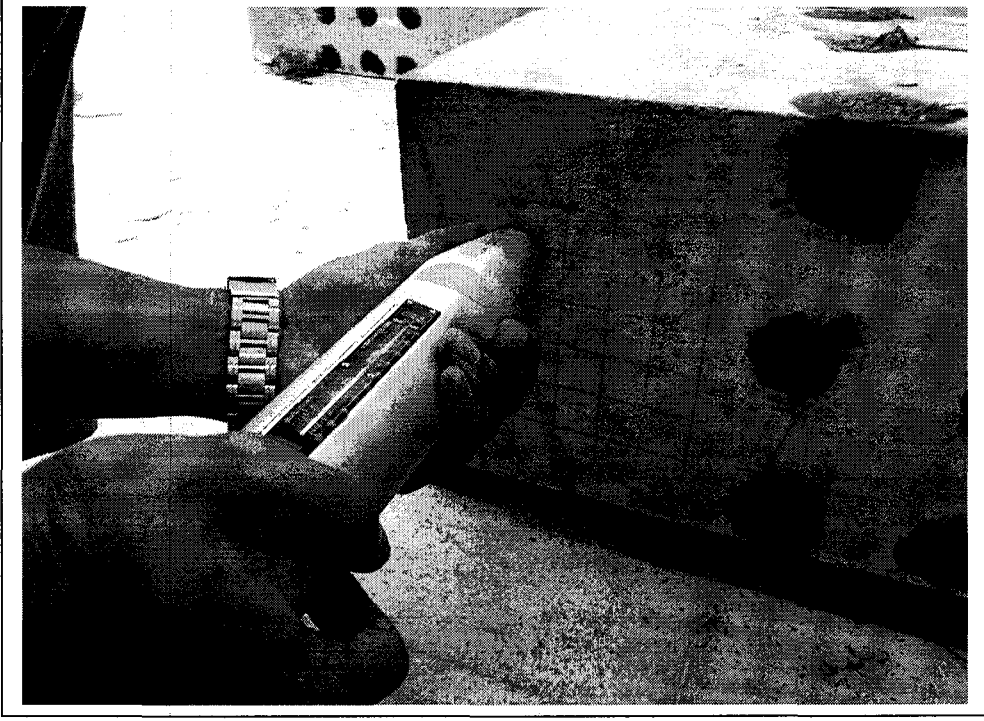


Şekil 6.26. Standart numunelere ve karot numunelerine uygulanan basınç dayanımı testi

Karot numunelere uygulanan basınç dayanımı testinden başka, kiriş numuneler üzerinde, her bir beton karışımı için beton çekici ve sesüstü atım hızı deneyleri yapılmıştır. Beton çekici deneyi yatay olarak uygulanmış en az 12 adet ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Sesüstü atım hızı deneyleri için kiriş numunelerden, kısa doğrultuda dokuz adet ölçüm alınmış, ölçümler doğrudan iletim yöntemiyle yapılmıştır. Şekil 6.27-28 sırasıyla deneylerde kullanılan beton çekicini ve beton çekici testinin uygulamasını, Şekil 6.29-31 ise sırasıyla, sesüstü atım hızı testinde kullanılan cihazı, test için kiriş numunenin çizilerek hazırlanmış halini ve kiriş numuneler üzerinde yapılan sesüstü atım hızı ölçümlerini göstermektedir.



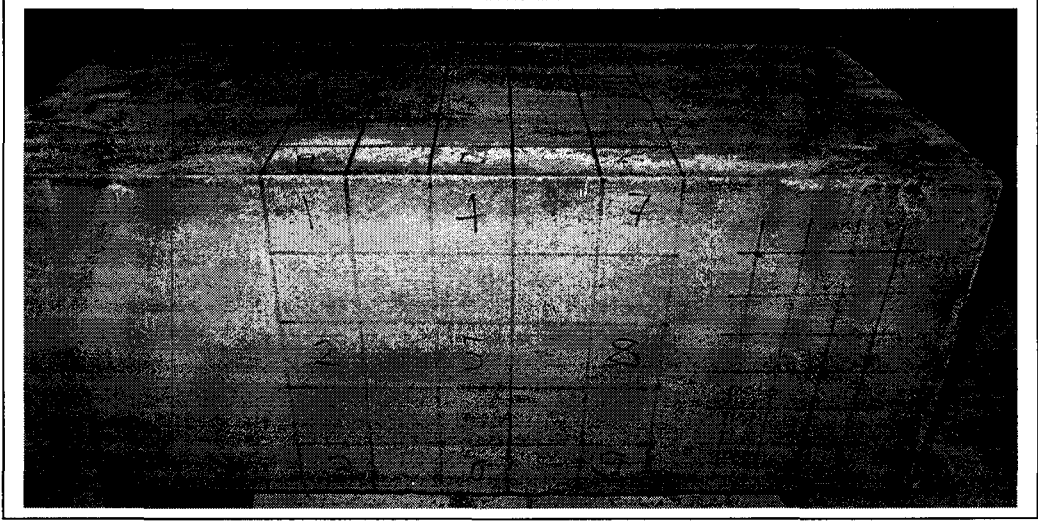
Şekil 6.27. Deneylerde kullanılan beton çekici



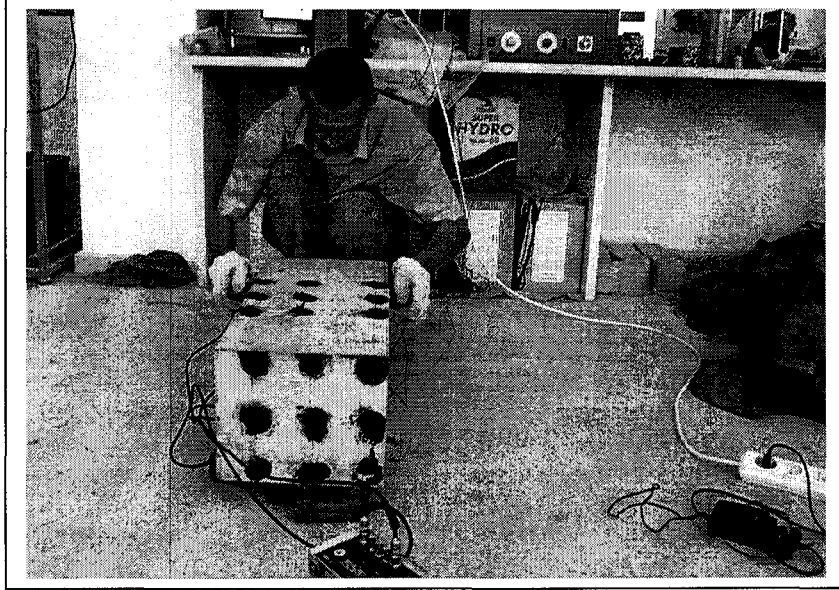
Şekil 6.28. Beton çekici deneyinin uygulaması



Şekil 6.29. Deneylerde kullanılan sesüstü atım hızı test cihazı



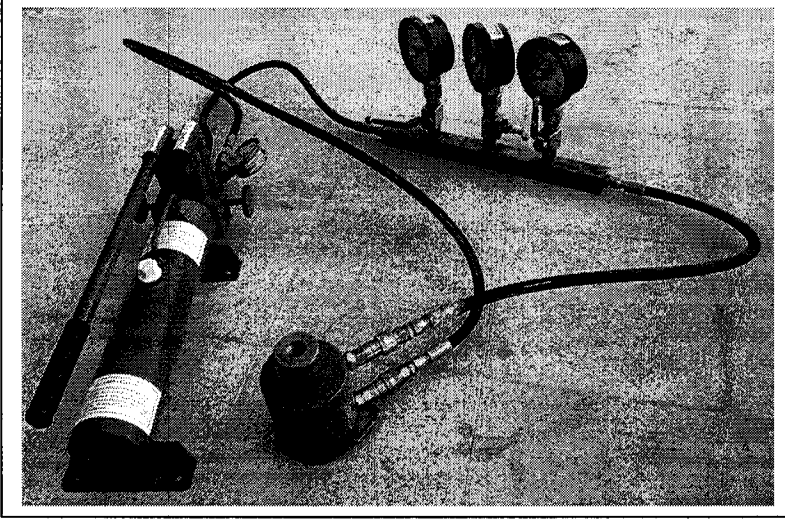
Şekil 6.30. Kiriş numunenin sesüstü atım hızı testi için çizilerek hazırlanmış görünümü



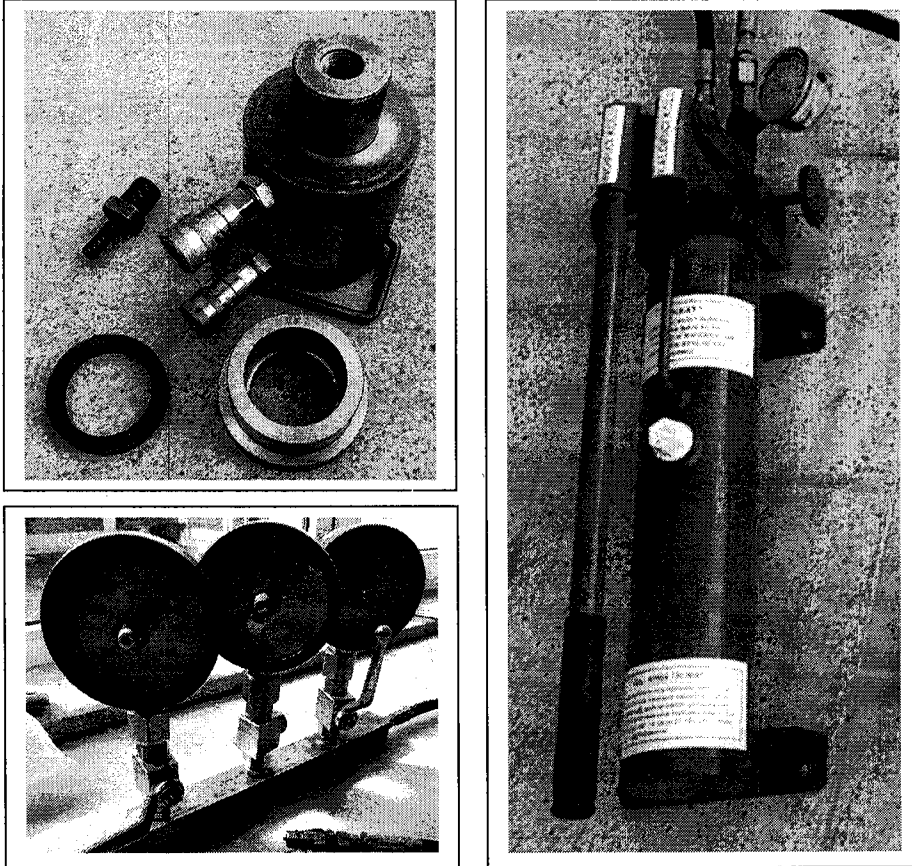
Şekil 6.31. Sesüstü atım hızı cihazı ile kiriş numunede ölçüm yapılması

DeneySEL çalışmanın ikinci bölümünde kiriş numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız testlere ek olarak yarı-tahribatlı testlerden olan çekip-çıkarma testi de uygulanmıştır. Bu test için piston, yükleyici, yağ iletim hortumları, manometreler ve ara elemanlardan oluşan bir mekanizma imal edilmiştir. Bu deneyde kullanılan ve beton içerisinde bırakılan metal parçalar da ayrıca üretilmiştir. Şekil 6.32-35 sırasıyla çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan

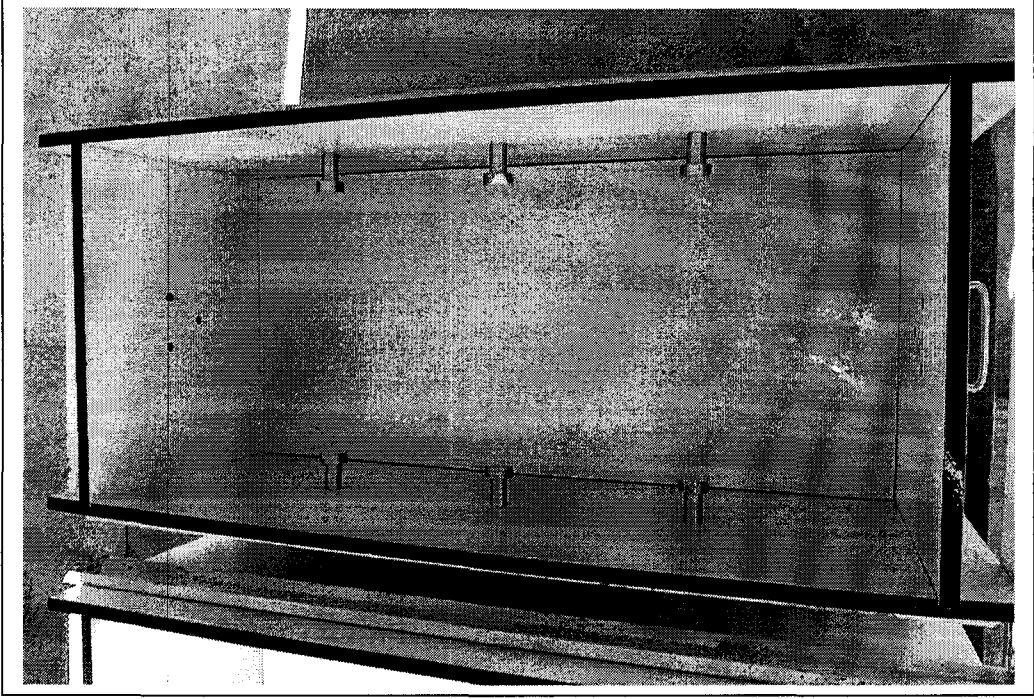
mekanizmayı, parçalarını, beton içerisinde bırakılan metal parçaların kalıplara monte edilmiş halini ve deneyin uygulanışını göstermektedir.



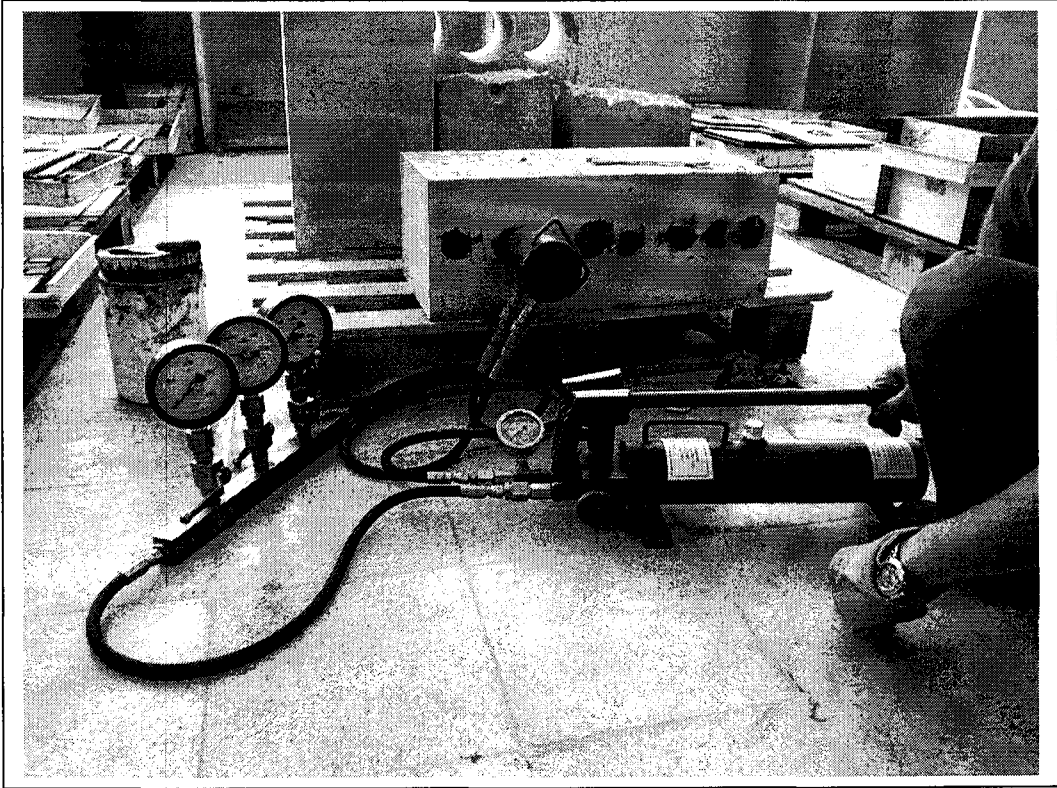
Şekil 6.32. Çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan mekanizma



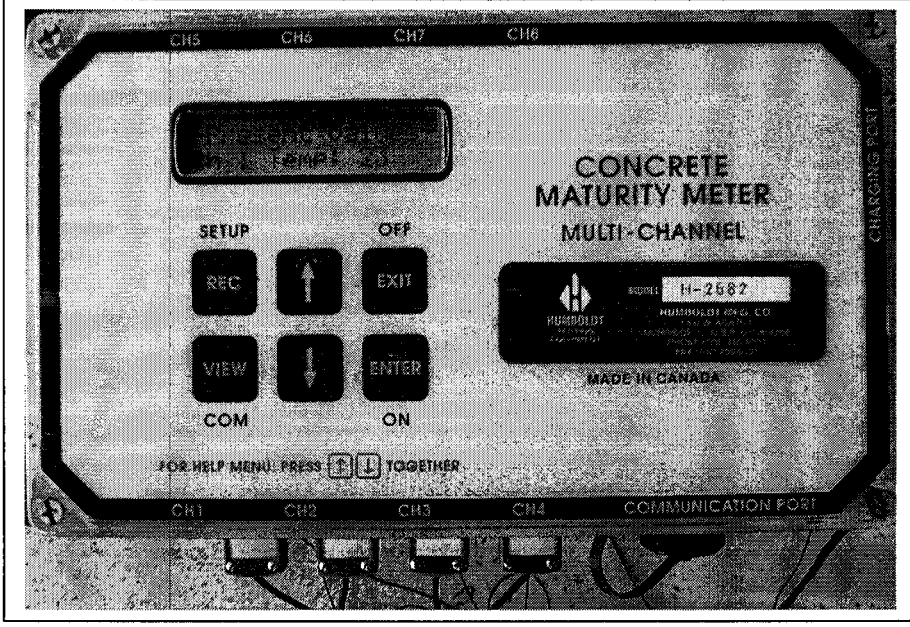
Şekil 6.33. Çekip-çıkarma deneylerinde kullanılan mekanizmanın parçaları



Şekil 6.34. Kalıplara yerleştirilen metal parçalar

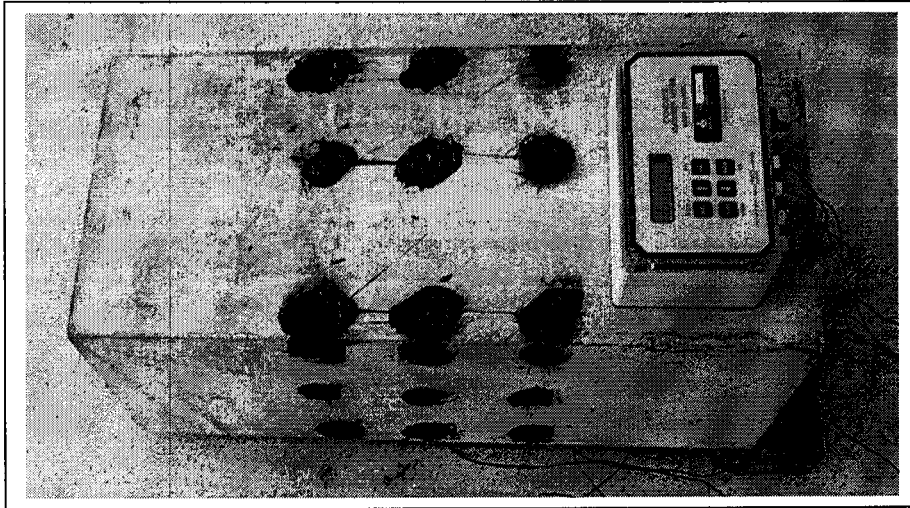


Şekil 6.35. Çekip-çıkarma deneyinin uygulaması



Şekil 6.37. Deneylerde kullanılan beton olgunluk ölçeri

Beton olgunluk ölçerinin ısı çifti (thermocouple) adı verilen telleri betonun kalıba yerleştirilmesinden hemen sonra beton içerisine sokulmakta ve beton sertleştğinde bu teller beton içerisinde kalarak bağlı bulunduğu cihaza belirli aralıklarla veri göndermektedir. Bu veri, cihazın ölçüm yaptığı zaman ile beton sıcaklığını kapsamaktadır. Bu verileri kullanarak cihaz olgunluk faktörünü kendisi hesaplamaktadır. Şekil 6.38 olgunluk ölçerinin beton kiriş üzerinde bağlı bulunduğu durumu göstermektedir.



Şekil 6.38. Beton olgunluk ölçerinin ölçümler için bağlanması

Özetlemek gerekirse, beton numuneler üzerinde standart, tahribatlı, tahribatsız ve yarı-tahribatlı testler uygulanmış ve beton dayanımları bahsedilen yöntemlerle belirlenmiştir. Sertleşmiş beton üzerinde yapılan deneyler, Çizelge 6.10’da belirtilen standartlara göre yapılmıştır.

Çizelge 6.10. Deneylerde yararlanılan ilgili standartlar

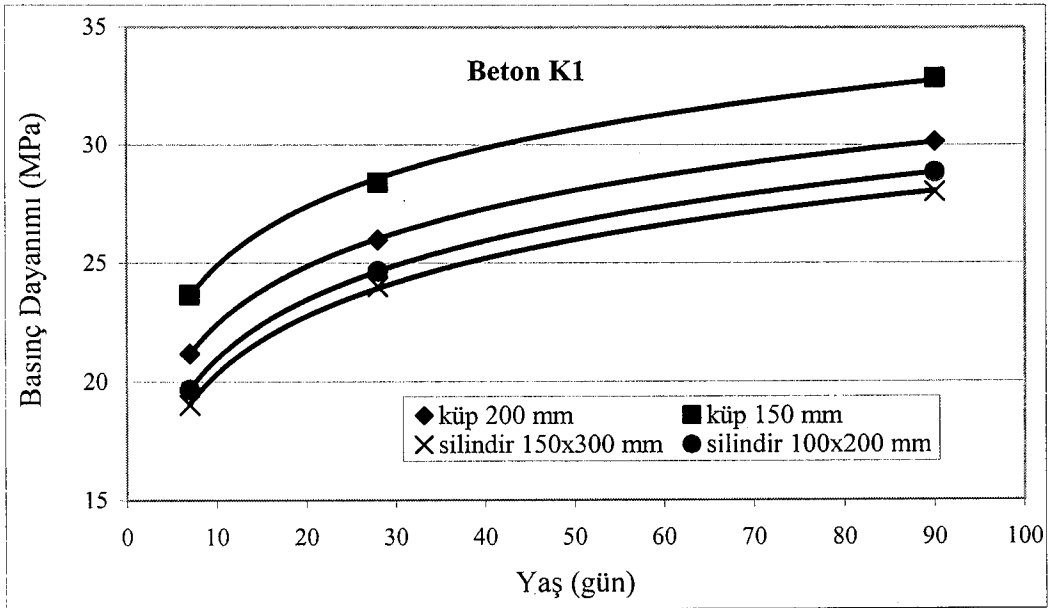
Test	İlgili Standartlar
Standart silindir testi (150 mm x 300 mm) (100 mm x 200 mm)	TS 3114, TS EN 12390-1-4 ASTM C 192-90a, ASTM C 39-86 BS 1881: Part 110: 1983.
Standart küp testi (150mm) ve (200mm)	TS 3114, TS EN 12390-1-4 BS 1881: Part 108, Part 111 ve Part 116: 1983.
Karot testi	TS 10465, TS EN 12504-1 ASTM C 42-90 BS 1881: Part 120: 1983 ACI 318-89
Beton çekici testi	TS 3260 ASTM C 805-85 BS 1881: Part 202 1986
Sesüstü atım hızı testi	ASTM C 597-83 (Reapproved 1991) BS 1881: Part 203: 1986
Çekip-çıkarma testi	ASTM C 900-87 (Reapproved 1993)
Olgunluk testi	ASTM C 1074-93

7. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR

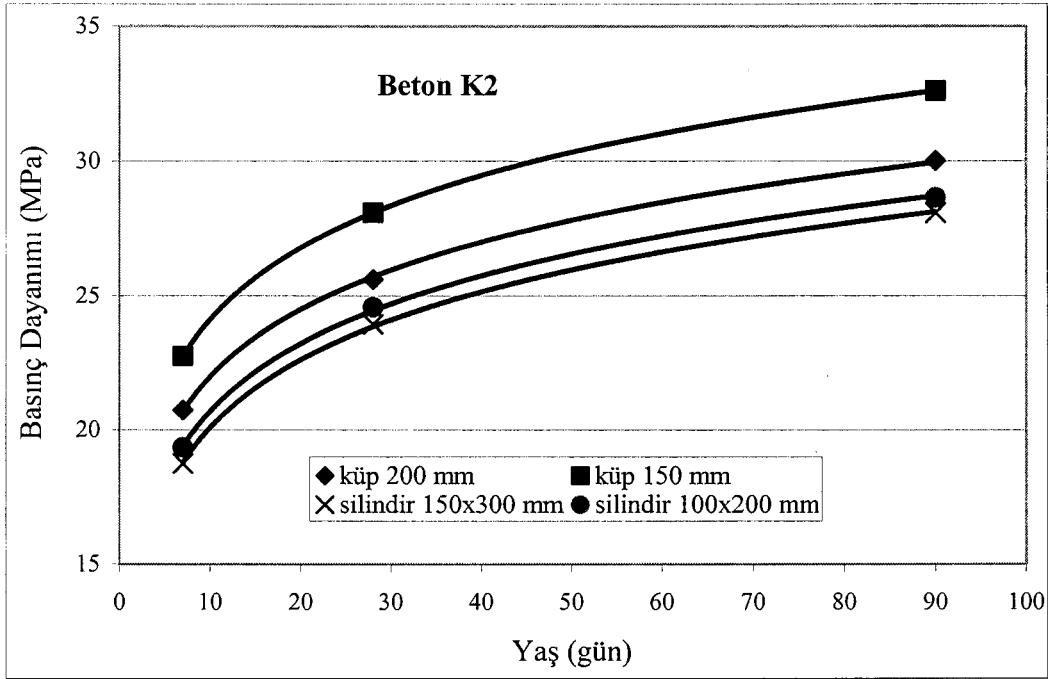
Deneysel çalışma kısmında belirtildiği gibi, silindir ve küp beton numuneler üzerinde standart basınç dayanımı testleri, kiriş numunelerden alınan karotlar üzerinde farklı çap ve farklı narinlikte olmak üzere basınç dayanımı testleri, yine kiriş numuneleri üzerinde beton çekici, sesüstü atım hızı, çekip çıkarma testleri ve bazı karışımlar için beton olgunluk testleri uygulanmıştır. Aşağıda yeralan kısımlarda bu testlerin sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir.

7.1. Standart Testlerin Sonuçları

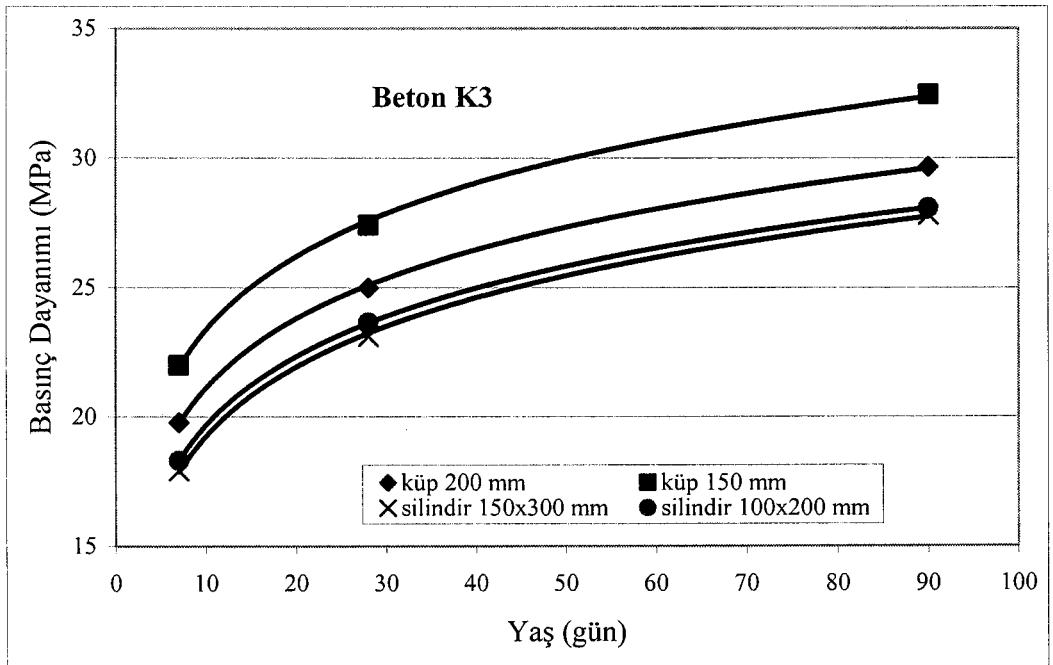
Deneysel çalışmanın birinci bölümünde, standart küp ve silindir basınç dayanımı testleri 150x300 mm ve 100x200 mm silindir numuneler ile 200 mm ve 150 mm küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Deneysel çalışmanın bu bölümünde, farklı maksimum agrega tane boyutunda kırmataş ve dere agregası kullanılarak üretilen betonlardan elde edilen standart numunelerin basınç dayanımı gelişimleri Şekil 7.1-8'de gösterilmektedir. Bu grafiklerde gösterilen basınç dayanımı değerleri 6 adet numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



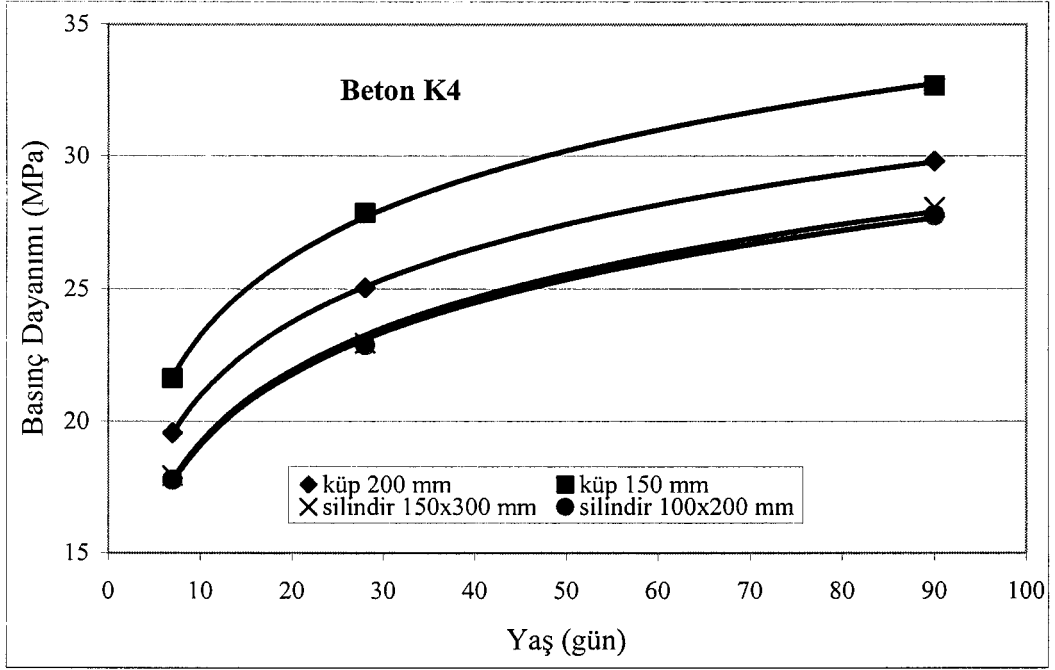
Şekil 7.1. Maksimum tane boyutu 10 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



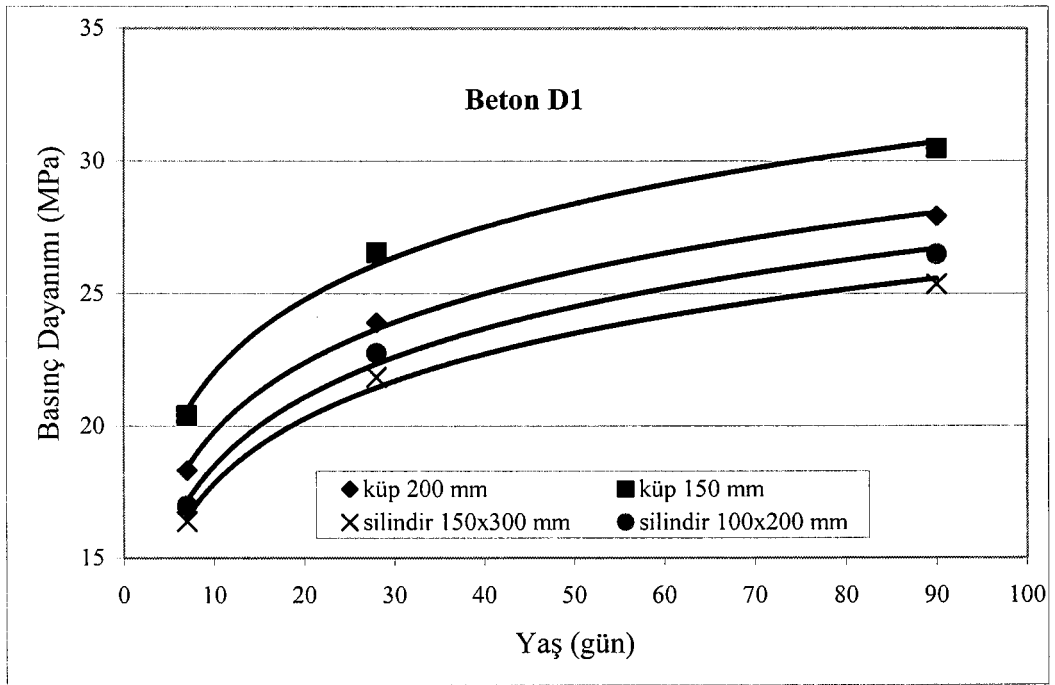
Şekil 7.2. Maksimum tane boyutu 15 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



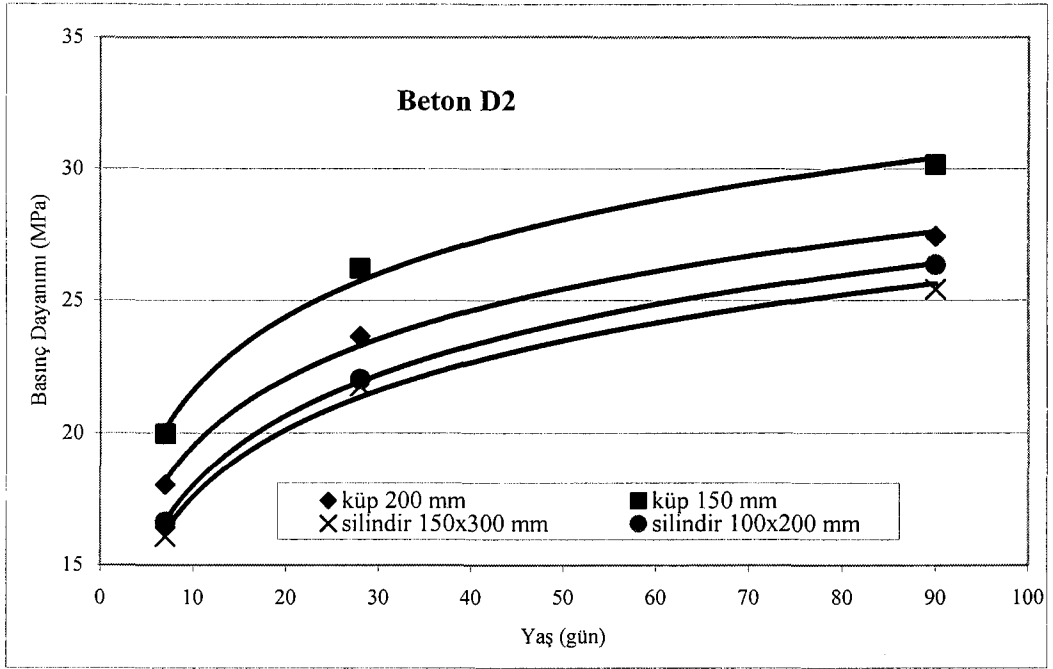
Şekil 7.3. Maksimum tane boyutu 22 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



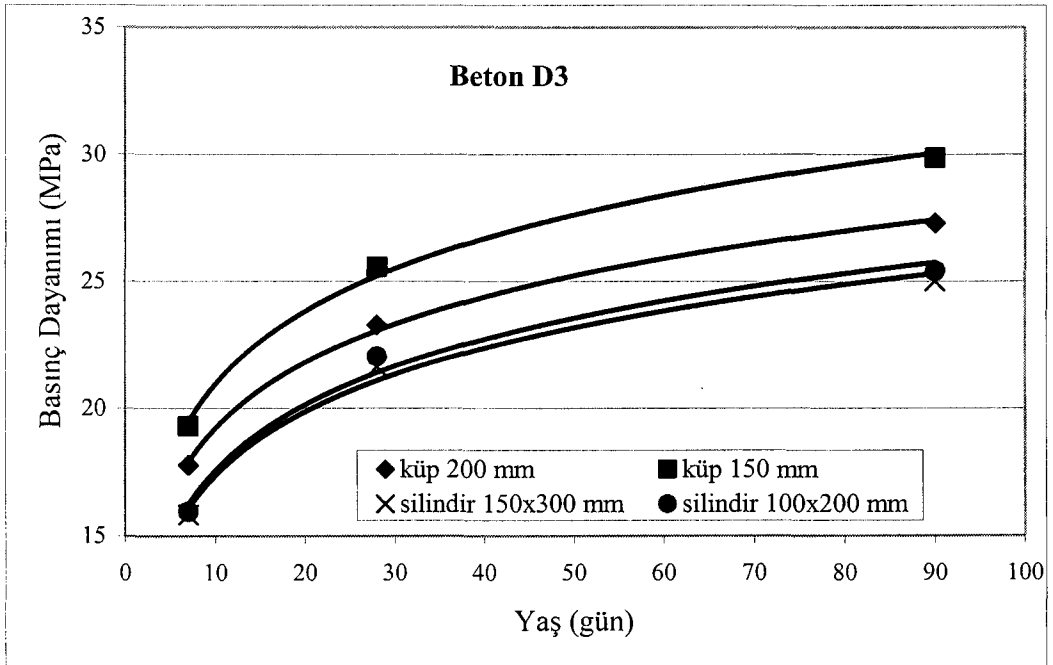
Şekil 7.4. Maksimum tane boyutu 30 mm olan kırmataş agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



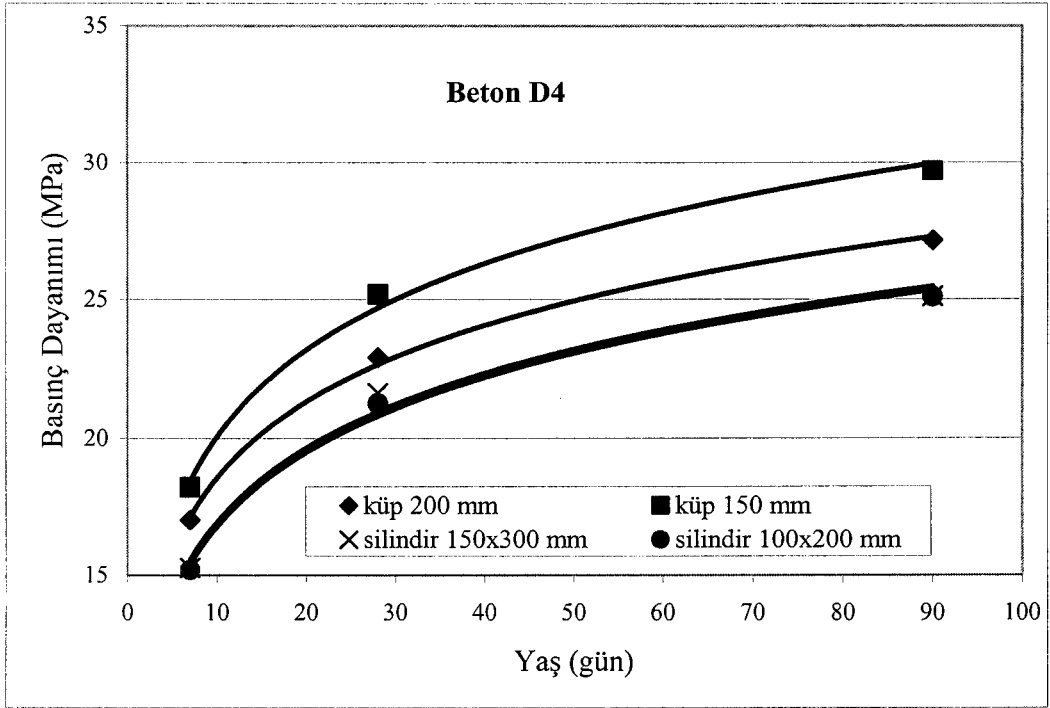
Şekil 7.5. Maksimum tane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



Şekil 7.6. Maksimum tane boyutu 15 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



Şekil 7.7. Maksimum tane boyutu 22 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri



Şekil 7.8. Maksimum tane boyutu 30 mm olan dere agregası ile üretilen betonların basınç dayanımı gelişimleri

Standart deneylerin sonucunda elde edilen değerlere bakılacak olursa, beklenildiği gibi 150 mm küp numunelerin dayanımları en yüksek çıkmıştır. Bunu 200 mm küp numunelerin dayanımları ve daha sonra silindir numuneler izlemiştir. 150x300 mm silindir numunelerle 100x200 mm silindir numunelerin dayanımları birbirine çok yakın bulunmuştur. İki farklı boyuttaki silindir numuneler arasında en büyük farka Beton K1 ve Beton D1 betonları ile üretilen numunelerde rastlanmıştır. Bu sonuç Griffith hipotezi ile uyumludur. Çünkü Griffith hipotezine göre, kırılma kesiti büyüdükçe kusur olasılığı artacağından, küçük numunelerin dayanımları büyük numunelere oranla daha büyük çıkmaktadır. Griffith hipoteziyle açıklanan bu boyut etkisi küp numunelerde daha belirgindir. Yine aynı biçimde, 100x200 mm silindir numunelerin dayanımları da 150x300 mm silindir numunelerin dayanımlarından bir miktar yüksek çıkmıştır. Farklı boyuttaki standart silindir numuneler arasındaki fark maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe azalmış, hatta Beton K4 ve Beton D4 numunelerinde küçük silindirlerin dayanımları daha küçük bile çıkmıştır. Bunun nedeninin duvar etkisi (wall effect) olduğu düşünülmektedir. Bu etkiye göre, beton karışımında

kullanılan maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe numune kalıbının yüzeyi bir duvar etkisi görmekte ve buraya temas eden agregalar çimento hamuru ile tam olarak sarılamamaktadır. Bu durumda küçük numunelerde beklenen etki daha fazla olmakta ve bu da dayanımı düşürmektedir.

Çizilen grafiklerden de anlaşılacağı gibi, kırmataş ile üretilen Beton K1, K2, K3 ve K4 betonlarında 28 günlük 150 mm küp basınç dayanımı 28 MPa civarında, dere agregası ile üretilen Beton D1, D2, D3 ve D4 betonlarının 28 günlük 150 mm küp basınç dayanımı ise 26 MPa civarında çıkmıştır. Çizelge 7.1 tüm beton karışımlarının 28 günlük 150 mm küp ve 150x300 mm silindir numunesi cinsinden basınç dayanımlarını özetlemektedir.

Çizelge 7.1. Beton karışımlarının 28 günlük 150 mm küp ve 150x300 mm silindir numunesi basınç dayanımları

Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)	
	150 mm küp	150x300 mm silindir
Beton K1	28.40	24.01
Beton K2	28.09	23.94
Beton K3	27.40	23.10
Beton K4	27.83	22.94
Beton D1	26.56	21.85
Beton D2	26.22	21.79
Beton D3	25.56	21.63
Beton D4	25.18	21.62

Burada dere agregası ile üretilen beton karışımlarının su/çimento oranları daha düşük olmasına rağmen daha düşük dayanımlar verdiği gözlenmektedir. Dere agregası yuvarlak şekilli ve yüzeyi kırmataşa nazaran daha pürüzsüzdür. Dolayısıyla, dere agregası ile üretilen betonlarda agrega-çimento hamuru yüzeyinin kırmataş ile üretilen betonlara nazaran daha düşük olması dayanımı düşürebilir. Çünkü, arayüzey dayanımı beton dayanımını doğrudan etkilemektedir. Başka bir deyişle, dere agregası ile üretilen betonlarda arayüzey

dayanımı daha düşük olduğundan bu betonların basınç dayanımları da daha düşük çıkmıştır.

Çizelge 7.2-4 ise standart numunelerin birbirleri ile karşılaştırmalarını oransal olarak göstermektedir. Burada silindir numuneler kendi aralarında, küp numuneler de kendi aralarında oranlanmıştır. Aynı zamanda çizelgelerin bir kolonunda da 150x300 mm boyutundaki silindir numunelerin basınç dayanımlarının 150 mm boyutundaki küp numunelerin basınç dayanımlarına oranları yer almaktadır. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kurallarını içeren TS 500 Standardında beton kalitesi sınıflandırılmış ve bu sınıflarda üretilecek olan beton numunelerinin göstermesi gereken basınç dayanımları silindir ve küp şekilli numuneler için ayrı şekilde belirtilmiştir. Bu nedenle, bir karşılaştırma yapılabilmesi için Çizelge 7.3'ün son kolonu, deneysel çalışmanın bu kısmında üretilen betonların 28 günlük dayanım seviyelerine göre, yeni basım TS 500 Standardlarından alınmış olan silindir dayanımı ile küp dayanımı oranlarını özetlemektedir [118]. TS 500'deki oranların farklı olması agrega türünden veya maksimum agrega tane boyutundan değil karışımların dayanım seviyelerinin farklılığından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 7.2. Standart numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının oranları

Karışım	f_{sil100}/f_{sil150}	$f_{küp200}/f_{küp150}$	$f_{sil150}/f_{küp150}$
Beton K1	1.03	0.89	0.80
Beton K2	1.03	0.91	0.82
Beton K3	1.02	0.90	0.82
Beton K4	0.99	0.90	0.83
Beton D1	1.04	0.90	0.80
Beton D2	1.03	0.90	0.81
Beton D3	1.01	0.92	0.82
Beton D4	0.99	0.93	0.84

Çizelge 7.3. Standart numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarının oranları

Karışım	f_{sil100}/f_{sil150}	$f_{küp200}/f_{küp150}$	$f_{sil150}/f_{küp150}$	$f_{sil}/f_{küp}$ TS 500
Beton K1	1.03	0.92	0.85	0.83
Beton K2	1.03	0.91	0.85	0.83
Beton K3	1.02	0.91	0.84	0.82
Beton K4	1.00	0.90	0.82	0.82
Beton D1	1.04	0.90	0.82	0.81
Beton D2	1.01	0.90	0.83	0.81
Beton D3	1.02	0.91	0.85	0.81
Beton D4	0.98	0.91	0.86	0.81

Çizelge 7.4. Standart numunelerin 90 günlük basınç dayanımlarının oranları

Karışım	f_{sil100}/f_{sil150}	$f_{küp200}/f_{küp150}$	$f_{sil150}/f_{küp150}$
Beton K1	1.03	0.92	0.85
Beton K2	1.02	0.92	0.86
Beton K3	1.01	0.91	0.86
Beton K4	0.99	0.91	0.86
Beton D1	1.04	0.92	0.83
Beton D2	1.04	0.91	0.84
Beton D3	1.02	0.91	0.84
Beton D4	1.00	0.91	0.85

Çizelge 7.2-4'den görüleceği gibi 100x200 mm standart silindir numunelerin basınç dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunelerin basınç dayanımlarına oranları 0.98-1.04 arasında değişmektedir. Maksimum agrega tane boyutu nispeten küçük olan betonlardan elde edilen numunelerde 1.0'ın üzerinde olan bu değer, betondaki maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe azalma eğilimi göstermekte hatta Beton K4 ve Beton D4 gibi numuneler için 1'in altına bile düşmektedir. Bunun nedeni daha önce de bahsedildiği gibi duvar etkisinden dolayıdır. Bu iki farklı boyuttaki silindir numunelerin arasındaki oran yaş ile birlikte belirgin bir değişiklik göstermemektedir.

200 mm küp numunelerin basınç dayanımları ile 150 mm küp numunelerin basınç dayanımları arasındaki oran ise 0.89-0.93 gibi daha dar bir aralıkta değişmiştir. Bu değer, maksimum agrega tane boyutu ile belirgin bir değişkenlik göstermemekle birlikte, genellikle maksimum agrega tane boyutu arttığında bir miktar azalma eğilimindedir.

200 mm ve 150 mm boyutundaki küp basınç dayanımı değerlerinin arasındaki oran da değerlendirmeler açısından önemlidir. TS 500 Standardının eski basımına göre, basınç dayanımlarının değerlendirilmesinde standart küp numunesi olarak 200 mm boyutundaki numuneler kullanılmaktaydı [119]. Yeni TS 500 Standardı 150 mm boyutundaki küp numuneleri değerlendirmeye almakta ve diğer boyutlarda kullanılabilecek olan küp numunelerin dayanımlarının düzeltilmesi gerektiğini belirtmektedir. Ancak farklı boyuttaki bu numuneler için düzeltme faktörleri sunmamaktadır [118]. Bu çalışmada 150 ve 200 mm boyutlarındaki küp numuneler için bu faktör, 28 günlük basınç dayanımları ile değerlendirme yapıldığında 0.90-0.92 arasında bulunmuştur. Bu oran standart küp numuneleriyle yapılan basınç dayanımı değerlendirmeleri açısından önemlidir.

Bir başka önemli oran ise, standart silindir numunelerle küp numuneler arasındaki orandır. Beton kalitesinin denetiminde, Amerika ve Kanada gibi ülkelerde daha çok silindir numuneler, bazı Avrupa ülkelerinde ise küp şekilli numuneler kullanılagelmiştir. Türkiye’de hem silindir hem de küp şekilli numuneler kullanılabilmektedir. Bu nedenle standartlarda verilen beton sınıfı değerlerinin yanında küp numunelerin sağlaması gereken dayanım değerleri de yer almaktadır. Çizelge 7.5 yeni basım TS 500’e göre beton sınıflarını ve bu sınıflara göre standart silindir ve küp numunelerin sağlaması gereken dayanım değerlerini özetlemektedir.

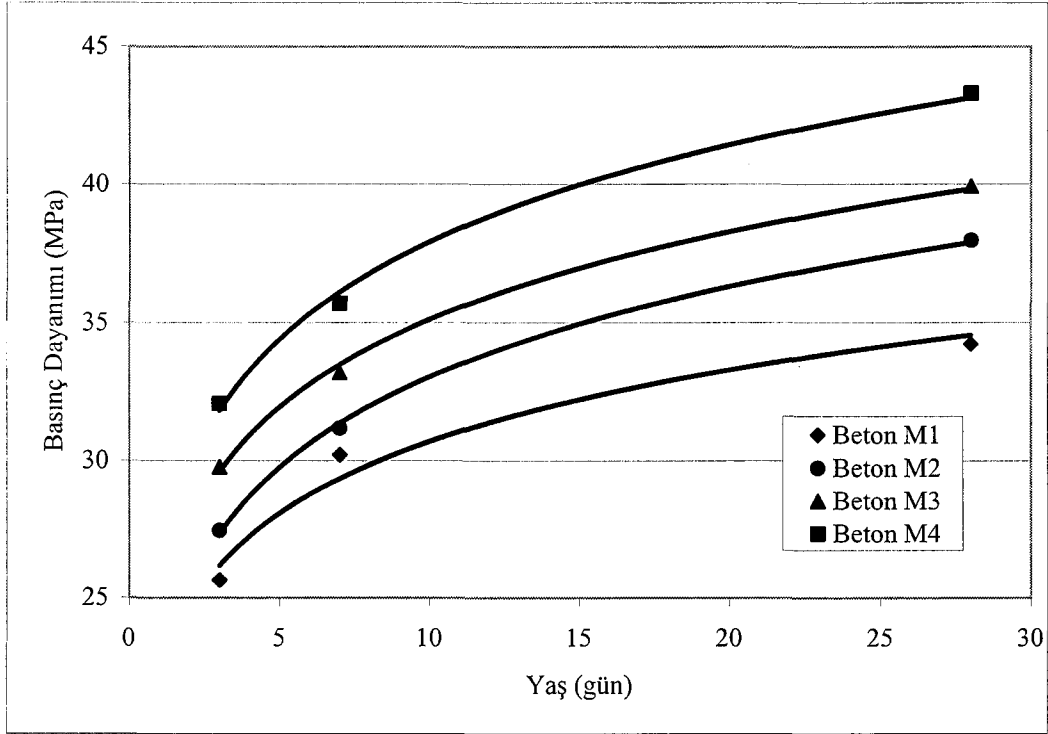
Çizelge 7.5. TS 500 Standardında yer alan beton sınıfları ve dayanımları [118]

Beton Sınıfı	$f_{\text{sil } 150 \times 300}$ (MPa)	$f_{\text{küp } 150}$ (MPa)	$f_{\text{sil}} / f_{\text{küp}}$
C 16	16	20	0.80
C 18	18	22	0.82
C 20	20	25	0.80
C 25	25	30	0.83
C 30	30	37	0.81
C 35	35	45	0.78
C 40	40	50	0.80
C 45	45	55	0.82
C 50	50	60	0.83

Çizelgeden de görüleceği gibi, silindir numune ile küp numune dayanımları arasında belirli bir oran yoktur. Çizelge 7.2-4'ün son sütunlarında deneylerde gözlenen dayanım değerlerine karşılık gelen TS 500 oranları da yer almaktadır. Bu çalışmada, standart 150x300 mm silindir numunelerin basınç dayanımları ile standart 150 mm küp numunelerin basınç dayanımları arasındaki oran, 0.80-0.86 arasında bulunmuştur. Literatürde bu değer 0.85 olarak bilinmektedir. Bu çalışmada 0.85 değeri sıklıkla hesaplınsa da 0.85'den farklı değerlere de rastlanmıştır. Bu nedenle bu iki dayanım değerini her zaman 0.85 gibi bir sayı ile oranlamak yanılığlara neden olabilir. Bu oran 28 gün ve 90 günlük numunelerde 7 günlük numunelere nazaran bir miktar yüksek bulunmuştur. Beton yaşı olarak 28 gün baz alındığında, 150x300 mm silindir numunelerin basınç dayanımlarının 150 mm küp numunelerinin basınç dayanımlarına oranı 0.82-0.86 arasında bulunmuştur.

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde standart testler 150 mm boyutlu küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.9. çeşitli mukavemet seviyelerine göre beton dayanımı gelişimlerini göstermektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi, deneysel çalışmanın bu bölümünde, karışım adları Beton M1, M2, M3 ve M4 olan 3, 7 ve 28 günlük 150 mm küp c insinden 25-45 MPa basınç dayanımına sahip numuneler üretilmiştir. Beton numunelerin basınç dayanımı beton yaşı ile birlikte eğrisel olarak azalan oranda değişmektedir. Yani betonlar literatürde de sıkça

anlatıldığı gibi, ilk günlerde daha fazla dayanım kazanmakta, ileri yaşlarda ise dayanım kazanma hızında bir azalma gözlenmektedir.



Şekil 7.9. Çeşitli dayanım seviyelerindeki betonların 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı gelişimleri

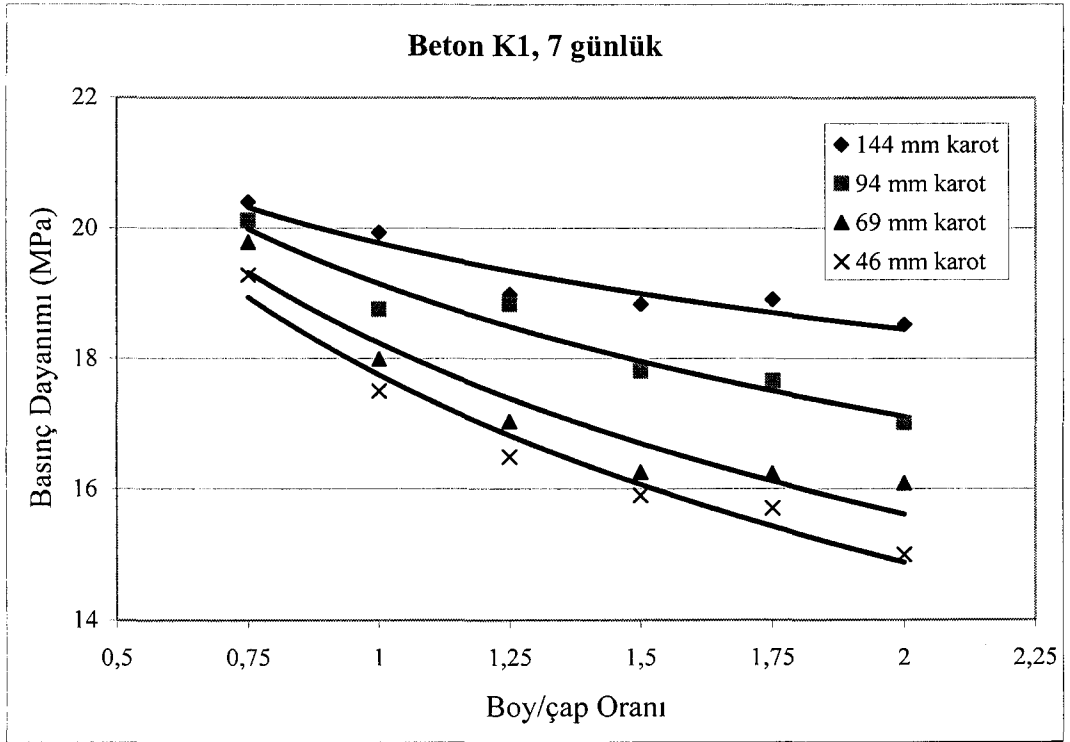
Çizelge 7.6 ise yine bu bölümde, kür şartları ve sıkıştırma derecesinin deneyler üzerinde etkisinin incelendiği beton karışımlarına ait 150 mm boyutundaki standart küp numunelerinin 3, 7, 28 günlük basınç dayanımı değerleriyle, sülfat ve donma-çözülme etkisine maruz bırakılan numune grubuna ait standart küp numunelerin 7, 28, 90 günlük basınç dayanımı değerlerini göstermektedir. Özetlemek gerekirse, sıkıştırma ve kür etkisinin incelendiği beton numunelerin 28 günlük standart 150 mm küp dayanımı 42 MPa civarında, sülfat ve donma-çözülme etkisinin incelendiği numunelere ait standart 150 mm küp dayanımı ise 34 MPa civarında ölçülmüştür. Bu değerler ileriki bölümlerde deney sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla kullanılacaktır. Standart numuneler vibratörle sıkıştırılmış ve sürekli su ile kür edilmiştir. Sıkıştırma derecesi ve kür koşullarının etkisiyle sülfat ve donma-çözülme etkisi kiriş numuneler üzerinde incelenmiştir.

Çizelge 7.6. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde üretilen beton karışımlarının 150 mm küp cinsinden standart basınç dayanımları

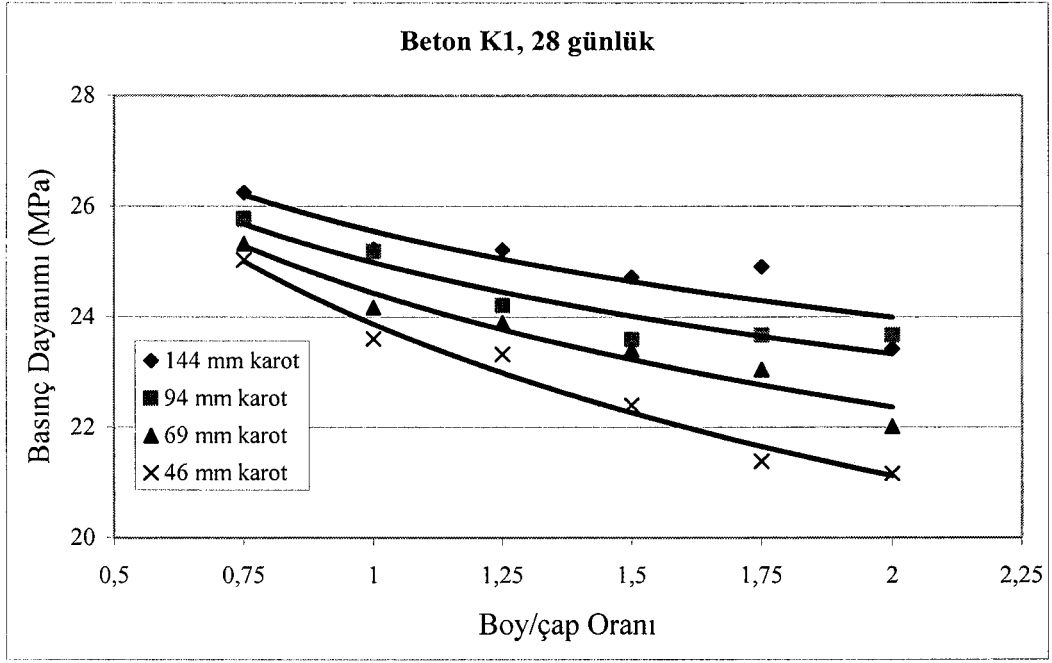
Karışım	Basınç Dayanımı (MPa)			
	3 gün	7 gün	28 gün	90 gün
Beton VS	31.2	36.7	42.3	-
Beton ŞS				
Beton HS				
Beton SK				
Beton SHK	-	28.8	33.7	37.4
Beton HK				
Beton ES				
Beton ÇES				
Beton AES	-	28.8	33.7	37.4
Beton DÇ				

7.2. Karot Deneylerinin Sonuçları

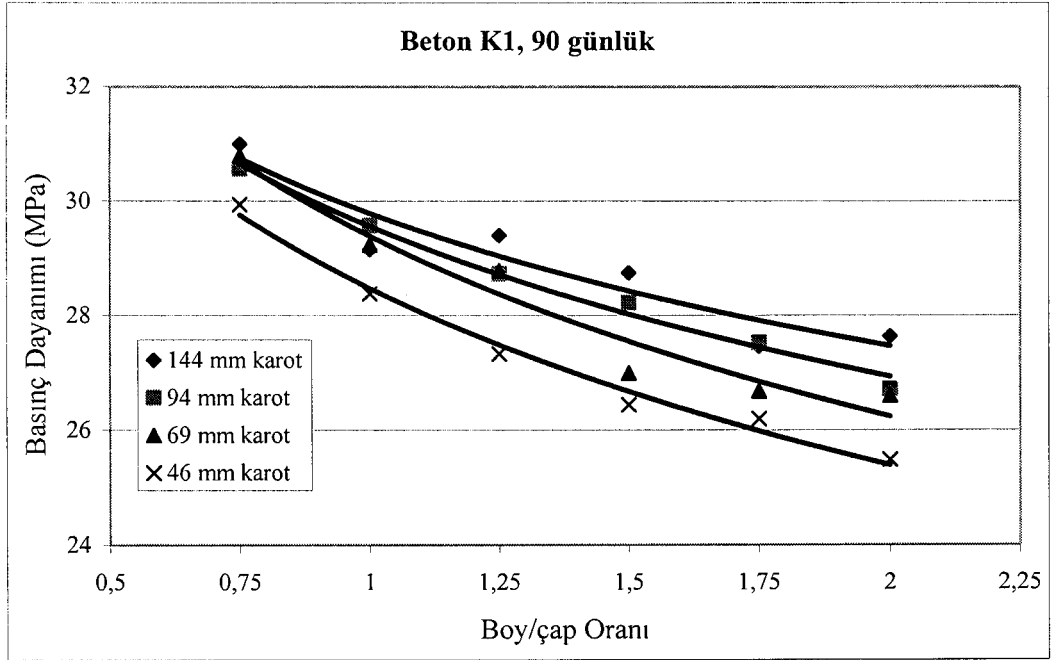
Deneyisel çalışmanın birinci bölümünde karot deneylerinde 4 farklı çapta karot numunesi alınmış ve numuneler her çap için 6 farklı boy/çap oranında test edilmişlerdir. Bu boy/çap oranları 2.0 ile 0.75 arasında değiştirilmiştir. Burada, standartlarda olmayan bir boy/çap oranı da kullanılmıştır. Standartlar karot boy/çap oranının 1.0'dan küçük olmamasını şart koşar. Deneylerde uç bir örnek olarak 0.75 boy/çap oranına sahip numuneler de test edilmiştir. Şekil 7.10-33, birinci bölümde gerçekleştirilen karot testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Bu grafiklerde gösterilen her bir basınç dayanımı değeri en az 6 adet karot numunesi basınç dayanımının ortalaması alınarak hesaplanmış, deney numunesi sayısı küçük çaplı karotlarda 20'ye kadar çıkmıştır.



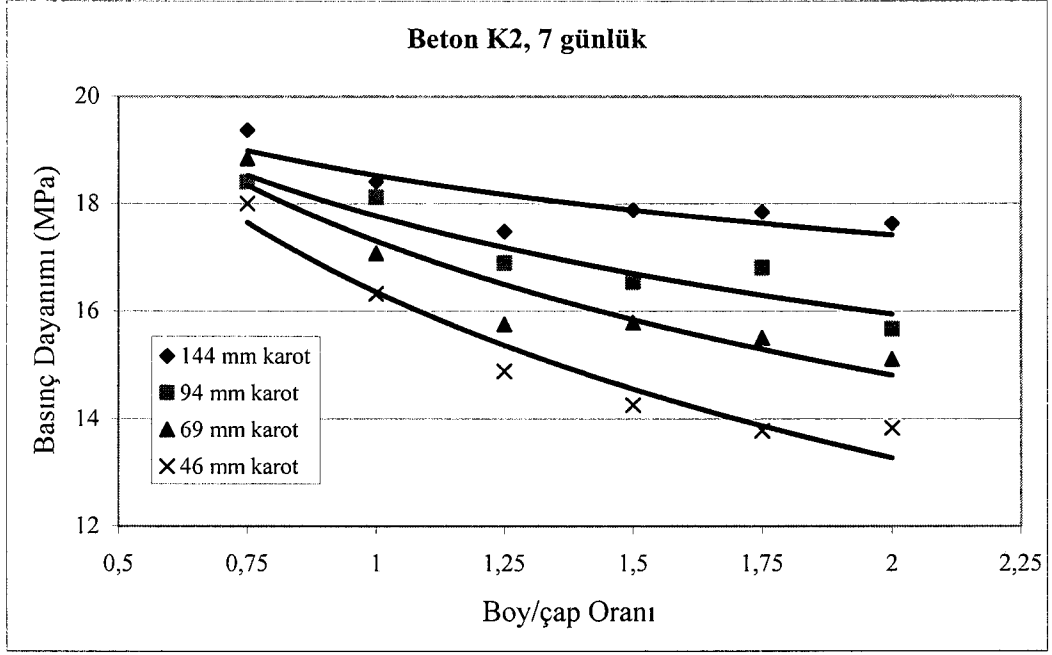
Şekil 7.10. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



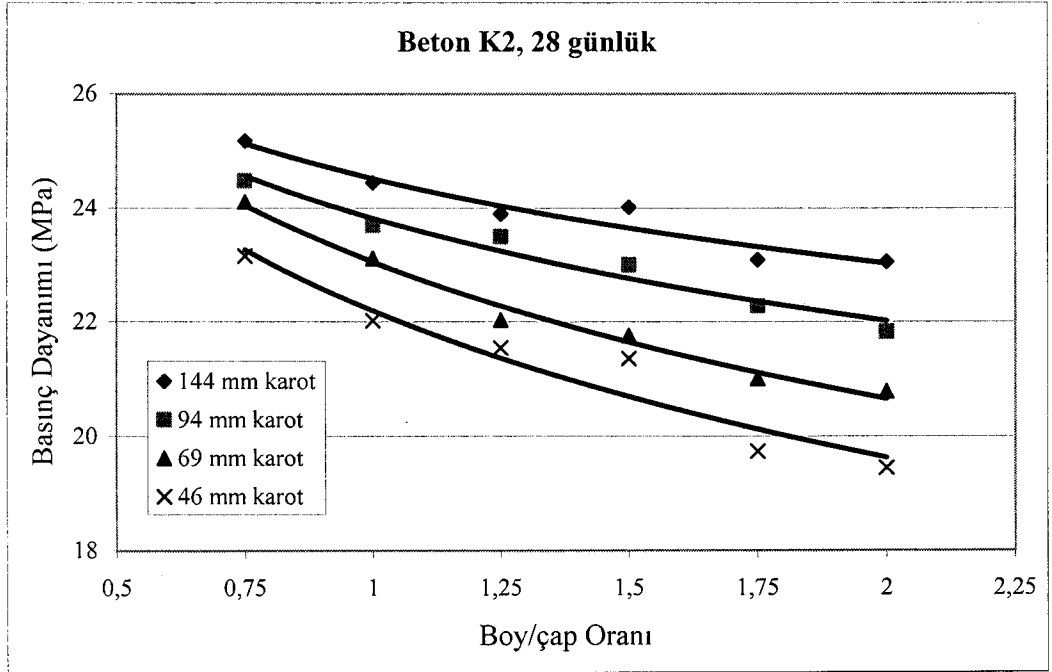
Şekil 7.11. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



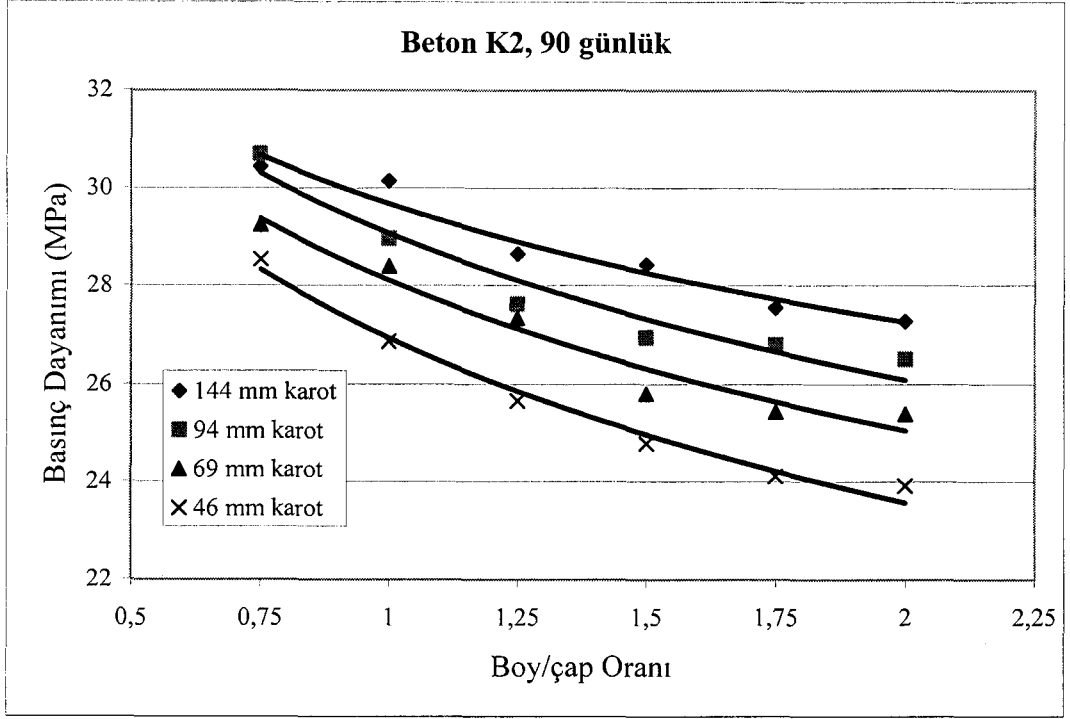
Şekil 7.12. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



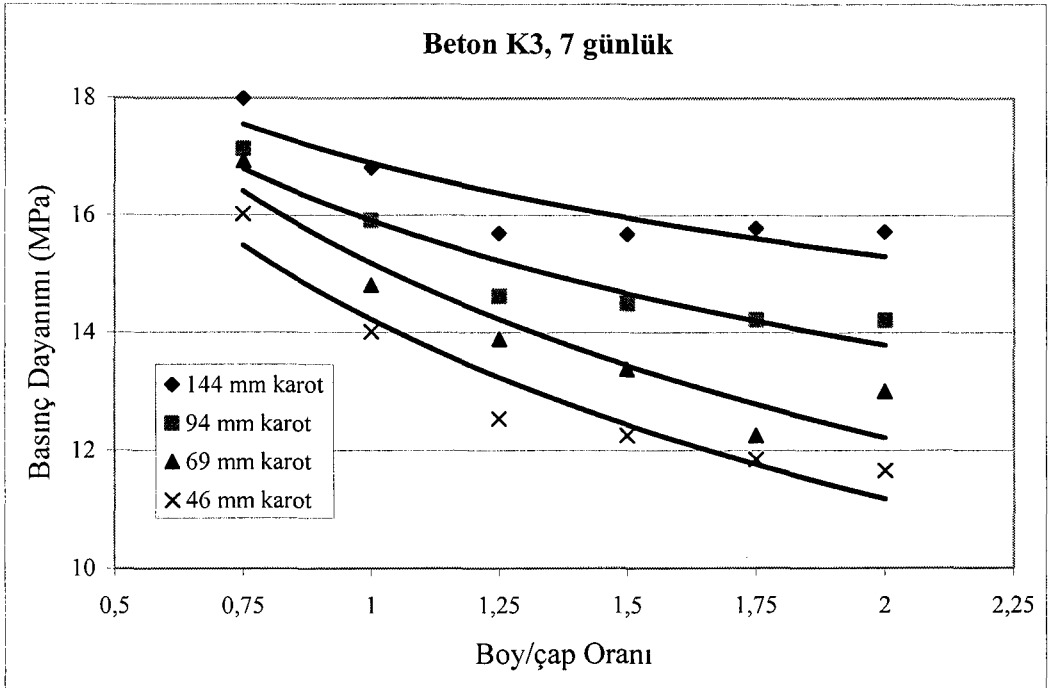
Şekil 7.13. Maksimum agrega tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



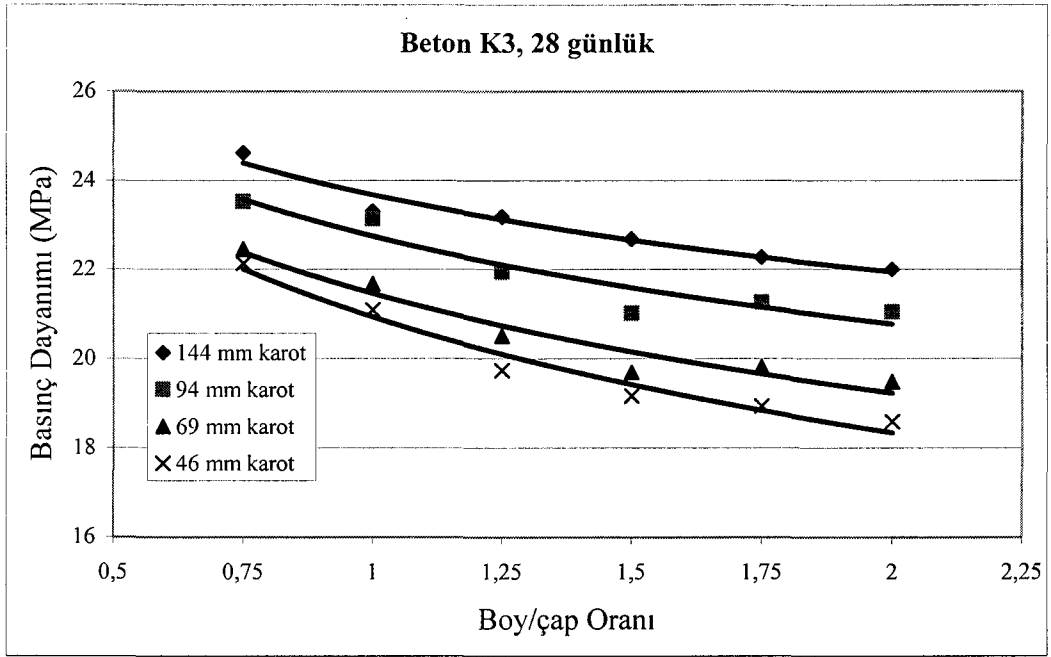
Şekil 7.14. Maksimum agrega tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



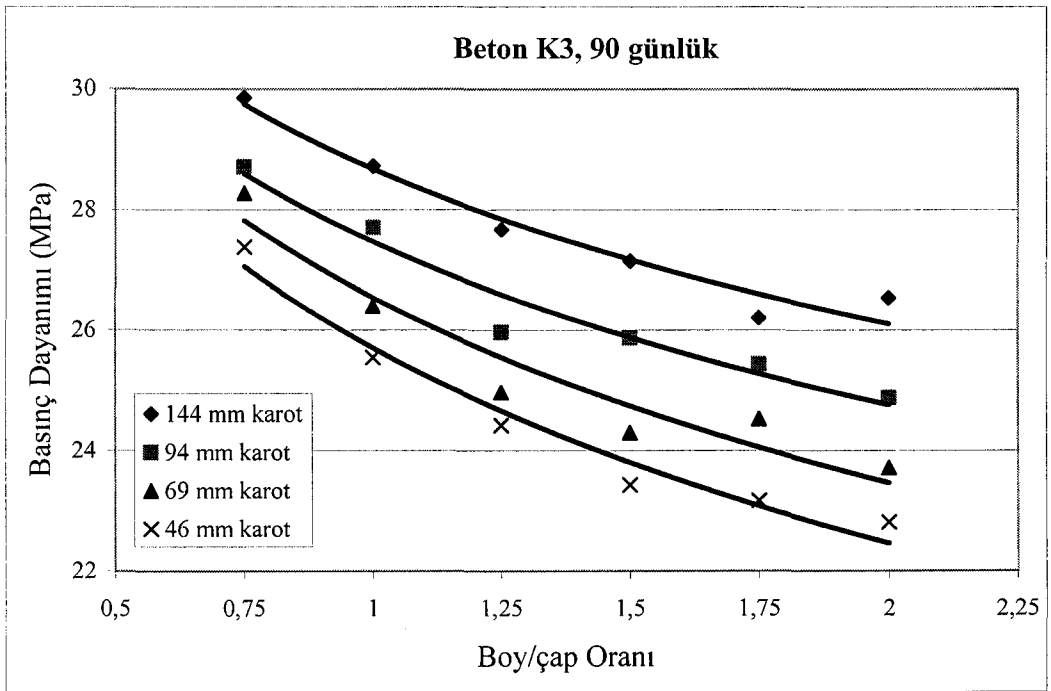
Şekil 7.15. Maksimum agrega tane boyutu 15 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basıñ dayanımları



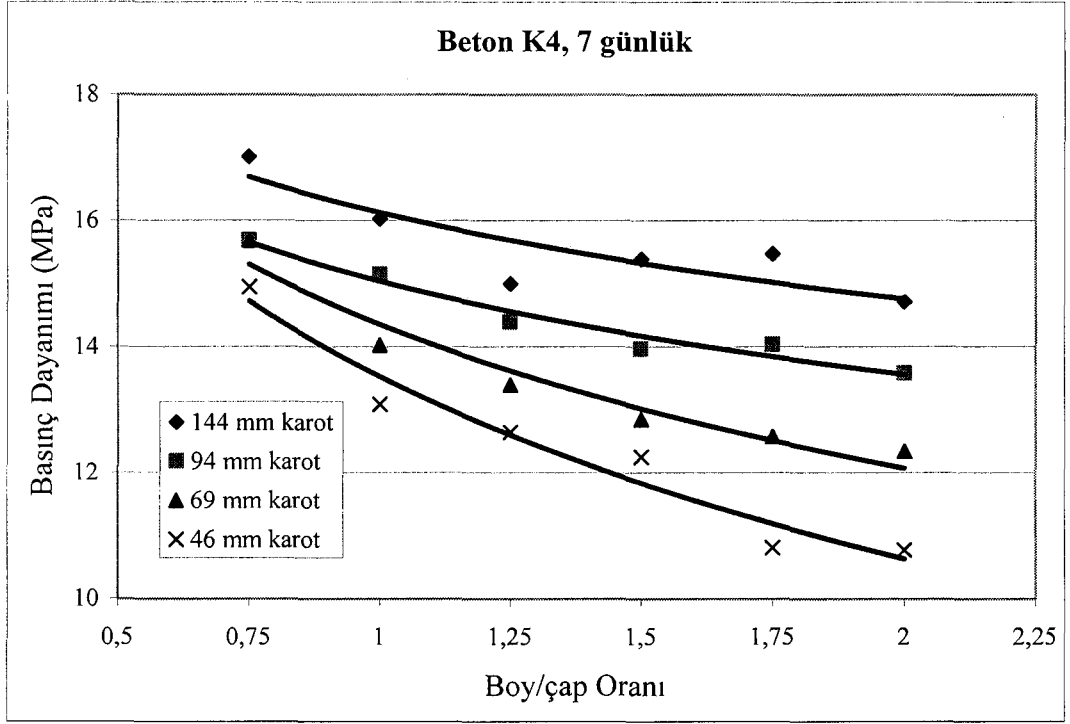
Şekil 7.16. Maksimum agrega tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basıñ dayanımları



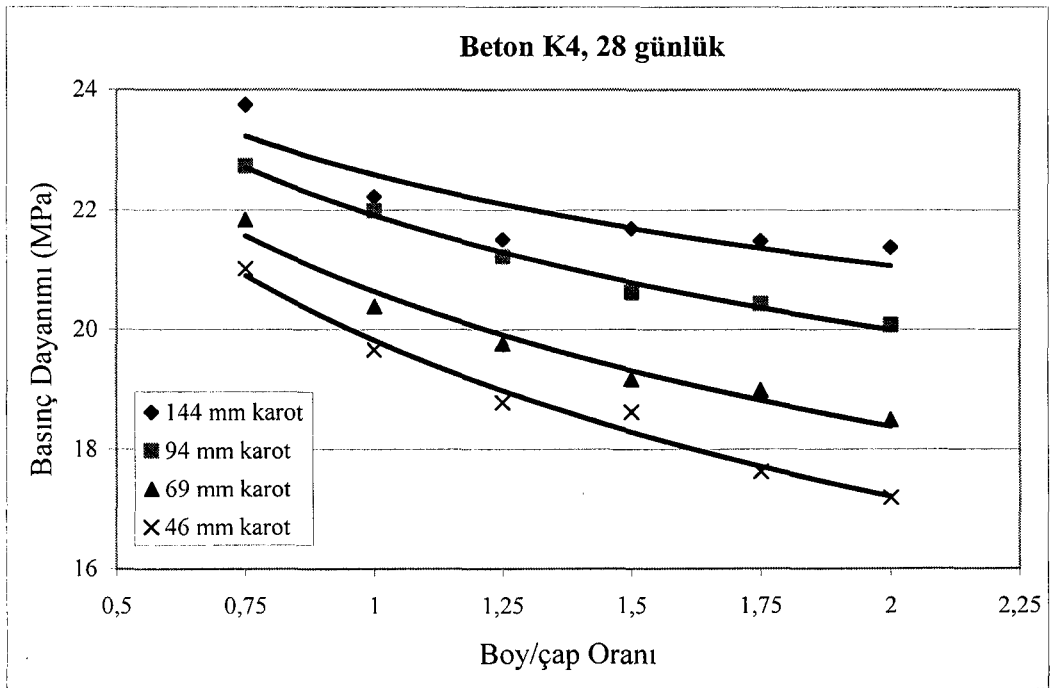
Şekil 7.17. Maksimum agrega tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



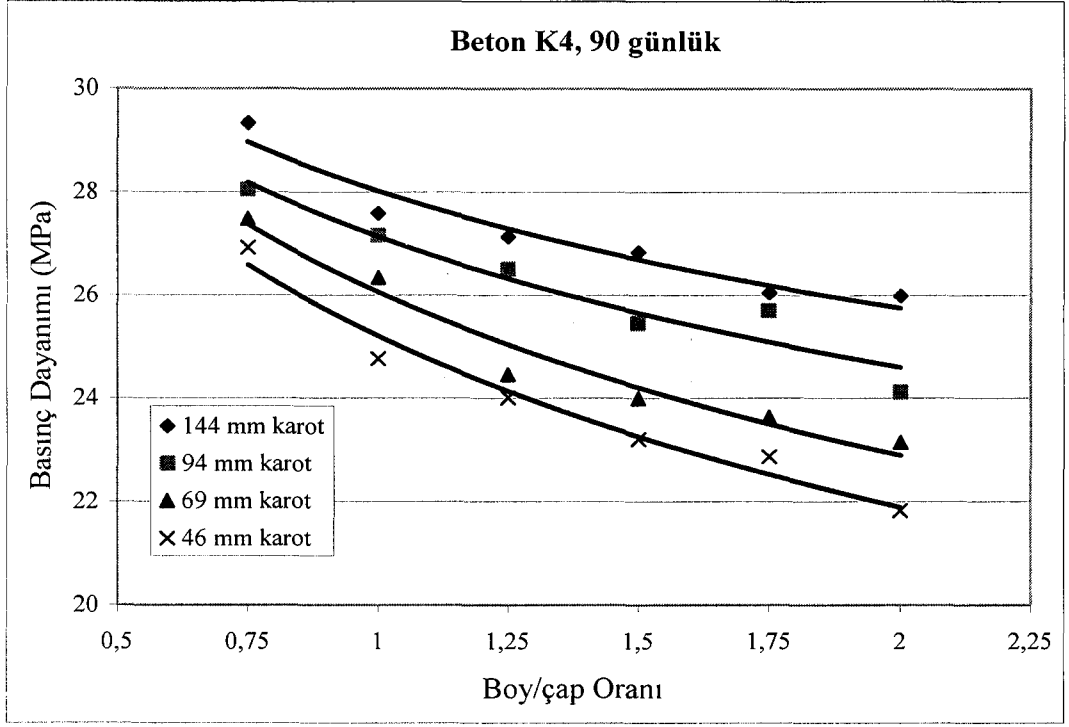
Şekil 7.18. Maksimum agrega tane boyutu 22 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



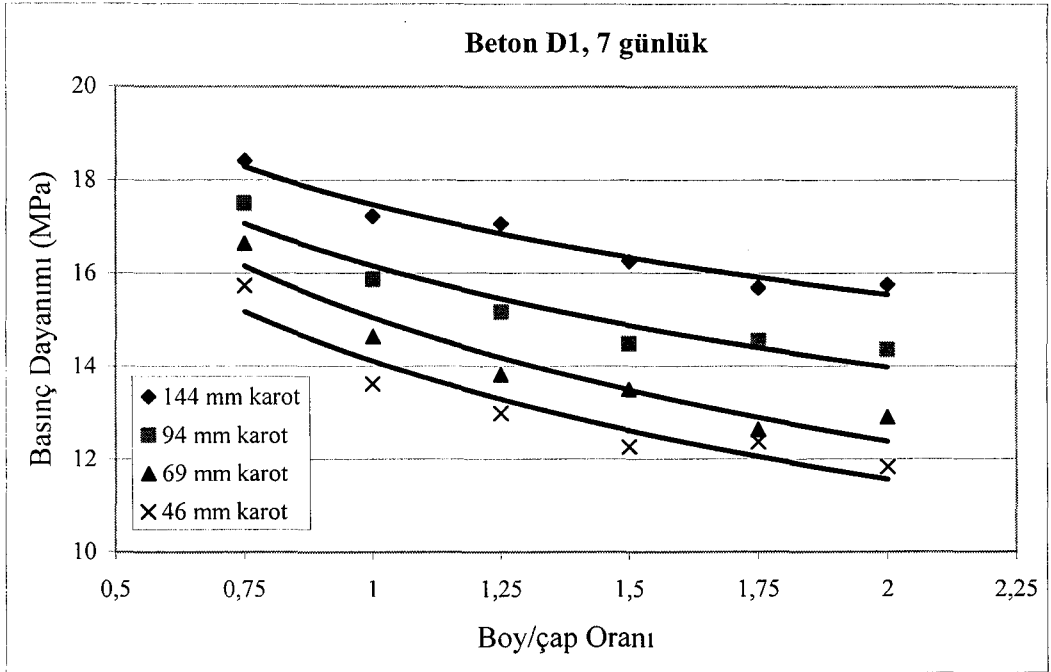
Şekil 7.19. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



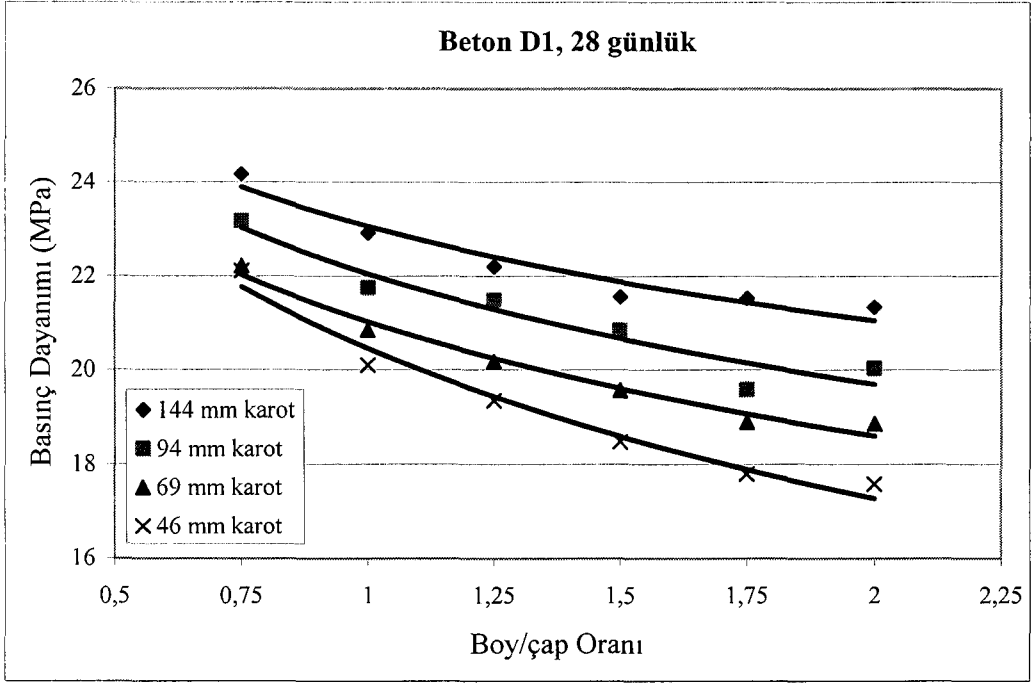
Şekil 7.20. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



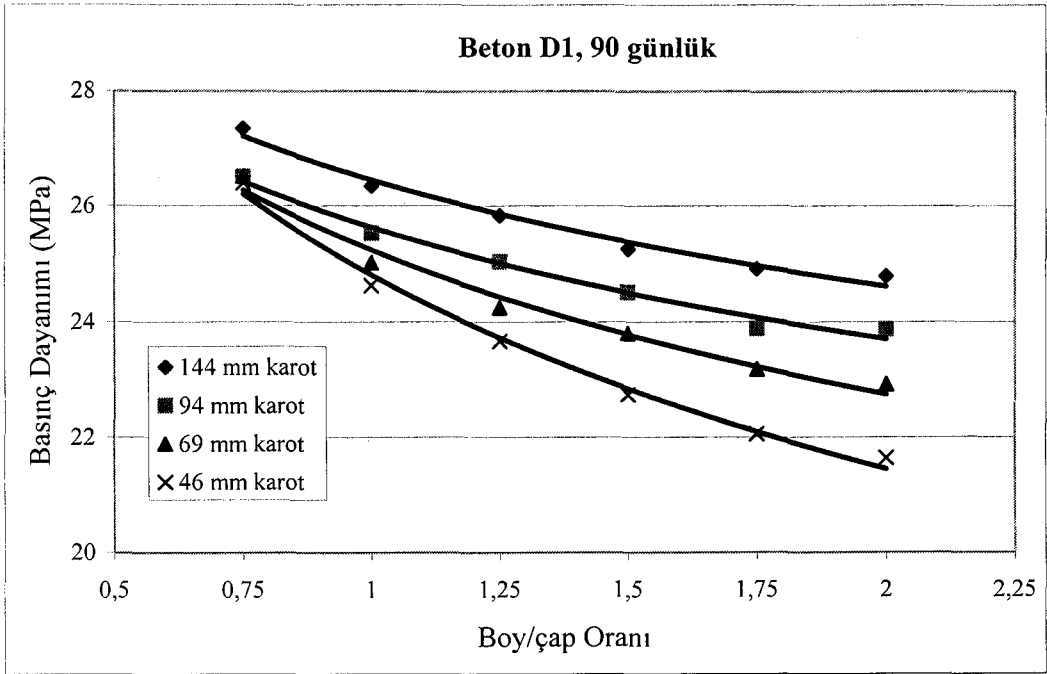
Şekil 7.21. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



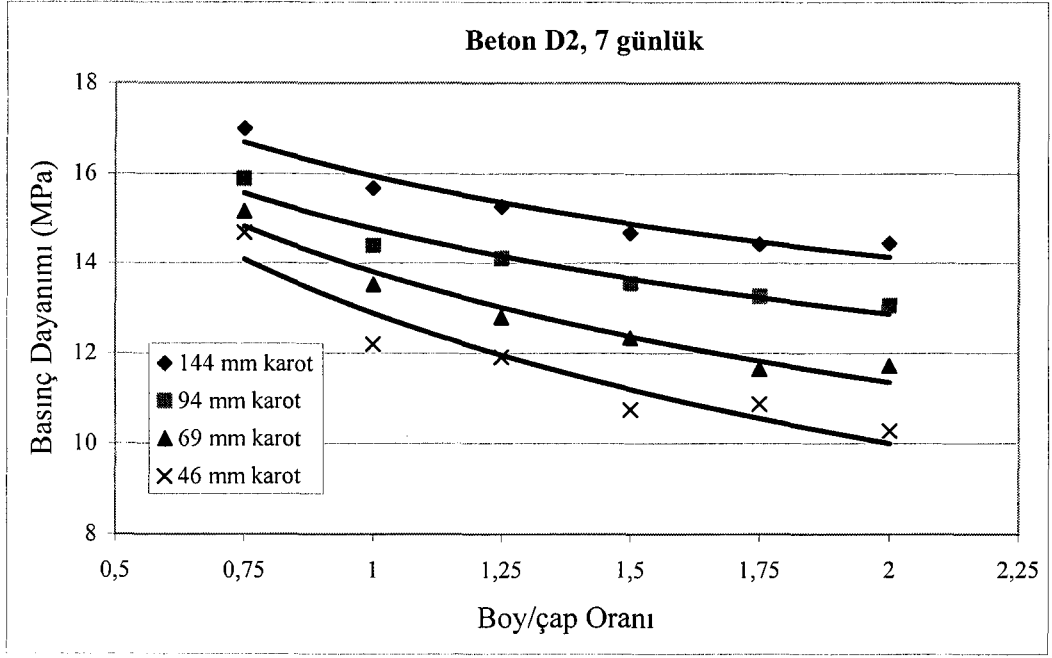
Şekil 7.22. Maksimum agrega tane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



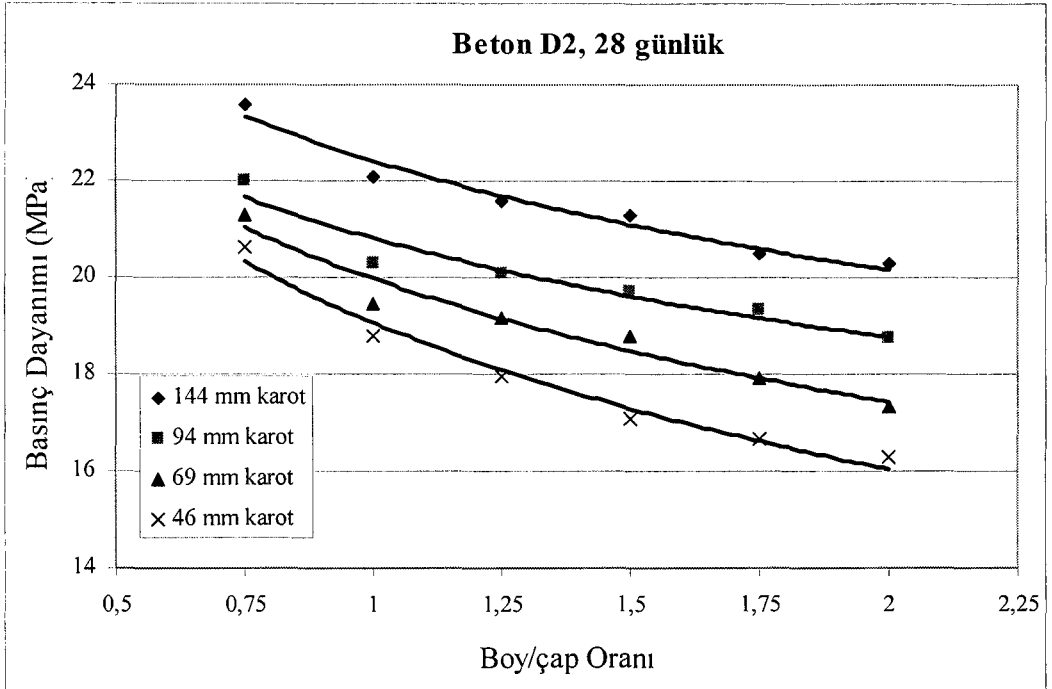
Şekil 7.23. Maksimum agregatane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



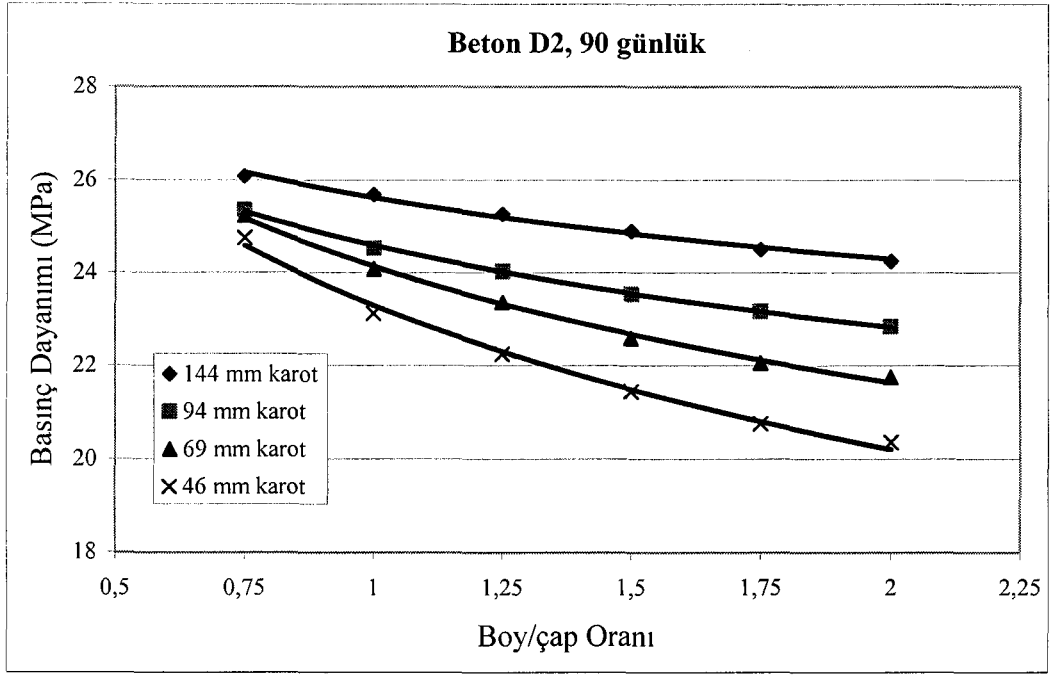
Şekil 7.24. Maksimum agregatane boyutu 10 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



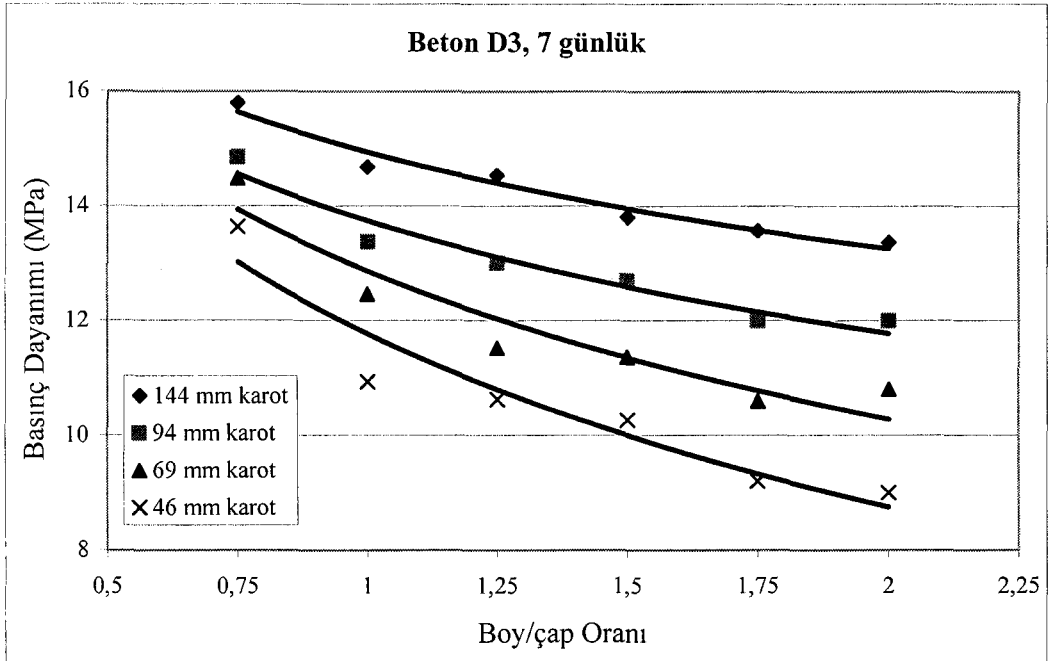
Şekil 7.25. Maksimum agregatane boyutu 15 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



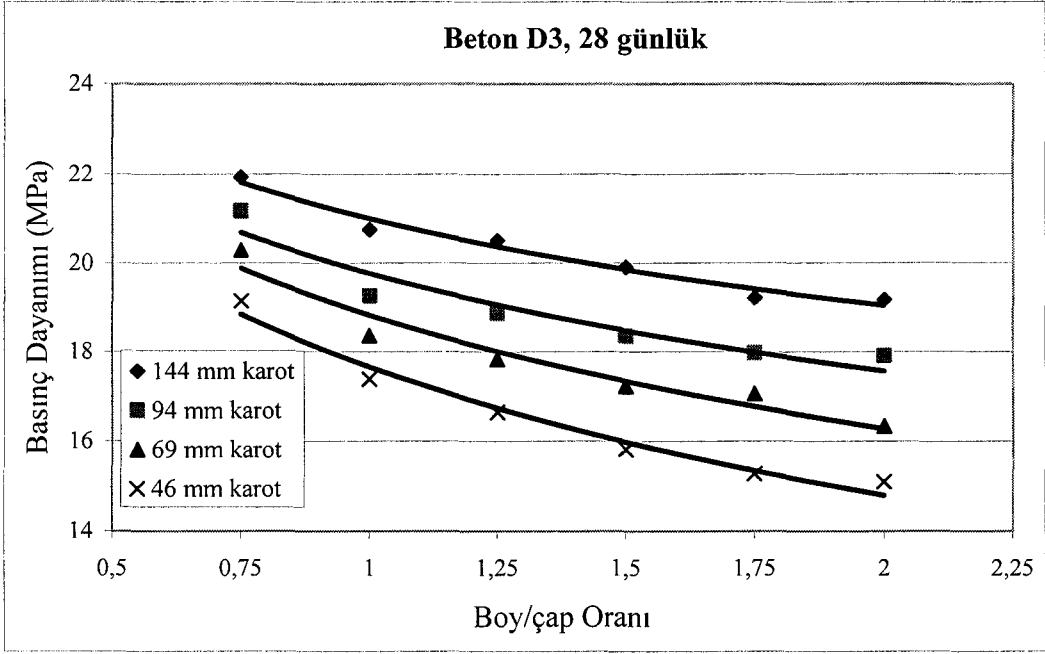
Şekil 7.26. Maksimum agregatane boyutu 15 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



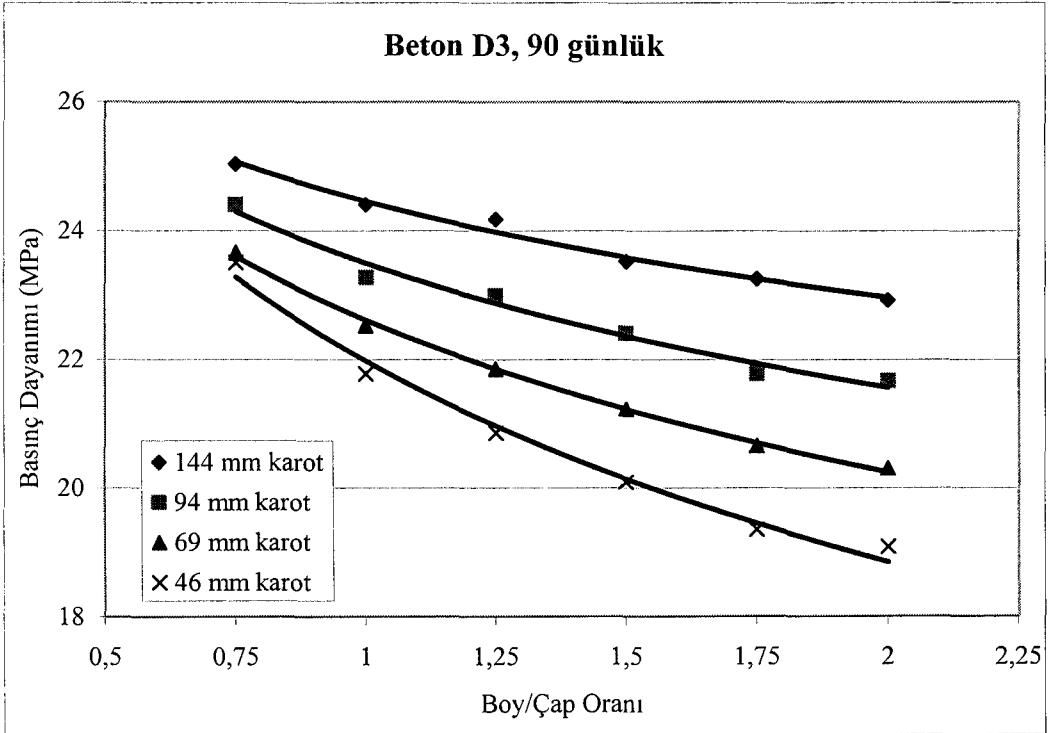
Şekil 7.27. Maksimum agregatane boyutu 15 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



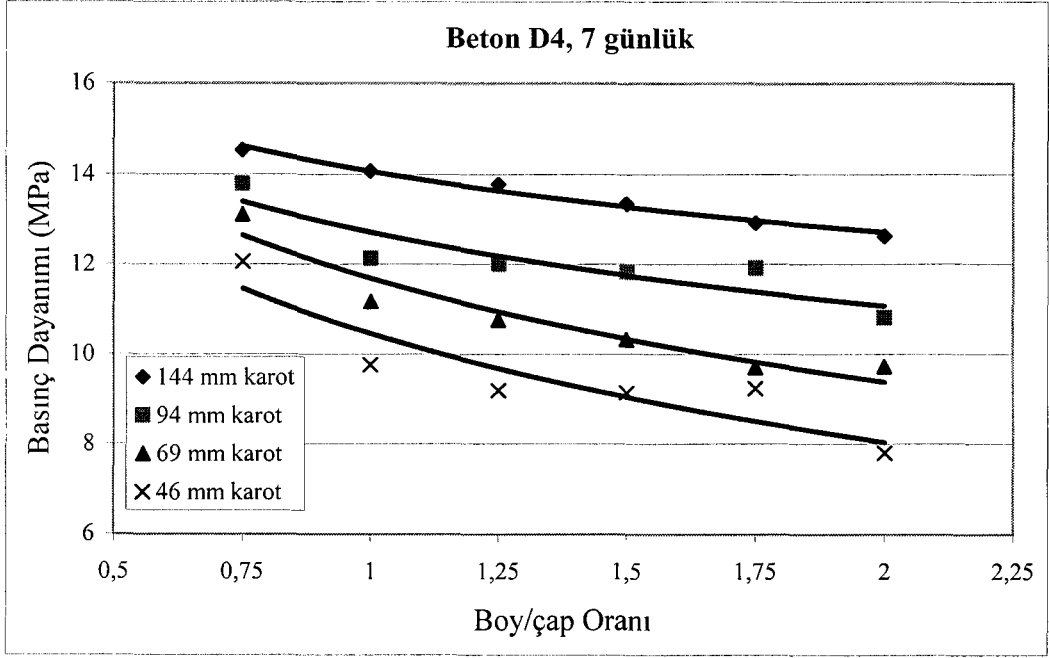
Şekil 7.28. Maksimum agregatane boyutu 22 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



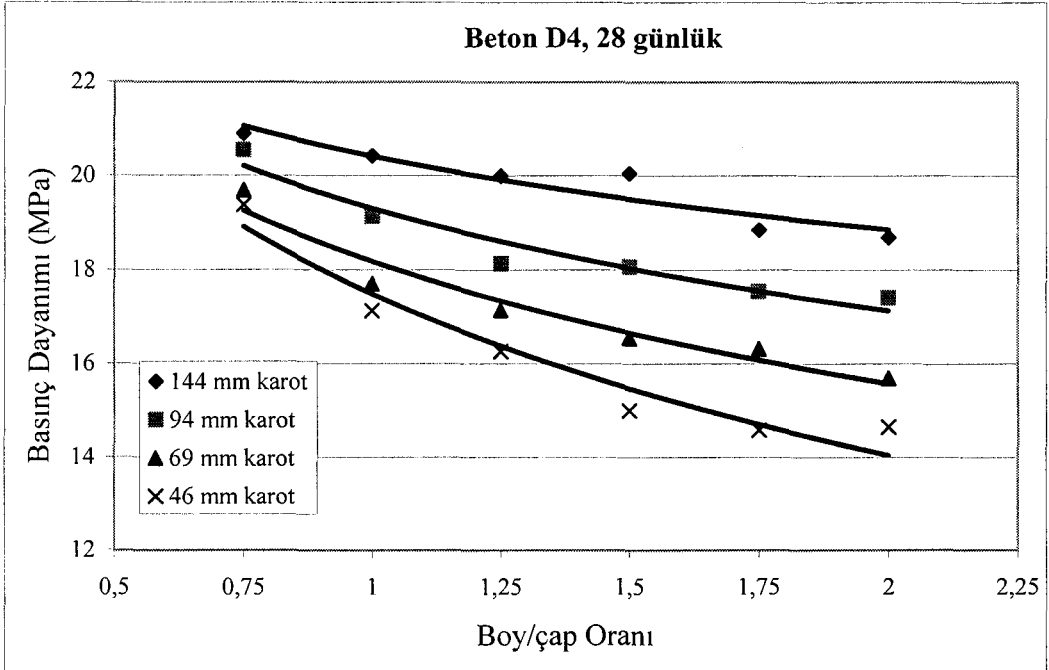
Şekil 7.29. Maksimum agrega tane boyutu 22 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



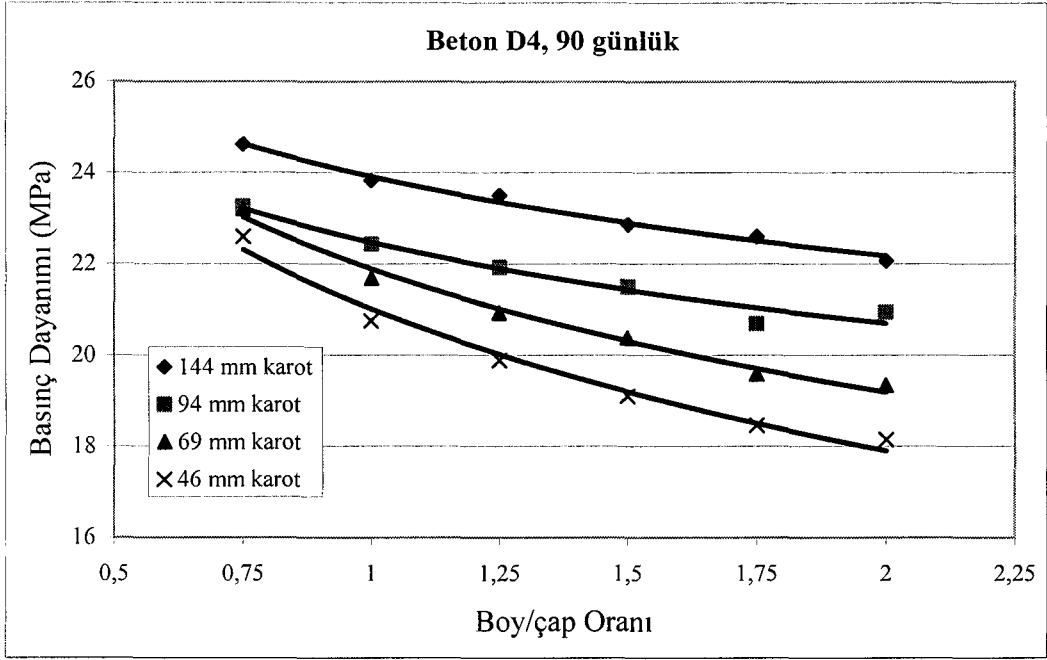
Şekil 7.30. Maksimum agrega tane boyutu 22 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları



Şekil 7.31. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları



Şekil 7.32. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları



Şekil 7.33. Maksimum agrega tane boyutu 30 mm olan dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin 90 günlük basınç dayanımları

7.2.1. Karot boy/çap oranının karot dayanımı üzerindeki etkisi

Boy/çap oranı karot numunesinin basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Boy/çap oranına kısaca karot numunesinin narinliği dendiği de olur. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde karot numuneleri için 2, 1,75, 1,5, 1,25, 1 ve 0,75 olmak üzere 6 farklı boy/çap oranı üzerinde çalışma yapılmıştır. Şekil 7.10-33'deki grafiklerden de görüleceği gibi, karot numunesinin boy/çap oranı azaldıkça basınç dayanımı artmaktadır. Bu durum silindir ve küp numunesi arasındaki farkın nedenleri ile açıklanabilir. Standart silindir numunelerin boy/çap oranı 2 olup standart küp numunelerin boy/çap oranı ise 1'dir. Küp numunenin dayanımının silindir numunenin dayanımına nazaran büyük olmasının nedeni de budur. Basınç dayanımı testi esnasında, küp numunelerde, deney numunesinin uçları deney makinesinin plakaları tarafından kısıtlandığında, numune tek eksenli basınç yükü altında olmasına rağmen uçlarda genişleyememektedir. Bu etki numunenin ortalarına doğru yaklaştıkça azalmaktadır. Silindir numunelerde, numunenin ortalarında bu etkinin olmadığı kabul edilmektedir. Bu nedenle, küp numunelerin basınç dayanımları silindir numunelerin basınç dayanımlarından

daha yüksek çıkmaktadır. Küp numuneler ile silindir numunelerin basıncı dayanımları arasındaki oran beton basıncı dayanımı seviyesine göre ve beton karışımına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Burada, karot numunelerinin boy/çap oranları azaldıkça, aynı mantıkla numunenin basıncı dayanımı artma eğilimi göstermektedir.

Ayrıca yine Griffith hipotezine göre, küçük numunelerin kusurlu kısım içerme olasılığı büyük numunelere nazaran daha düşüktür. Boy/ ap oranı küçük olan karot numunelerinin basıncı dayanımlarının daha yüksek olmasının nedenlerinden birisi de budur. Boy/ ap oranı küçük olan numuneler hacimsel olarak da daha küçüktür ve dolayısıyla kusur içerme olasılıkları da daha küçüktür. Bu nedenle basıncı dayanımları da daha yüksek olur.

Türk standartları, karot numunesinin basıncı dayanımı standart silindir numunesinin basıncı dayanımı ile kıyaslanacaksa, narinliğinin 2 olmasını, standart k p numunenin basıncı dayanımı ile kıyaslanacak ise narinliğinin 1 olmasını önermektedir. Amerikan ve İngiliz standartları farklı boy/çap oranları için düzeltme faktörleri vermişlerdir.    nk  bazen yapı elemanlarının boyutları boy/çap oranı için kısıtlayıcı faktör olabilmektedir. Örneğin, çoğu döşeme betonundan boy/çap oranı 2 olan karot numunesi alınamamaktadır. Bu durumda da herhangi bir boy/çap oranında hesaplanan karot basıncı dayanımının, boy/çap oranı 2 olan karot numunesinin basıncı dayanımına dönüştürülmesi gerekmektedir. Türk Standartlarında böyle bir düzeltme faktörü yeralmamaktadır. ASTM ve BS'de yeralan düzeltme faktörleri karot çapının ve karışımında kullanılan agreganın maksimum tane boyutunun etkisini doğal olarak gözetmemektedir.    nk  bu standartlara göre değerlendirme yapabilmek için karot çapı en az 100 mm olmalı ve maksimum agrega tane boyutu da karot çapının üçte birinden daha büyük olmamalıdır. Ancak her zaman bu sağlanamayabilmektedir. Bu durumda yorum yapabilmek için karot çapının ve maksimum agrega tane boyutunun etkisinin bilinmesine gereksinim vardır. Çizelge 7.7-18 her bir karışım için farklı çaplarda ve boy/çap oranı 2 olan standart boyutlu karot numunelerinin 7, 28, 90 günlük basıncı dayanımlarının, farklı boy/çap oranına sahip karot numunelerinin basıncı dayanımlarına oranlarını göstermektedir. Bir başka deyişle, bu oranlar, standartlarda da belirtilen bir nevi narinlik düzeltme faktörüdür.

Çizelge 7.7. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.98	0.98	0.98	0.93	0.91
Beton K2	1.00	0.99	0.99	1.01	0.96	0.91
Beton K3	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	0.87
Beton K4	1.00	0.95	0.96	0.98	0.92	0.86
Beton D1	1.00	1.00	0.97	0.92	0.91	0.86
Beton D2	1.00	1.00	0.98	0.95	0.92	0.85
Beton D3	1.00	0.99	0.97	0.92	0.91	0.85
Beton D4	1.00	0.98	0.95	0.92	0.90	0.87
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.8. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.94	0.95	0.93	0.93	0.89
Beton K2	1.00	1.00	0.96	0.96	0.94	0.92
Beton K3	1.00	0.99	0.97	0.95	0.94	0.89
Beton K4	1.00	0.99	0.99	0.99	0.96	0.90
Beton D1	1.00	0.99	0.99	0.96	0.93	0.88
Beton D2	1.00	0.99	0.95	0.94	0.92	0.86
Beton D3	1.00	1.00	0.96	0.93	0.92	0.87
Beton D4	1.00	0.99	0.93	0.93	0.92	0.89
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.9. Çapı 144 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	1.01	0.96	0.94	0.95	0.89
Beton K2	1.00	0.99	0.96	0.95	0.90	0.90
Beton K3	1.00	1.01	0.98	0.96	0.92	0.89
Beton K4	1.00	1.00	0.97	0.96	0.94	0.89
Beton D1	1.00	0.99	0.98	0.96	0.94	0.91
Beton D2	1.00	0.99	0.97	0.96	0.94	0.93
Beton D3	1.00	0.99	0.97	0.95	0.94	0.92
Beton D4	1.00	0.98	0.97	0.94	0.93	0.90
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.10. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.96	0.96	0.90	0.91	0.85
Beton K2	1.00	0.93	0.95	0.93	0.87	0.85
Beton K3	1.00	1.00	0.98	0.97	0.89	0.83
Beton K4	1.00	0.97	0.97	0.94	0.90	0.87
Beton D1	1.00	0.99	0.99	0.95	0.90	0.82
Beton D2	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.82
Beton D3	1.00	1.00	0.95	0.92	0.90	0.81
Beton D4	1.00	0.91	0.91	0.90	0.89	0.78
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.11. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	1.00	1.00	0.98	0.94	0.92
Beton K2	1.00	0.98	0.95	0.93	0.92	0.89
Beton K3	1.00	0.99	1.00	0.96	0.91	0.89
Beton K4	1.00	0.98	0.97	0.95	0.91	0.88
Beton D1	1.00	1.02	0.96	0.93	0.92	0.86
Beton D2	1.00	0.97	0.95	0.93	0.92	0.85
Beton D3	1.00	1.00	0.98	0.95	0.93	0.85
Beton D4	1.00	0.99	0.96	0.96	0.91	0.85
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.12. Çapı 94 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.97	0.95	0.93	0.90	0.87
Beton K2	1.00	0.99	0.98	0.96	0.92	0.86
Beton K3	1.00	0.98	0.96	0.96	0.90	0.87
Beton K4	1.00	0.94	0.95	0.91	0.89	0.86
Beton D1	1.00	1.00	0.97	0.95	0.94	0.90
Beton D2	1.00	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90
Beton D3	1.00	0.99	0.97	0.94	0.93	0.89
Beton D4	1.00	1.01	0.97	0.96	0.93	0.90
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.13. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.99	0.99	0.94	0.89	0.81
Beton K2	1.00	0.97	0.96	0.96	0.89	0.80
Beton K3	1.00	1.06	0.97	0.94	0.88	0.77
Beton K4	1.00	0.98	0.96	0.92	0.88	0.79
Beton D1	1.00	1.02	0.96	0.93	0.88	0.78
Beton D2	1.00	1.01	0.95	0.92	0.87	0.77
Beton D3	1.00	1.02	0.95	0.94	0.87	0.75
Beton D4	1.00	1.00	0.94	0.90	0.87	0.74
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.14. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.96	0.94	0.92	0.91	0.87
Beton K2	1.00	0.99	0.95	0.94	0.90	0.86
Beton K3	1.00	0.98	0.99	0.95	0.90	0.87
Beton K4	1.00	0.97	0.96	0.94	0.91	0.85
Beton D1	1.00	1.00	0.96	0.93	0.91	0.85
Beton D2	1.00	0.97	0.92	0.91	0.89	0.81
Beton D3	1.00	0.96	0.95	0.92	0.89	0.81
Beton D4	1.00	0.96	0.95	0.92	0.89	0.80
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.15. Çapı 69 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	1.00	0.99	0.92	0.91	0.86
Beton K2	1.00	1.00	0.98	0.93	0.89	0.87
Beton K3	1.00	0.97	0.98	0.95	0.90	0.84
Beton K4	1.00	0.98	0.96	0.95	0.88	0.84
Beton D1	1.00	0.99	0.96	0.95	0.92	0.86
Beton D2	1.00	0.99	0.96	0.93	0.90	0.86
Beton D3	1.00	0.98	0.96	0.93	0.90	0.86
Beton D4	1.00	0.99	0.95	0.92	0.89	0.83
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.16. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.95	0.94	0.91	0.86	0.78
Beton K2	1.00	1.00	0.97	0.93	0.85	0.77
Beton K3	1.00	0.98	0.95	0.93	0.83	0.73
Beton K4	1.00	1.00	0.88	0.85	0.82	0.72
Beton D1	1.00	0.96	0.96	0.91	0.87	0.75
Beton D2	1.00	0.95	0.96	0.86	0.84	0.70
Beton D3	1.00	0.98	0.88	0.85	0.82	0.66
Beton D4	1.00	0.85	0.85	0.85	0.80	0.65
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.17. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (28 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.99	0.94	0.91	0.90	0.85
Beton K2	1.00	0.99	0.91	0.90	0.88	0.84
Beton K3	1.00	0.98	0.97	0.94	0.88	0.84
Beton K4	1.00	0.98	0.92	0.92	0.87	0.82
Beton D1	1.00	0.99	0.95	0.91	0.88	0.80
Beton D2	1.00	0.98	0.95	0.91	0.87	0.79
Beton D3	1.00	0.99	0.95	0.91	0.87	0.79
Beton D4	1.00	1.00	0.98	0.90	0.86	0.76
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Çizelge 7.18. Çapı 46 mm olan karotlar için narinlik düzeltme faktörleri (90 günlük)

Karışım	Boy/çap Oranı					
	2.00	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Beton K1	1.00	0.97	0.96	0.93	0.90	0.85
Beton K2	1.00	0.99	0.97	0.93	0.89	0.84
Beton K3	1.00	0.98	0.97	0.93	0.89	0.83
Beton K4	1.00	0.95	0.94	0.91	0.88	0.81
Beton D1	1.00	0.98	0.95	0.91	0.88	0.82
Beton D2	1.00	0.98	0.95	0.92	0.88	0.82
Beton D3	1.00	0.99	0.95	0.91	0.88	0.81
Beton D4	1.00	0.98	0.95	0.91	0.87	0.80
ASTM	1.00	0.98	0.96	0.93	0.87	-
BS	1.00	0.97	0.92	0.87	0.80	-

Narinlik düzeltme faktörü ASTM Standardlarında 1.0'den başlayıp 0,87'ye kadar düşmekte, İngiliz Standardlarında ise bu oran 1.0'den başlayıp 0.80'e kadar azalmaktadır. Türk Standardlarında yeni yürürlüğe giren TS EN 12504-1 standardında, boy/çap oranlarının dayanım sonuçları silindir dayanımına dönüştürülecekse 2.0, küp dayanımına dönüştürülecekse 1.0 olarak seçilmesi tavsiye edilmiştir. Bu çalışma sonucunda hesaplanan narinlik düzeltme faktörleri büyük çaplı karot numuneleri için standartlara göre biraz daha yüksek olarak bulunmuştur. Yani standartlar daha emin durumda çalışmaktadır. Özellikle İngiliz standartları boy/çap oranı 1.0'e düşünce bu dayanımı 0.8 ile çarpmaktadır. Bu oldukça emin bir durumdur. Küçük çaplı numunelerin sonuçlarına baktığımızda ASTM standartlarının verdiği değerlerle benzerlik göze çarpmaktadır. Örneğin, dere agregası ile üretilen Beton D4 karışımından alınan 46 mm çaplı karot ve boy/çap oranı 1.0 için bu oran 0.87 (90 günlük değer) olmuştur. Bu da ASTM standartlarında verilen değerle aynıdır.

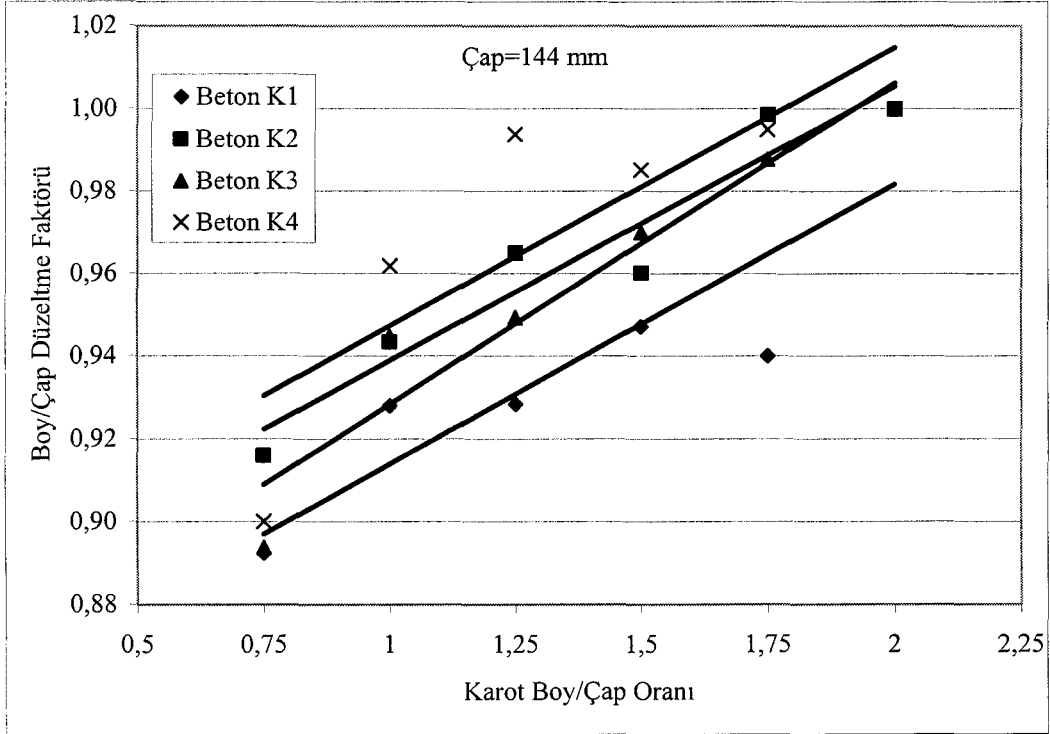
Hem BS hem de ASTM Standardlarında önerilen değerler deneysel çalışmada bulunan değerlere göre bir miktar daha düşüktür. Buna göre Standartlar daha emin durumda çalışmaktadır. ASTM standartlarına en çok yaklaşan değerler karot çapı 46 mm olan numuneler üzerinde elde edilmiştir. Karot çapı azaldıkça narinlik düzeltme faktöründe de bir miktar azalma gözlenmektedir. Bir başka deyişle boy/çap oranının etkisi karot çapı azaldıkça artmaktadır. Örneğin 90 günlük karotlar üzerinde yapılan deneylerde boy/çap oranı 1 olan karotlar için düzeltme faktörleri 144 mm, 94 mm, 69 mm ve 46 mm çapındaki karotlar için sırasıyla 0.90-0.95, 0.89-0.93, 0.88-0.92 ve 0.87-0.90 aralıklarında değişmiştir.

Agrega çeşidinin narinlik düzeltme faktörü üzerinde belirgin bir etkisi görülmemekle beraber, küçük çaplı karotlarda dere agregası ile üretilen betonlardan elde edilen numunelerin narinlik düzeltme faktörlerinin bir miktar daha düşük oldukları gözlemlenmiştir. Bu da küçük çaplı karotlar için narinliğin, dere agregası kullanılan betonlarda daha etkili olduğu anlamına gelir.

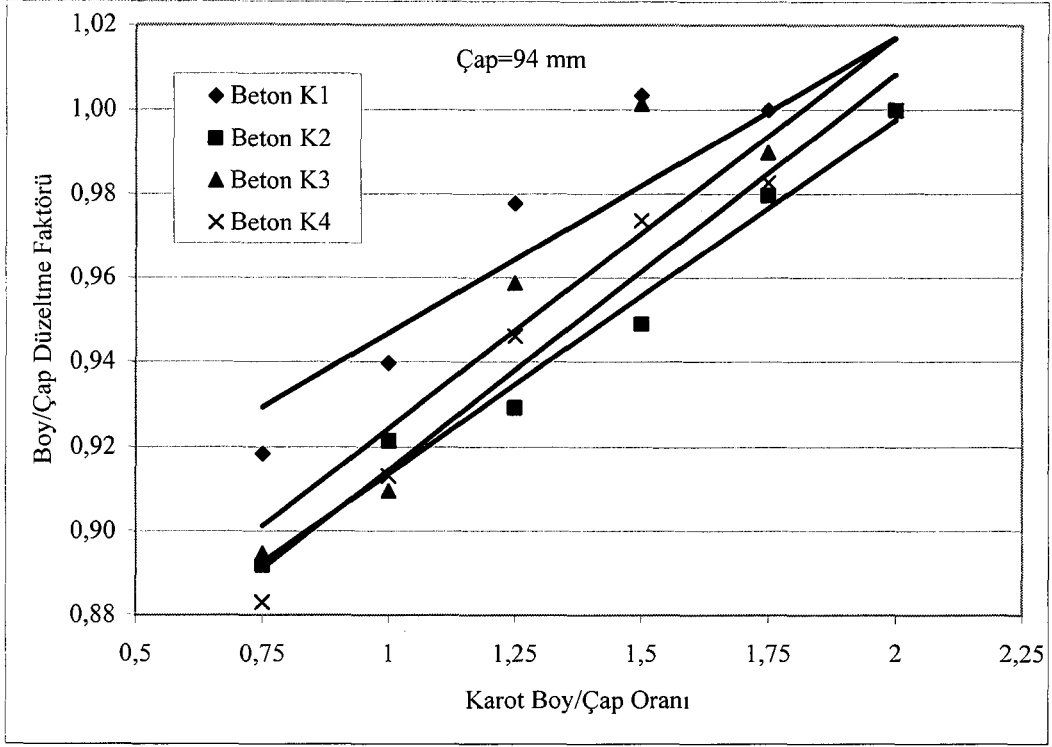
Standartlar, boy/çap oranı 1.0'den küçük olan karotların kullanılmamasını tavsiye eder. Burada standartların en büyük kuşkusu böyle bir numunenin dayanımının çok yüksek çıkarak değerlendirmeyi zorlaştırmasıdır. Ayrıca yine,

boy/çap oranı 1'den küçük olan numunelerin dayanımlarının daha değişken olabileceği belirtilmektedir. Bu çalışmada 0.75 gibi 1.0'den oldukça küçük bir oran da denenmiş ve özellikle büyük çaplı karot numunelerinde büyük farklara rastlanmamıştır. Ancak, bu durum küçük çaplı numunelerde göze batmaktadır. Bir başka deyişle, küçük çaplı numunelerin boy/çap oranları 1.0'dan 0.75'e düştüğünde dayanımlar arasında büyük farklar gözlenebilmektedir. Örneğin, 90 günlük betonlar için, dere agregası ile üretilen Beton D4 karışımından alınan 46 mm çaplı karotların boy/çap oranı 1.0'den 0.75'e düştüğünde, hesaplanan narinlik oranı 0,87'den 0.80'e düşmektedir. Bu nedenle, bu küçük boy/çap oranı ile ilgili daha kapsamlı araştırmaların yapılması yerinde olacaktır.

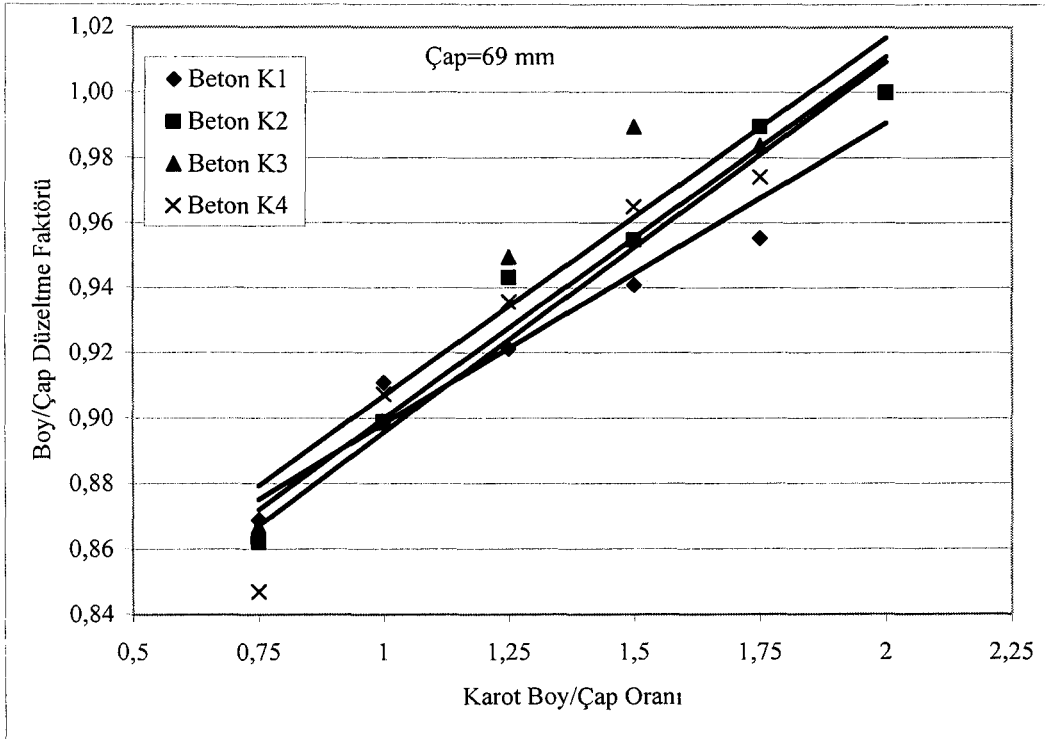
Karot boy/çap oranı için çizelgelerde belirtilen düzeltme faktörleri için, 28 günlük değerlerin doğrusal regresyon analizi yapılacak olursa, Şekil 7.34-41'de gösterilen ilişkiler elde edilebilir. Bu ilişkilerin formülleri ve ilişkilere ait R^2 değerleri de Çizelge 7.19-22'de özetlenmiştir.



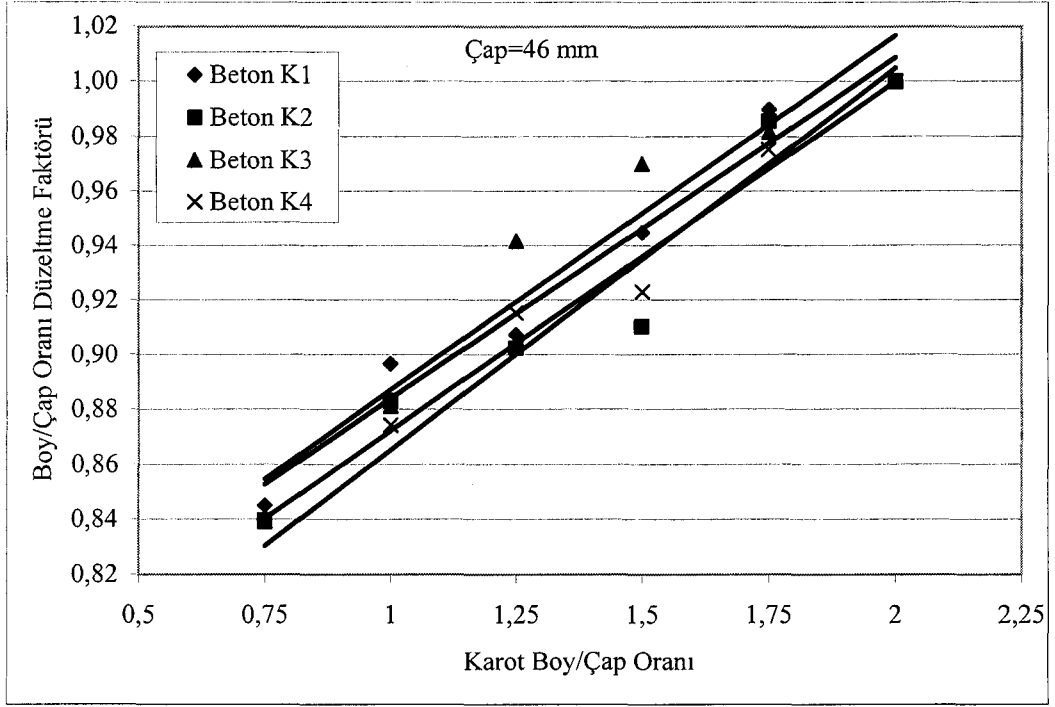
Şekil 7.34. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 144 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



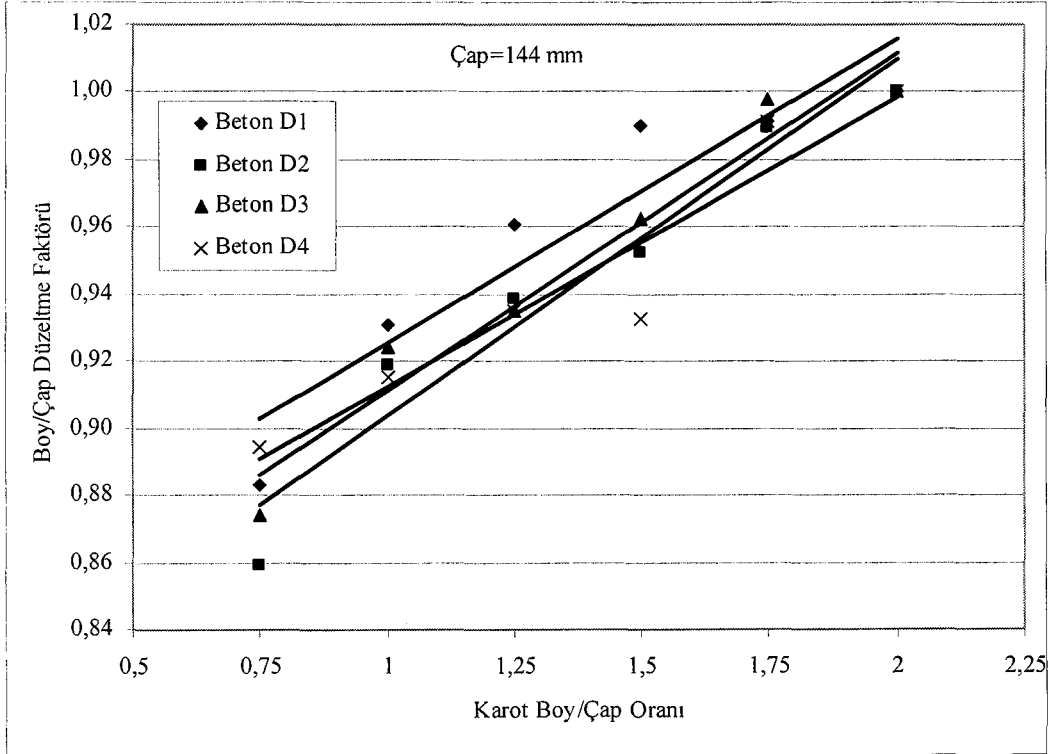
Şekil 7.35. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



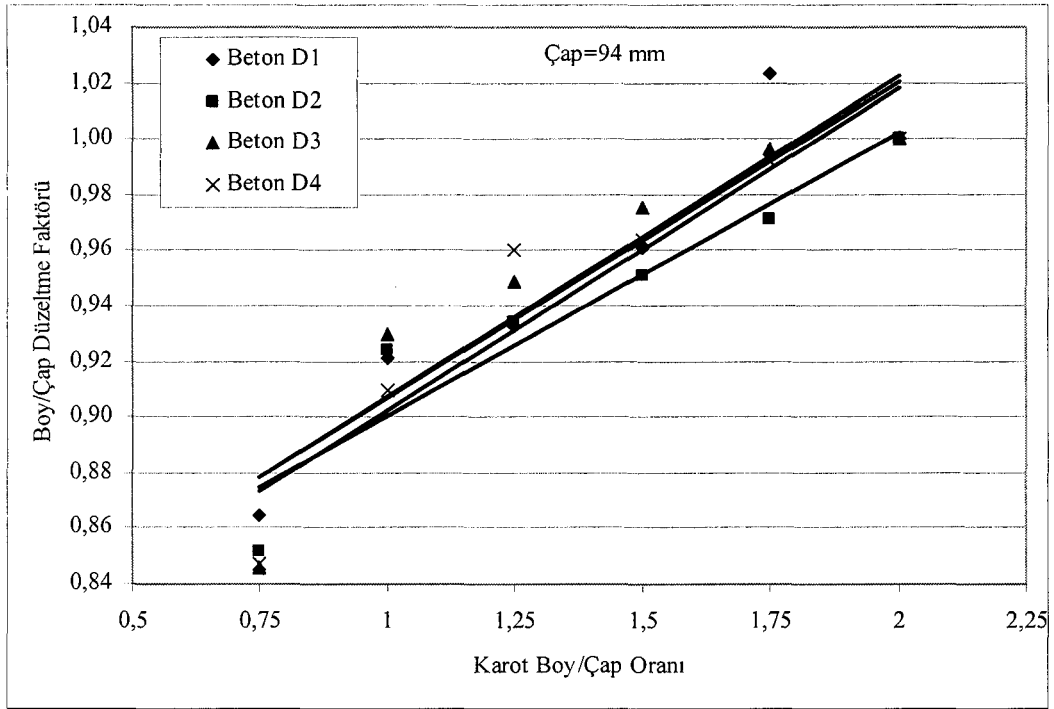
Şekil 7.36. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 69 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



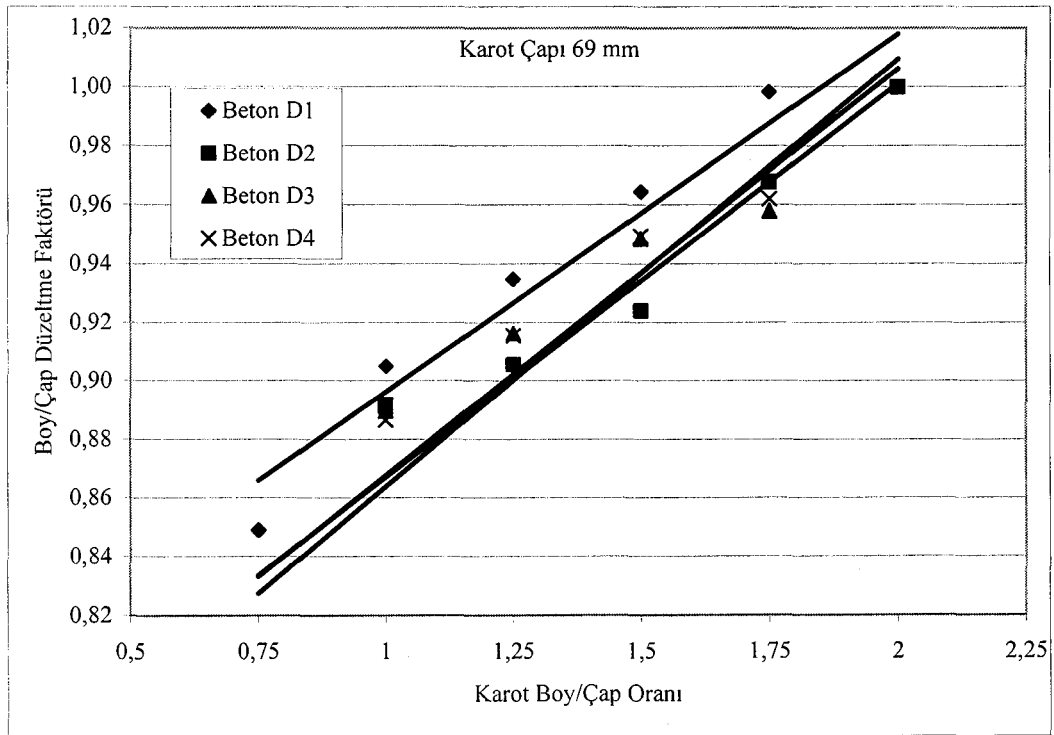
Şekil 7.37. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan 46 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



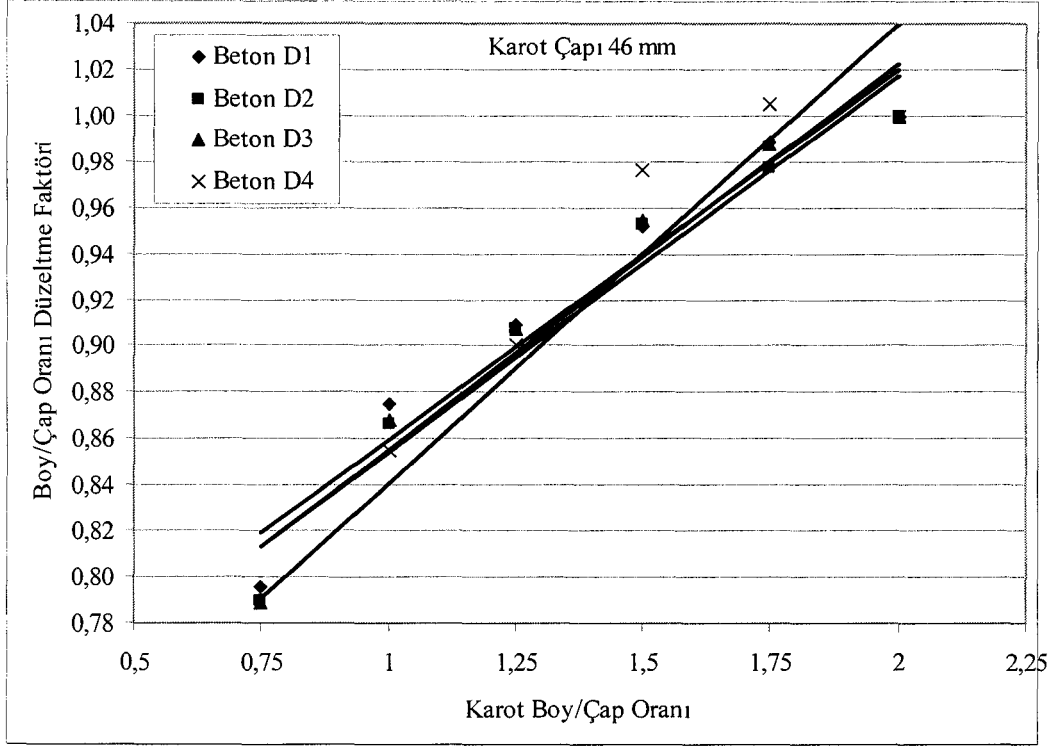
Şekil 7.38. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 144 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



Şekil 7.39. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



Şekil 7.40. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 69 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi



Şekil 7.41. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan 46 mm çapındaki karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizi

Çizelge 7.19. Çapı 144 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri

Karışım	Karot Çapı 144 mm	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	$DF = 0.0678(B/Ç) + 0.8462$	0.8113
Beton K2	$DF = 0.0664(B/Ç) + 0.8726$	0.9202
Beton K3	$DF = 0.0778(B/Ç) + 0.8506$	0.9235
Beton K4	$DF = 0.0675(B/Ç) + 0.8799$	0.6881
Beton D1	$DF = 0.0909(B/Ç) + 0.8344$	0.8800
Beton D2	$DF = 0.1062(B/Ç) + 0.7971$	0.9404
Beton D3	$DF = 0.1003(B/Ç) + 0.8110$	0.9507
Beton D4	$DF = 0.0861(B/Ç) + 0.8264$	0.9139

DF : Düzeltme faktörü

B/Ç : Karot numunesinin boy/çap oranı

Çizelge 7.20. Çapı 94 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri

Karışım	Karot Çapı 94 mm	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	$DF = 0.0702(B/Ç) + 0.8766$	0.8306
Beton K2	$DF = 0.0840(B/Ç) + 0.8297$	0.9808
Beton K3	$DF = 0.0925(B/Ç) + 0.8319$	0.8511
Beton K4	$DF = 0.0938(B/Ç) + 0.8208$	0.9641
Beton D1	$DF = 0.1155(B/Ç) + 0.7916$	0.8918
Beton D2	$DF = 0.1025(B/Ç) + 0.7977$	0.9048
Beton D3	$DF = 0.1141(B/Ç) + 0.7926$	0.8585
Beton D4	$DF = 0.1158(B/Ç) + 0.7863$	0.8848

DF : Düzeltme faktörü

B/Ç : Karot numunesinin boy/çap oranı

Çizelge 7.21. Çapı 69 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri

Karışım	Karot Çapı 69 mm	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	$DF = 0.0923(B/Ç) + 0.8059$	0.9543
Beton K2	$DF = 0.1111(B/Ç) + 0.7887$	0.9640
Beton K3	$DF = 0.1098(B/Ç) + 0.7970$	0.8959
Beton K4	$DF = 0.1137(B/Ç) + 0.7818$	0.9360
Beton D1	$DF = 0.1216(B/Ç) + 0.7748$	0.9463
Beton D2	$DF = 0.1340(B/Ç) + 0.7331$	0.9475
Beton D3	$DF = 0.1384(B/Ç) + 0.7294$	0.9204
Beton D4	$DF = 0.1456(B/Ç) + 0.7183$	0.9191

DF : Düzeltme faktörü

B/Ç : Karot numunesinin boy/çap oranı

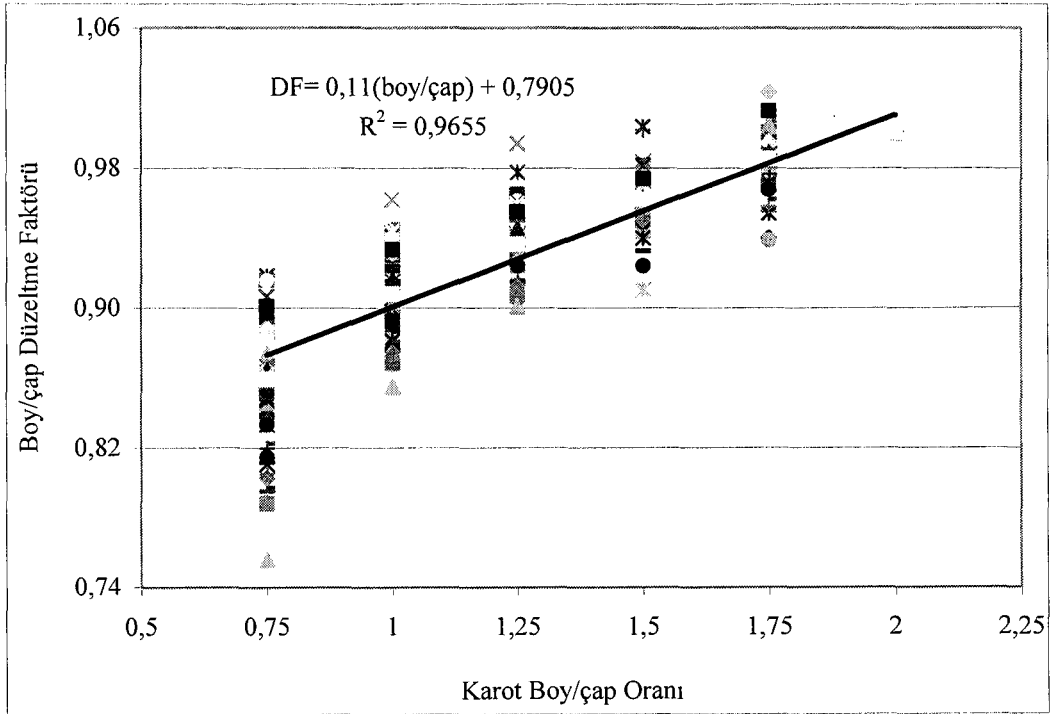
Çizelge 7.22. Çapı 46 mm olan karotların boy/çap oranı düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri

Karışım	Karot Çapı 46 mm	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	DF = 0.1246(B/Ç) + 0.7594	0.9712
Beton K2	DF = 0.1276(B/Ç) + 0.7447	0.9426
Beton K3	DF = 0.1294(B/Ç) + 0.7577	0.9297
Beton K4	DF = 0.1395(B/Ç) + 0.7259	0.9698
Beton D1	DF = 0.1606(B/Ç) + 0.6991	0.9486
Beton D2	DF = 0.1633(B/Ç) + 0.6911	0.9532
Beton D3	DF = 0.1672(B/Ç) + 0.6877	0.9475
Beton D4	DF = 0.1994(B/Ç) + 0.6413	0.9032

DF : Düzeltme faktörü

B/Ç : Karot numunesinin boy/çap oranı

Agrega türü ve maksimum agreg a boyutundan bağımsız olarak bir regresyon analizi yapıldığında, Şekil 7.42'deki gibi bir doğru elde edilebilir.



Şekil 7.42. Agreg a türü ve maksimum agreg a boyutundan bağımsız olarak boy/çap düzeltme faktörü grafiği

Burada agrega türü ve maksimum agrega tane büyüklüğünden bağımsız olarak karot dayanımları için uygulanacak boy/çap düzeltme faktörünün formülü aşağıdaki gibi olur;

$$DF = 0.11 (\text{boy}/\text{çap}) + 0.7905$$

Burada,

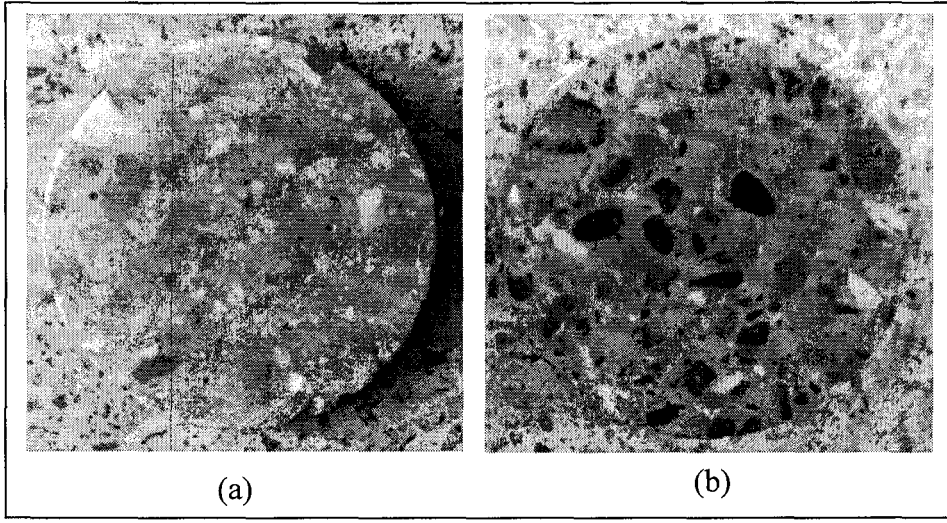
$DF = \text{Boy}/\text{çap}$ düzeltme faktörüdür.

7.2.2. Karot çapının karot dayanımı üzerindeki etkisi

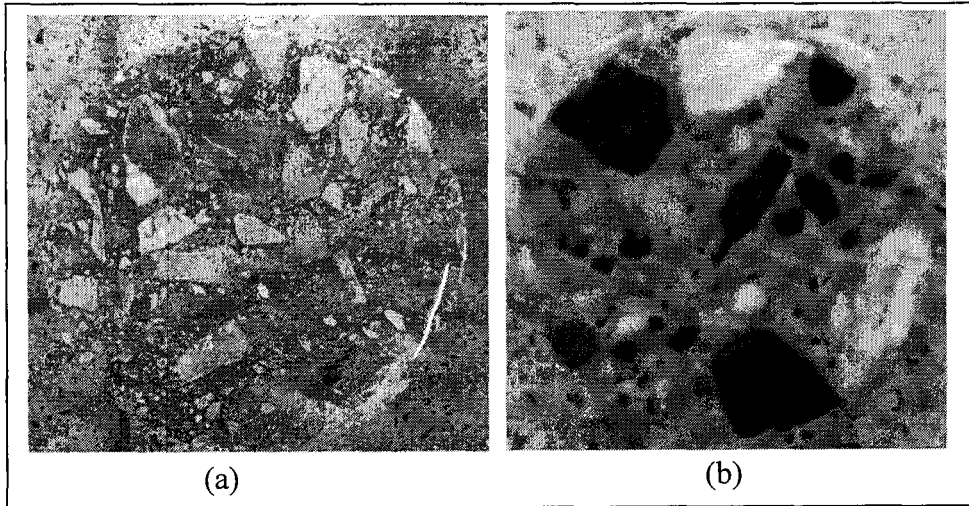
Tüm beton karışımları için, karot çapı küçüldükçe, karot numunesinin basınç dayanımı da küçülmektedir. Bu durum Griffith hipotezi ile ters düşmektedir. Bunun nedeni karot alma işlemi sırasında numunenin örselenmesidir. Örselenme küçük çaplı karot numunelerinde daha fazla olmaktadır. Bartlett ve MacGregor karot çapının basınç dayanımına etkisi üzerinde yaptıkları araştırmanın sonucunda, küçük çaplı karot numunelerinin örselenmeden daha çok etkileneceğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni, Bartlett ve MacGregor'un da belirttiği gibi, karotun örselenme kalınlığının karot çapına bağlı olarak çok az değiştiğidir. Bir başka deyişle, karot numunesinin t kadar kalınlığı örselenmektedir. Bu küçük çaplı numunede de "t" kadardır. Böyle olunca, küçük çaplı karot numunedeki örselenen alanın numune çapına oranı daha büyük olmaktadır. Bu nedenle de küçük çaplı karot numunesinin dayanımı daha düşük çıkmaktadır.

Ayrıca, küçük çaplı karot numunelerinde özellikle erken yaşlarda ve Beton K4 ve Beton D4 gibi, maksimum agrega tane büyüklüğünün karot numunesi çapına oranla yükseldiği durumlarda bu etki yani örselenme etkisi daha da artmaktadır. Çünkü bu durumda agreganın kesilme olasılığı artmakta bu da örselenme miktarını artırmaktadır. Ayrıca, karot yüzeylerinde görünen agregaların kesilmiş yüzeyleri çimento hamuru tarafından yeterli mertebede sarılmadığından, basınç dayanımı testi esnasında da agrega parçası kolaylıkla sıyrılabilir. Bu da agrega boyutu büyük olan betonlardan çıkarılan karot numunelerinin basınç

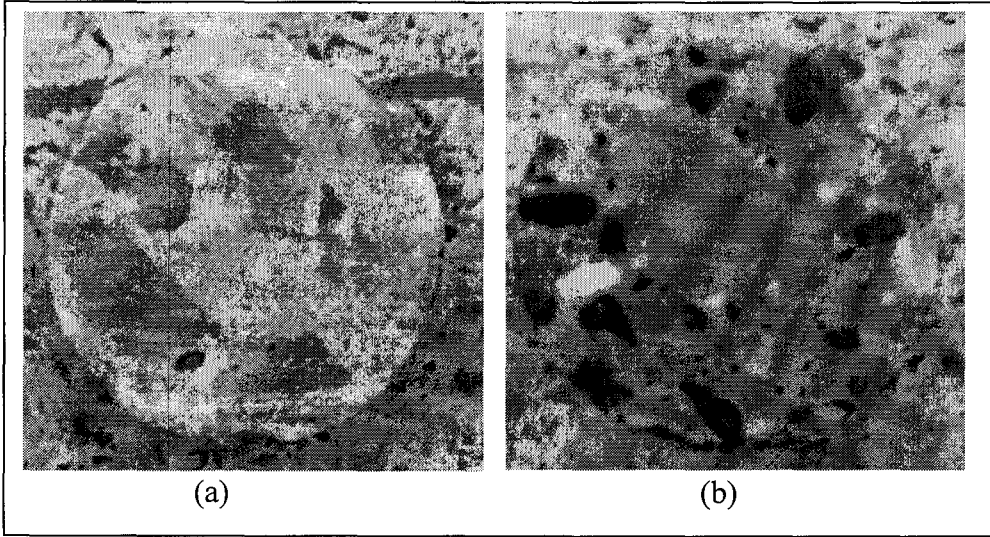
dayanımını düşürmektedir. Böylece, maksimum agrega boyutu 30 mm olan Beton K4 ve Beton D4 karışımlarından alınan küçük karotların dayanımı diğer karışımlara oranla daha düşüktür. Bu da standartların karot numunesi alınırken neden maksimum agrega tane boyutunu da gözettiklerini açıklamaktadır. Örselenmenin etkisi beton yaşı arttıkça azalma eğilimi göstermektedir. Ancak yine de küçük çaplı karotlar, büyük çaplı karotlara göre daha düşük dayanım göstermektedir. Şekil 7.43-46 çapı 46 mm olan karot numunelerin kesit resimlerini göstermektedir.



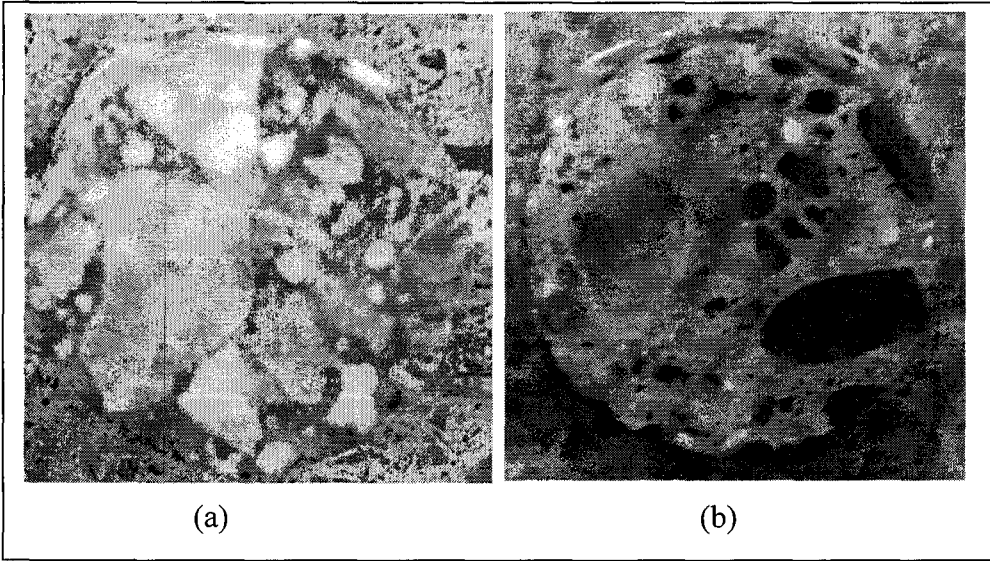
Şekil 7.43. Maksimum agrega boyutu 10 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası



Şekil 7.44. Maksimum agrega boyutu 15 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası



Şekil 7.45. Maksimum agrega boyutu 22 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırma taş, (b) dere agregası

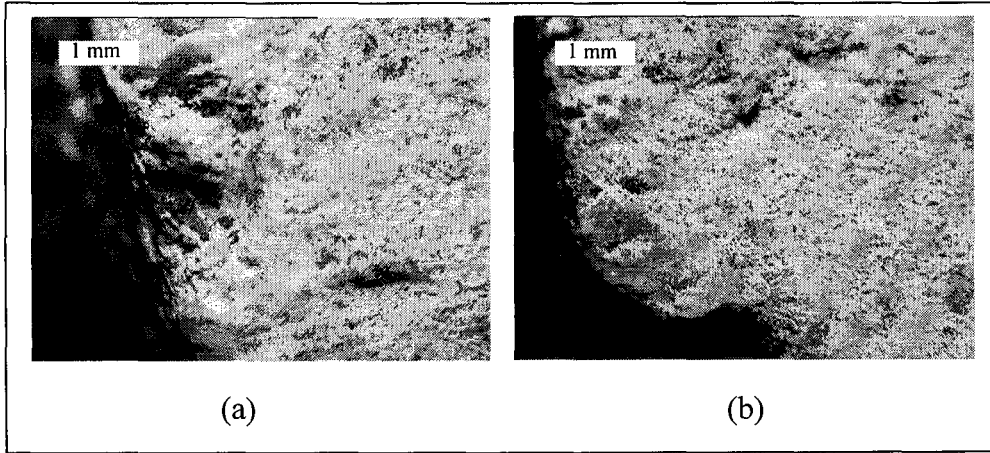


Şekil 7.46. Maksimum agrega boyutu 30 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların kesit görüntüleri (a) kırma taş, (b) dere agregası

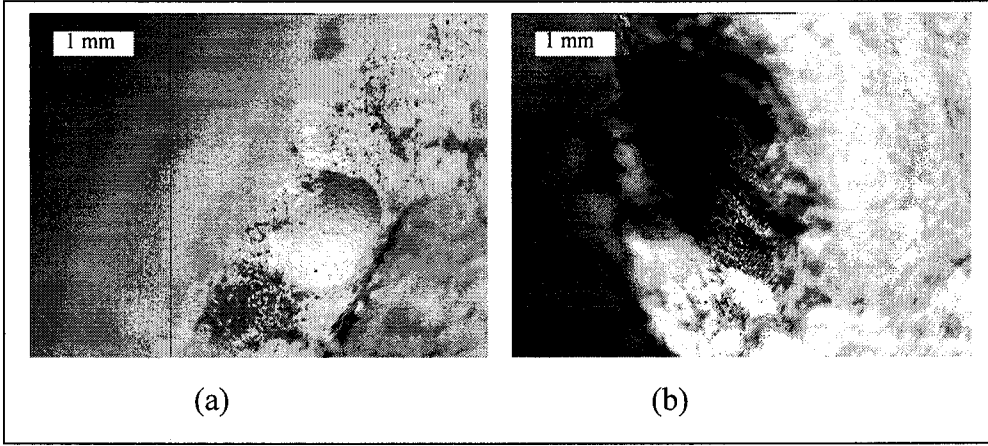
Şekillerden de anlaşılabileceği gibi, karışımda kullanılan agreganın maksimum tane boyutu çok büyüdüğünde özellikle küçük çaplı karotlar kesilirken numune daha çok zedelenmektedir. Bu konuyu artık yeni Avrupa standartları da göz önünde bulundurmaktadır. Örneğin, TS EN 12504-1 Standardında, agrega en büyük tane çapı 20 mm olan betonlardan çıkarılan 100 mm çapındaki karot numunelerinin basınç dayanımlarının çapı 50 mm olan karot numunelerinin

basınç dayanımlarından yaklaşık olarak % 7, agrega en büyük tane büyüklüğü 40 mm olan betonlardan çıkarılan 100 mm çapındaki karot numunelerinin basınç dayanımlarının, çapı 50 mm olan karotların basınç dayanımlarından yaklaşık olarak % 17 daha yüksek olabileceği belirtilmektedir.

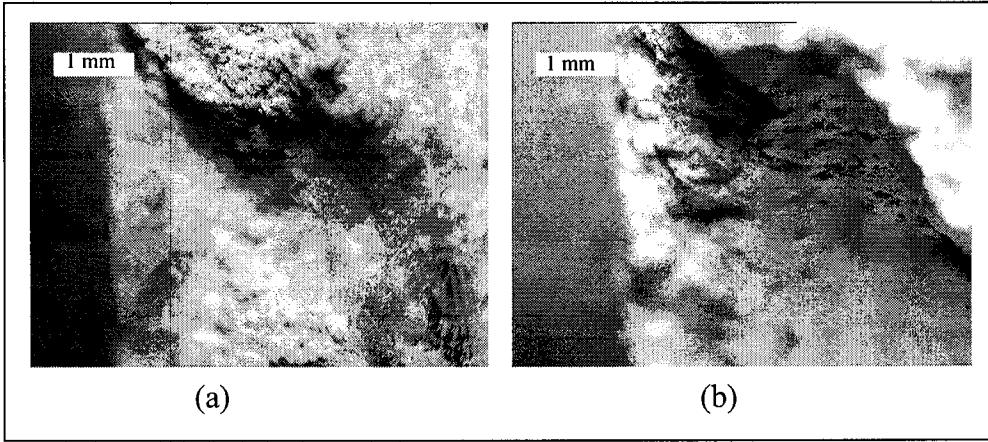
Ayrıca, yuvarlak dere agregası kullanılan karışımlarda, iri agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzey bağı, köşeli kırmataş kullanılan karışımlardaki iri agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzey bağından daha dayanımsız olduğundan, dere agregası kullanılan karışımlardan kesilen küçük çaplı karot numunelerinde, iri agreganın daha kolay sıyrıldığı gözlenmektedir. Optik mikroskop kullanılarak 46 mm çaplı karot numuneleri üzerinde yapılan gözlemlerde agrega çeşidinin ve maksimum agrega tane boyutunun, karot numunesinin kesilmesi esnasında etkili olduğu görülmüştür. Şekil 7.47-50, 46 mm çapındaki karot numunelerinin yüzeyinde optik mikroskopla yapılan gözlemleri göstermektedir. Gözlemler optik steryo mikroskopla yapılmıştır. Bu şekillerden, beton karışımında kullanılan agreganın maksimum tane boyutu büyüdüğünde, kesilme esnasında numune daha fazla etkilenmekte, hatta bazı durumlarda agrega parçaları çimento hamurundan sıyrılabilmektedir.



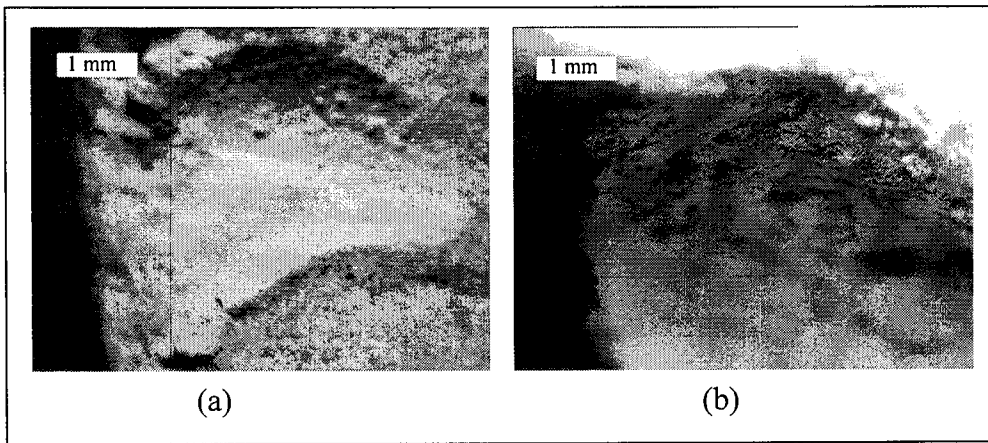
Şekil 7.47. Maksimum agrega boyutu 10 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası



Şekil 7.48. Maksimum agregâ boyutu 15 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası



Şekil 7.49. Maksimum agregâ boyutu 22 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası



Şekil 7.50. Maksimum agregâ boyutu 30 mm olan karışımlardan alınan 46 mm çaplı karotların optik mikroskop görüntüleri (a) kırmataş, (b) dere agregası

Özetlemek gerekirse, karot çapı karot dayanımı için önemli bir etkidir. Karot çapı küçüldükçe karotun örselenme miktarı artmakta ve eğer betonda kullanılan maksimum agrega tane boyutu da karot çapının üçte birinden fazlaysa bu miktar önemli boyutlarda olmaktadır. Aşağıda yer alan çizelgelerde karot çapının karot dayanımına etkisi gösterilmektedir. Burada karot numunelerinin basınç dayanımları 94 mm çapındaki karotun basınç dayanımı değeri üzerinden hesaplanmıştır. Yani kısaca 94 mm çapındaki karot numunesinin basınç dayanımı 1 olarak kabul edilmiş ve diğer tüm değerler buna göre hesaplanmıştır. Çizelge 7.23-28 boy/çap oranları 2 ve 1 olan numuneler için karot çapının dayanım üzerindeki etkisini göstermektedir. Çizelgelerde yazılmış olan değerler bu çalışmanın sonucunda bulunan çap düzeltme faktörleridir. Bu faktörlerin hesabı için, 94 mm çapındaki karotların düzeltme faktörü 1 olarak kabul edilmiş ve diğer karot çaplarına ait faktörler buna göre hesaplanmıştır.

Çizelge 7.23. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	0.92	1.00	1.06	1.13
Beton K2	0.89	1.00	1.04	1.13
Beton K3	0.90	1.00	1.09	1.22
Beton K4	0.92	1.00	1.10	1.26
Beton D1	0.91	1.00	1.11	1.21
Beton D2	0.90	1.00	1.11	1.27
Beton D3	0.90	1.00	1.11	1.33
Beton D4	0.86	1.00	1.11	1.39

Çizelge 7.24. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (28 günlük)

Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	1.01	1.00	1.08	1.12
Beton K2	0.95	1.00	1.05	1.12
Beton K3	0.96	1.00	1.08	1.13
Beton K4	0.94	1.00	1.09	1.17
Beton D1	0.94	1.00	1.06	1.14
Beton D2	0.92	1.00	1.08	1.15
Beton D3	0.93	1.00	1.10	1.19
Beton D4	0.93	1.00	1.11	1.19

Çizelge 7.25. Boy/çap oranı 2 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (90 günlük)

Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	0.97	1.00	1.00	1.05
Beton K2	0.97	1.00	1.04	1.11
Beton K3	0.94	1.00	1.05	1.09
Beton K4	0.93	1.00	1.04	1.11
Beton D1	0.96	1.00	1.04	1.10
Beton D2	0.94	1.00	1.05	1.12
Beton D3	0.95	1.00	1.07	1.14
Beton D4	0.95	1.00	1.08	1.15

Çizelge 7.26. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (7 günlük)

Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	0.94	1.00	1.04	1.07
Beton K2	0.98	1.00	1.06	1.11
Beton K3	0.95	1.00	1.07	1.14
Beton K4	0.95	1.00	1.08	1.16
Beton D1	0.92	1.00	1.08	1.17
Beton D2	0.92	1.00	1.06	1.18
Beton D3	0.91	1.00	1.07	1.22
Beton D4	0.86	1.00	1.09	1.24

Çizelge 7.27. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (28 günlük)

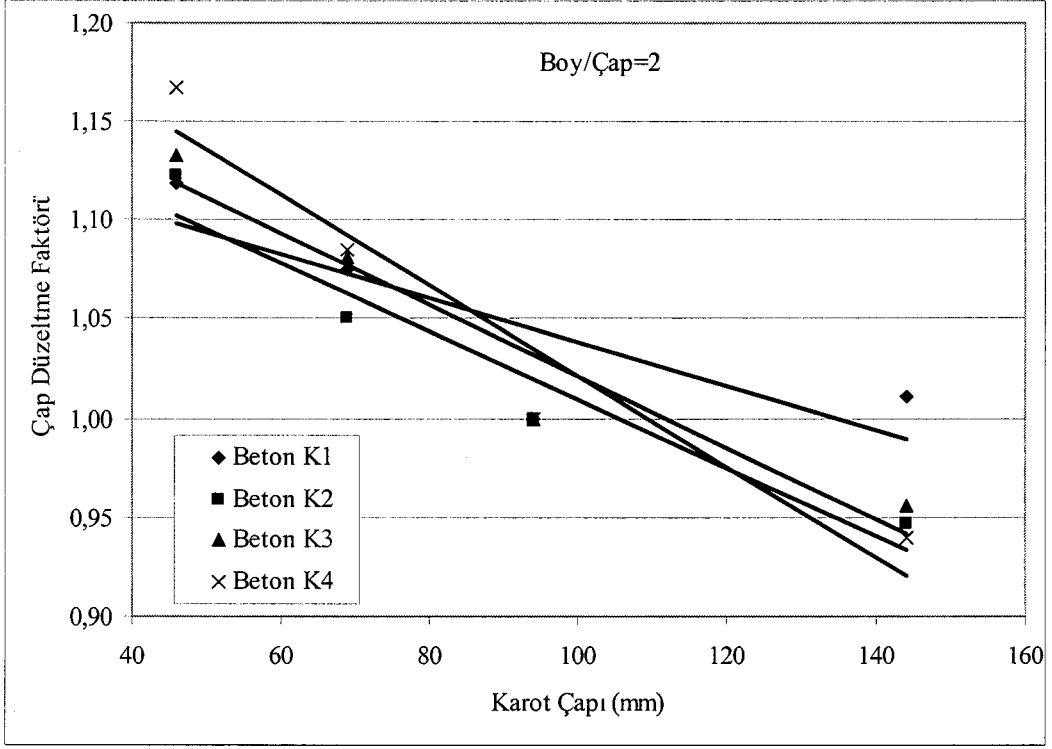
Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	1.00	1.00	1.04	1.07
Beton K2	0.97	1.00	1.02	1.08
Beton K3	0.99	1.00	1.07	1.10
Beton K4	0.99	1.00	1.08	1.12
Beton D1	0.95	1.00	1.04	1.08
Beton D2	0.92	1.00	1.04	1.08
Beton D3	0.93	1.00	1.05	1.11
Beton D4	0.94	1.00	1.08	1.12

Çizelge 7.28. Boy/çap oranı 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri (90 günlük)

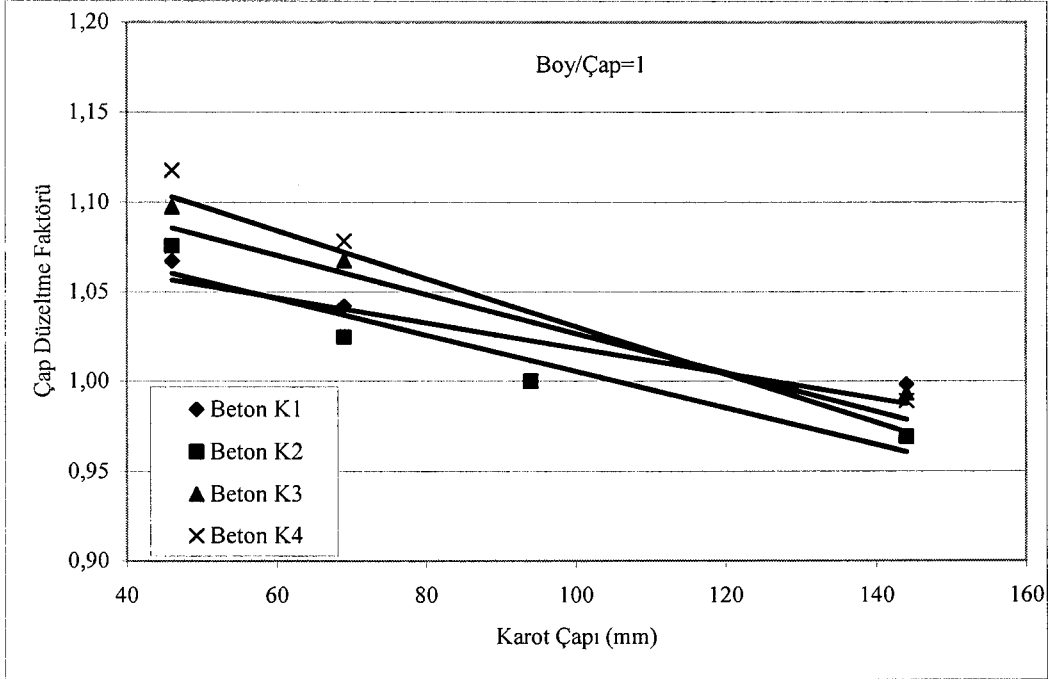
Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton K1	1.01	1.00	1.01	1.04
Beton K2	0.96	1.00	1.02	1.08
Beton K3	0.96	1.00	1.05	1.08
Beton K4	0.98	1.00	1.03	1.10
Beton D1	0.97	1.00	1.02	1.04
Beton D2	0.95	1.00	1.02	1.06
Beton D3	0.95	1.00	1.03	1.07
Beton D4	0.94	1.00	1.03	1.08

Karot çapının basınç dayanımı üzerindeki etkisi yaş ile birlikte önemli ölçüde değişmektedir. Numunenin yaşı arttıkça, karot çapının dayanım üzerindeki etkisi de bir miktar azalmaktadır. Örneğin 7 günlük ve narinliği 2 olan numunelerde 46 mm karotlar için elde edilen çap düzeltme faktörü değerleri 1.13-1.39 arasında değişirken, beton 90 günlük olduğunda, 1.05-1.15 arasında değişmektedir. Bunun nedeni erken yaşlarda karotun daha fazla örselenmesidir. İleri yaşlarda örselenme miktarı her iki agrega çeşidi için de bir miktar azalmaktadır.

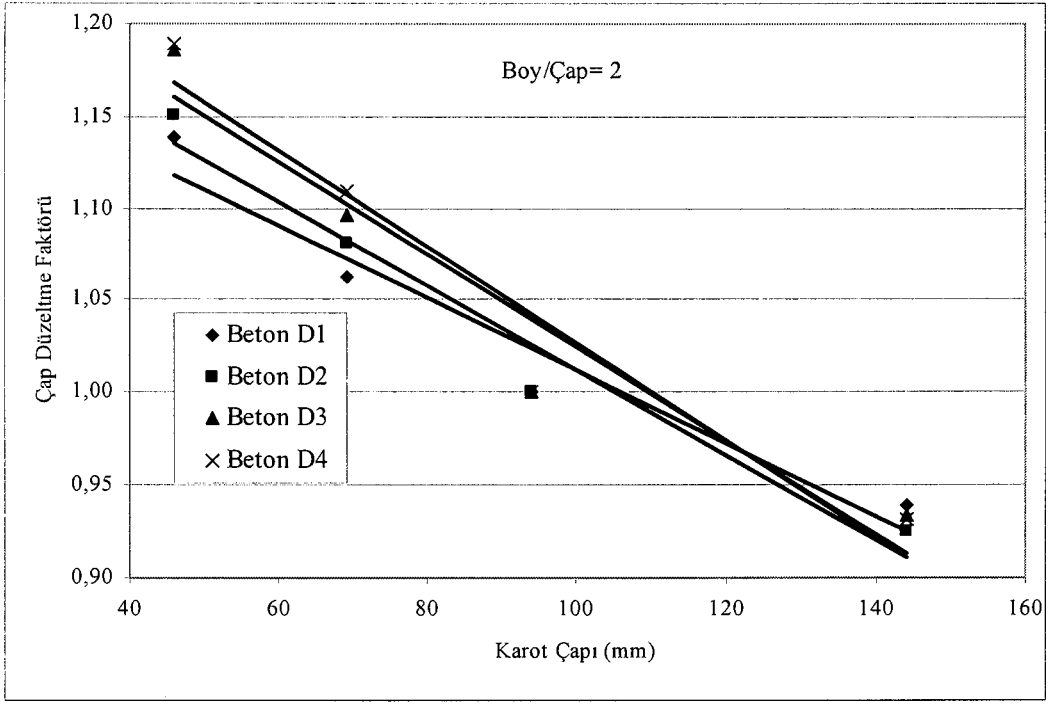
Narinliği 1 olan numuneler için de durum aynıdır. Bu numuneler için 46 mm çapındaki karotlarda çap düzeltme faktörü 7 günlük betonlar için 1.07-1.24 aralığında, 90 günlük betonlar içinse, 1.04-1.10 aralığında değişmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi, beton karışımında kullanılan agrega çeşidi de çap düzeltme faktörlerini bir miktar etkilemektedir. Dere agregası ile üretilen betonlarda bu faktör bir miktar daha yüksek çıkmaktadır. Örneğin, 90 günlük betonlardan elde edilen narinliği 2, çapı 46 mm olan karot numuneleri için çap düzeltme faktörleri kırmataş için 1.05-1.11 aralığında değişirken, dere agregası için bu faktörler 1.10-1.15 aralığında değişmiştir. Bu farkın nedeni dere agregası ile üretilen betonlarda karot çapının, çimento hamuru-agrega bağ dayanımından dolayı daha etkili olduğudur. Karot çapı için elde edilen düzeltme faktörleri regresyon analizi ile incelendiğinde Şekil 7.51-54 ve Çizelge 7.29-30'da özetlenen sonuçlara ulaşılır.



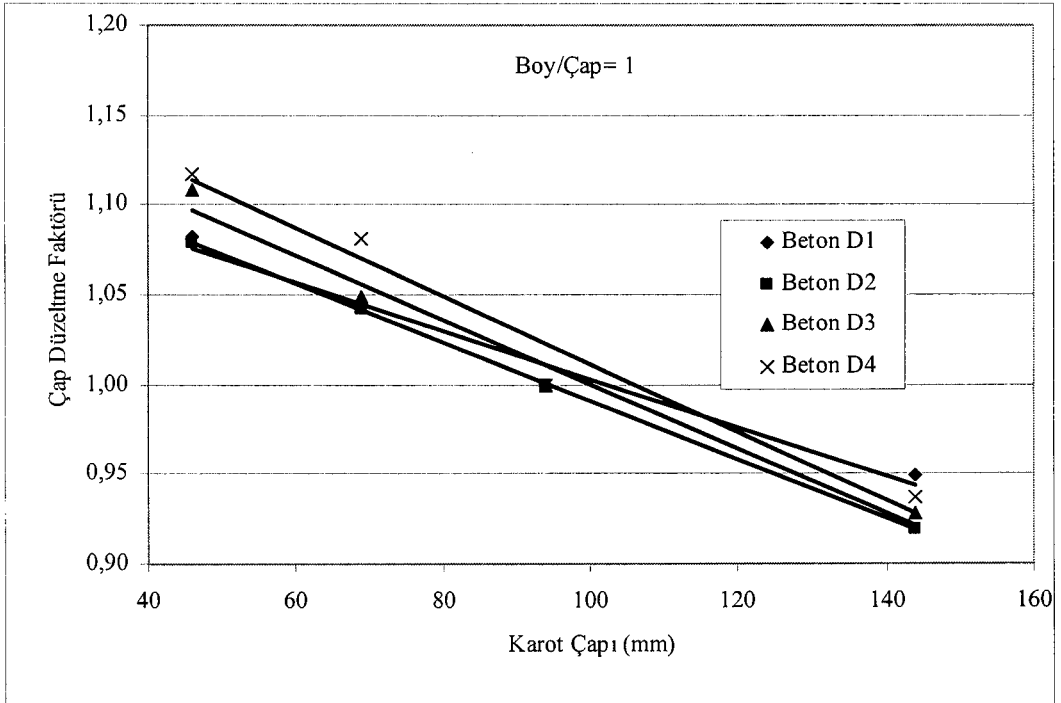
Şekil 7.51. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=2)



Şekil 7.52. Kırmataş ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=1)



Şekil 7.53. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=2)



Şekil 7.54. Dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karot numunelerinin çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizi (boy/çap=1)

Çizelge 7.29. Karot numuneleri için çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri (boy/çap=2)

Karışım	Karot Boy/Çap Oranı 2	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	DF = -0.0011(ÇAP) + 1.1487	0.6904
Beton K2	DF = -0.0017(ÇAP) + 1.1819	0.9334
Beton K3	DF = -0.0018(ÇAP) + 1.2024	0.9229
Beton K4	DF = -0.0023(ÇAP) + 1.2501	0.9284
Beton D1	DF = -0.0020(ÇAP) + 1.2097	0.9408
Beton D2	DF = -0.0023(ÇAP) + 1.2413	0.9621
Beton D3	DF = -0.0025(ÇAP) + 1.2772	0.9265
Beton D4	DF = -0.0026(ÇAP) + 1.2888	0.9329

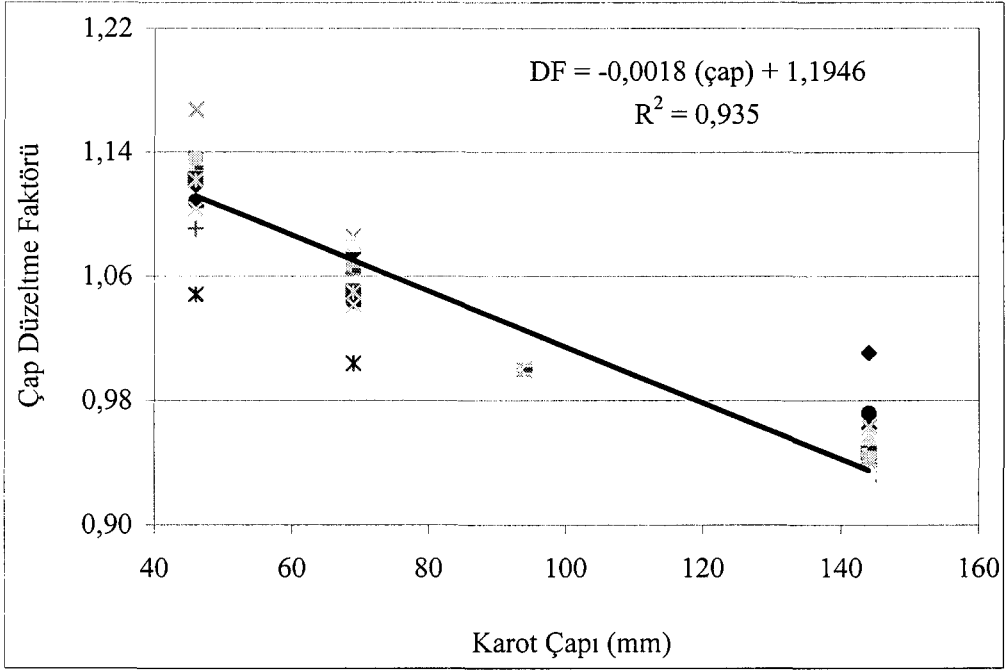
DF : Çap düzeltme faktörü

ÇAP : Karot çapı (mm)

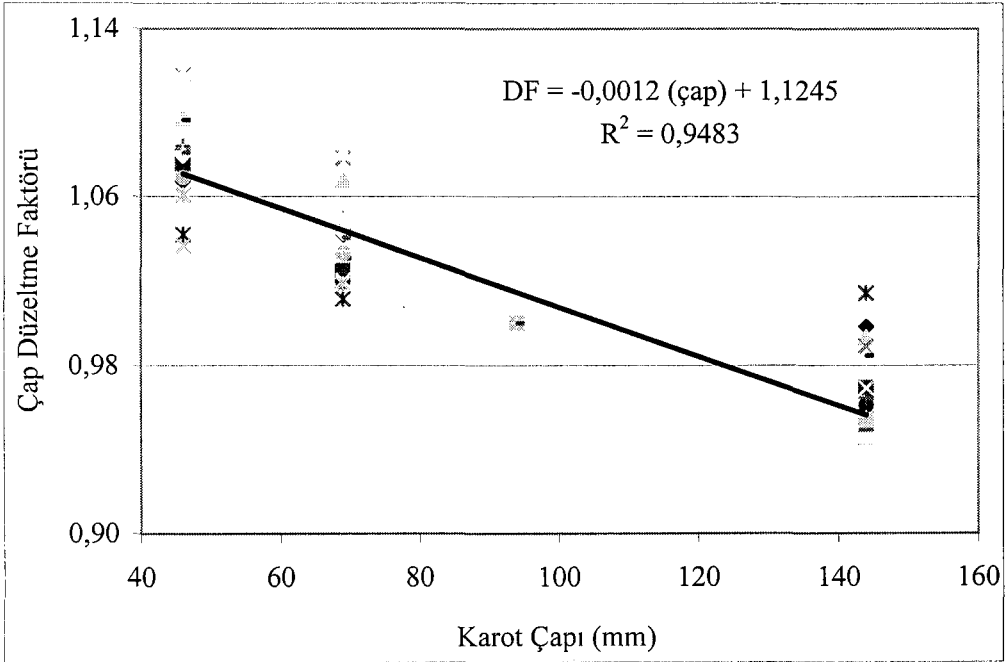
Çizelge 7.30. Karot numuneleri için çap düzeltme faktörlerinin regresyon analizinden elde edilen formülleri (boy/çap=1)

Karışım	Karot Boy/Çap Oranı 1	
	Formül	R ² Değeri
Beton K1	DF = -0.0007(ÇAP) + 1.0894	0.7797
Beton K2	DF = -0.0010(ÇAP) + 1.1073	0.9030
Beton K3	DF = -0.0011(ÇAP) + 1.1361	0.8072
Beton K4	DF = -0.0013(ÇAP) + 1.1646	0.8216
Beton D1	DF = -0.0014(ÇAP) + 1.1384	0.9798
Beton D2	DF = -0.0016(ÇAP) + 1.1546	0.9999
Beton D3	DF = -0.0018(ÇAP) + 1.1794	0.9804
Beton D4	DF = -0.0019(ÇAP) + 1.2009	0.9628

28 ve 90 günlük karot basınç dayanımları için agrega türü ve maksimum agrega tane boyutundan bağımsız bir regresyon analizi yapıldığında boy/çap oranları 2 ve 1 olan karotlar için sırasıyla Şekil 7.55 ve Şekil 7.56'da gösterilen ilişki elde edilebilir.



Şekil 7.55. Agrega türü ve maksimum agregat boyutundan bağımsız olarak çap düzeltme faktörü grafiği (boy/çap=2)



Şekil 7.56. Agrega türü ve maksimum agregat boyutundan bağımsız olarak çap düzeltme faktörü grafiği (boy/çap=1)

Regresyon analizlerinden boy/çap oranı 2 ve 1 olan karotlar için çap düzeltme faktörleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır;

$$DF = -0.0018 (\text{çap}) + 1.1946 \quad (\text{boy/ap}=2)$$

$$DF = -0.0012 (\text{çap}) + 1.1245 \quad (\text{boy/ap}=1)$$

Burada,

DF = ap düzeltme faktörüdür.

7.2.3. Karot deneyleri sonuçlarının değerlendirilmesi

Karot dayanımlarının değerlendirilmesinde standartlar, eğer karot numunesi silindir dayanımı ile karşılaştırılacaksa, boy/çap oranının 2.0 olması gerektiğini, eğer karot numunesinin dayanımı kp numunenin dayanımı ile karşılaştırılacaksa, karotun boy/çap oranının 1.0 olması gerektiğini tavsiye eder. Çizelge 7.31-33 boy/çap oranı 2.0 olan farklı çaplardaki karot numunelerinin dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunelerin dayanımlarına oranlarını göstermektedir.

Çizelge 7.31. Boy/ap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (7 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{silindir}$	$f_{karot94}/f_{silindir}$	$f_{karot69}/f_{silindir}$	$f_{karot46}/f_{silindir}$
Beton K1	0.97	0.89	0.85	0.79
Beton K2	0.94	0.84	0.81	0.74
Beton K3	0.88	0.79	0.73	0.65
Beton K4	0.82	0.76	0.69	0.60
Beton D1	0.96	0.88	0.79	0.72
Beton D2	0.90	0.81	0.73	0.64
Beton D3	0.84	0.76	0.68	0.57
Beton D4	0.83	0.71	0.64	0.51

Çizelge 7.32. Boy/ap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (28 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{silindir}$	$f_{karot94}/f_{silindir}$	$f_{karot69}/f_{silindir}$	$f_{karot46}/f_{silindir}$
Beton K1	0.98	0.99	0.92	0.88
Beton K2	0.96	0.91	0.87	0.81
Beton K3	0.95	0.91	0.84	0.80
Beton K4	0.93	0.88	0.81	0.75
Beton D1	0.98	0.92	0.86	0.80
Beton D2	0.93	0.86	0.80	0.75
Beton D3	0.89	0.83	0.76	0.70
Beton D4	0.86	0.81	0.73	0.68

Çizelge 7.33. Boy/çap oranı 2.0 olan karotların dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunesi dayanımına oranları (90 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{silindir}$	$f_{karot94}/f_{silindir}$	$f_{karot69}/f_{silindir}$	$f_{karot46}/f_{silindir}$
Beton K1	0.99	0.95	0.95	0.91
Beton K2	0.97	0.94	0.90	0.85
Beton K3	0.95	0.89	0.85	0.82
Beton K4	0.93	0.86	0.83	0.78
Beton D1	0.98	0.94	0.90	0.85
Beton D2	0.95	0.90	0.86	0.80
Beton D3	0.92	0.87	0.81	0.76
Beton D4	0.88	0.83	0.77	0.72

Çizelge 7.31-33'da gösterilen değerleri yorumlayacak olursak, karot çapı test edilen karot numunesinin dayanımının değerlendirilmesinde önemli bir faktördür. Burada, maksimum agrega boyutunun daha küçük olduğu durumlarda, 144 mm çapındaki karotlarla silindir numunenin dayanımları birbirine çok yakın çıkmıştır. Örneğin, 90 günlük betonlarda, Beton K1 karışımı için bu oran 0.99'dur. Ancak, maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe, örneğin, Beton K4 karışımında bu oran 0.93'e kadar gerilemektedir. Yani, beton karışımında kullanılan maksimum agrega tane boyutu karot numunesi basınç dayanımlarının değerlendirilmesinde, büyük karot çapları için bile önemli olmaktadır. Karot çapı küçüldükçe de bu oran azalmaktadır. Bu da karot numunesinin örselenme etkisinden dolayıdır. Bu oran, 90 günlük Beton K4 karışımında 0.78'e kadar düşmüştür. Aynı durum dere agregası ile hazırlanan beton karışımları için de geçerlidir. Ancak dere agregası kullanılan karışımlarda bu oranlar, kırmataş agregası kullanılan numunelerdekilere nispeten daha da azalmaktadır. Bunun, dere agregası ile üretilen betonlarda çimento hamuru ile agrega arasındaki arayüzey bölgesinin daha zayıf olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dere agregasının yüzeyi daha pürüzsüzdür ve bu yüzeyden çimento hamurunun sıyrılması daha kolaydır. Bu durum özellikle küçük çaplı karot numunelerini daha çok etkilemektedir. Böylece elde edilen oran, 90 günlük betonlarda, Beton D4 numunelerinden çıkarılan 46 mm çaplı karot numuneleri için 0.72'ye kadar düşebilmektedir.

Çizelge 7.34-36 ise boy/çap oranı 1 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımlarına oranlarını özetlemektedir.

Çizelge 7.34. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (7 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{küp}$	$f_{karot94}/f_{küp}$	$f_{karot69}/f_{küp}$	$f_{karot46}/f_{küp}$
Beton K1	0.84	0.79	0.76	0.74
Beton K2	0.81	0.80	0.75	0.72
Beton K3	0.76	0.72	0.67	0.64
Beton K4	0.74	0.70	0.65	0.61
Beton D1	0.84	0.78	0.72	0.67
Beton D2	0.78	0.72	0.68	0.61
Beton D3	0.76	0.69	0.65	0.57
Beton D4	0.77	0.67	0.61	0.54

Çizelge 7.35. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (28 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{küp}$	$f_{karot94}/f_{küp}$	$f_{karot69}/f_{küp}$	$f_{karot46}/f_{küp}$
Beton K1	0.89	0.89	0.85	0.83
Beton K2	0.87	0.84	0.82	0.78
Beton K3	0.85	0.84	0.79	0.77
Beton K4	0.80	0.79	0.73	0.71
Beton D1	0.86	0.82	0.78	0.76
Beton D2	0.84	0.77	0.74	0.72
Beton D3	0.81	0.75	0.72	0.68
Beton D4	0.81	0.76	0.70	0.68

Çizelge 7.36. Boy/çap oranı 1.0 olan karotların dayanımlarının 150 mm standart küp numunesi dayanımına oranları (90 günlük)

Karışım	$f_{karot144}/f_{küp}$	$f_{karot94}/f_{küp}$	$f_{karot69}/f_{küp}$	$f_{karot46}/f_{küp}$
Beton K1	0.89	0.90	0.89	0.86
Beton K2	0.92	0.89	0.87	0.82
Beton K3	0.89	0.85	0.81	0.79
Beton K4	0.84	0.83	0.81	0.76
Beton D1	0.86	0.84	0.82	0.81
Beton D2	0.85	0.81	0.80	0.77
Beton D3	0.82	0.78	0.75	0.73
Beton D4	0.80	0.76	0.73	0.70

Çizelge 7.34-36'da da durum aynıdır. Ancak farklı olan, Çizelge 7.34-36'da hesaplanan oranlar bir miktar daha düşüktür. Bu da küp numunesinin dayanımının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Burada şunu da belirtmek gerekir ki, küçük çaplı karot numunelerinde boy/çap oranı 1.0 olan numuneleri küp dayanımı ile karşılaştırmak gerektiğinde, oranlar çok fazla düşmemektedir. Yani örneğin,

Beton K1 karışımı için büyük çaplı ve küçük çaplı numunelerin basınç dayanımlarının küp basınç dayanımına oranı 0.89'dan 0.84'e düşmüştür.

Her iki boy/çap oranı için de beton yaşı önemli bir faktör olarak göze çarpmaktadır. Beton yaşı ilerledikçe, her iki boy/çap oranı için de karot numunelerin dayanımlarının standart numunelerin dayanımlarına oranında bir artış gözlenmektedir. Bu da karot numunelerinin erken yaşlarda, örselenmeden daha fazla etkilendiğini göstermektedir. Bu da Standardların betonlardan neden erken yaşlarda numune alınmamasını tavsiye ettiğini açıklamaktadır.

7.2.4. Beton dayanım seviyesinin karot dayanımına etkisi

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, 25-45 MPa arasında farklı dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan elde edilen kirişlerden 144, 94, 69 ve 46 mm olmak üzere 4 farklı çapta ve boy/çap oranı 1.0 olan karot numuneleri çıkarılarak basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Bu bölümde, karot numuneleri 28 gün yaşında test edilmiştir. Numunelerin basınç dayanımları en az 6 adet numunenin basınç dayanımının ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Çizelge 7.37 değişik dayanım seviyeleri için karot çapının etkisini göstermektedir. Burada yine 94 mm çapındaki karot numunesinin dayanımı 1 olarak kabul edilmiş ve diğer çaplara ait karot düzeltme faktörleri buna göre hesaplanmıştır.

Çizelge 7.37. Çeşitli dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan çıkarılan karotlar için çap düzeltme faktörleri (boy/çap=1)

Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton M1	0.98	1.00	1.03	1.06
Beton M2	0.99	1.00	1.03	1.05
Beton M3	1.00	1.00	1.02	1.05
Beton M4	1.00	1.00	1.01	1.03

Bu çizelgeye göre, beton dayanım seviyesi yükseldiğinde, 94 mm den küçük çaplı karotlar için, çap düzeltme faktörleri azalmaktadır. 46 mm çaplı karotlar için

bu faktör 1.06-1.03 aralığında değişmektedir. Çap düzeltme faktörleri 144 mm çapındaki karotlar için 1'e çok yakın değerler almaktadır.

Çizelge 7.38 çeşitli dayanım seviyelerindeki karot numunelerin dayanımlarının 150 mm standart küp numunelerinin 28 günlük dayanımlarına oranlarını göstermektedir.

Çizelge 7.38.Çeşitli dayanım seviyelerindeki karot numunelerinin dayanımlarının 150 mm standart küp numunelerinin dayanımlarına oranı (boy/çap=1)

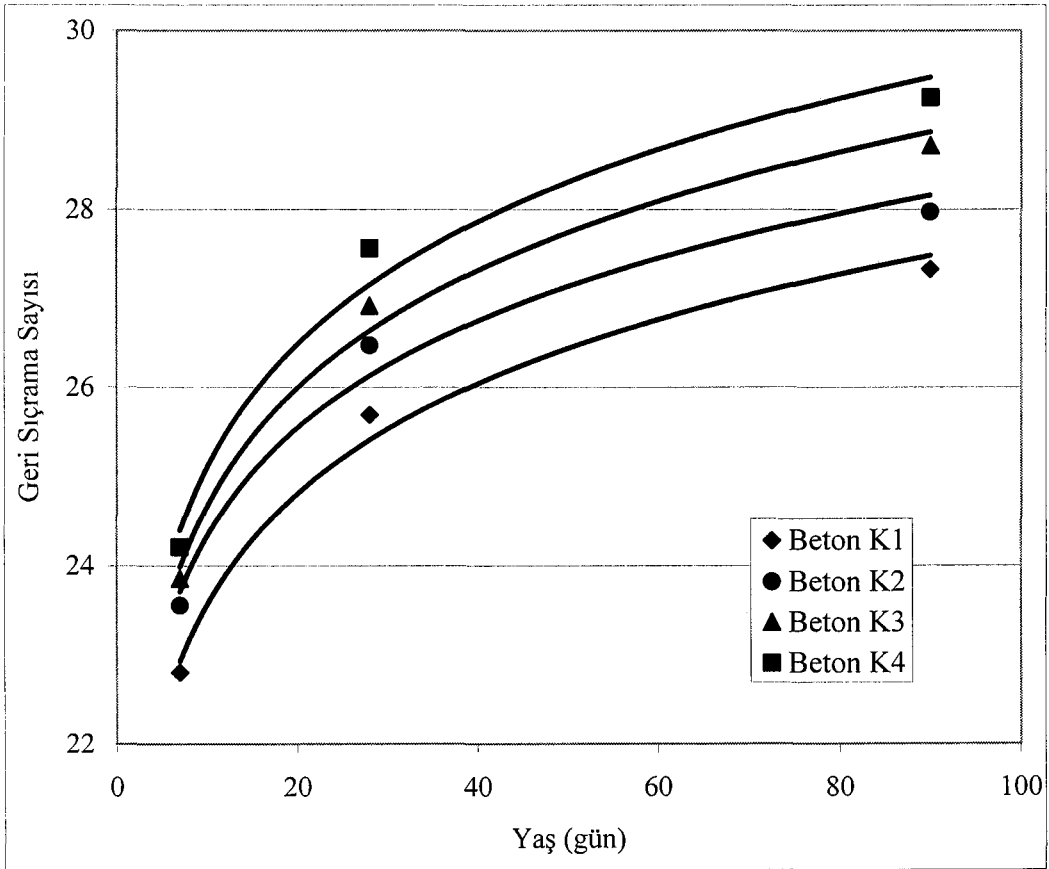
Karışım	Karot Çapı (mm)			
	144	94	69	46
Beton M1	0.89	0.87	0.85	0.82
Beton M2	0.90	0.89	0.86	0.84
Beton M3	0.92	0.92	0.90	0.88
Beton M4	0.91	0.91	0.90	0.88

Çizelgede, beton dayanım seviyesi yükseldiğinde karot dayanımlarının standart numunelerin dayanımlarına oranlarında bir artma olmaktadır. Bu oran 144 mm çapındaki karotlar için 0.89-0.91 aralığında, 46 mm çapındaki karotlar için 0.82-0.88 aralığında değişmektedir.

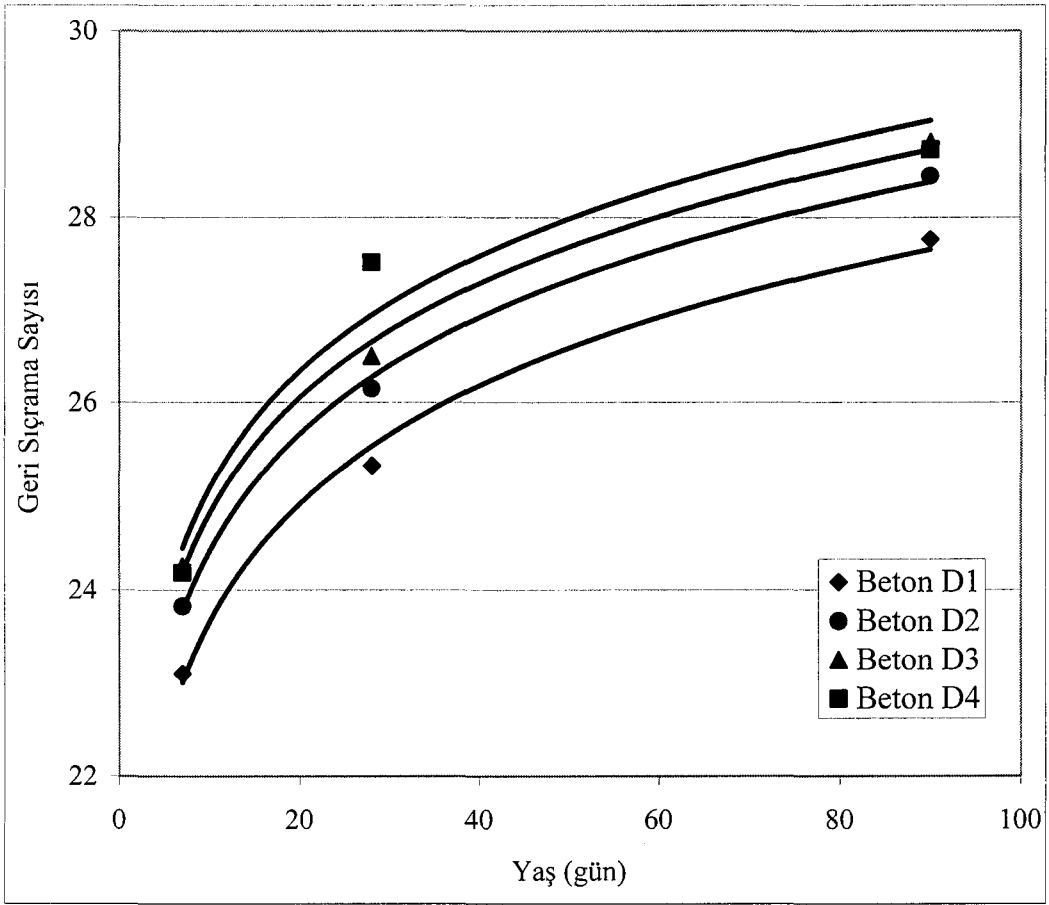
7.3. Beton Çekici Testlerinin Sonuçları

Beton çekici testlerinde, çekici yatay olarak kullanarak kiriş numuneleri üzerinde geri sıçrama değerleri ölçülmüştür. Daha çok karışımda kullanılan maksimum agrega tane boyutunun etkisinin incelendiği deneysel çalışmanın birinci bölümünde kiriş üzerinde beton çekici 12 defa uygulanmış ve bu ölçümlerin ortalaması geri sıçrama değeri olarak kaydedilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde ise kiriş üzerinde 20 ölçüm yapılmıştır.

Şekil 7.57-58 deneysel çalışmanın birinci bölümünde yapılan ölçümlerden elde edilen geri sıçrama değerlerinin beton yaşı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 7.57. Kırmataş ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen geri sıçrama sayıları

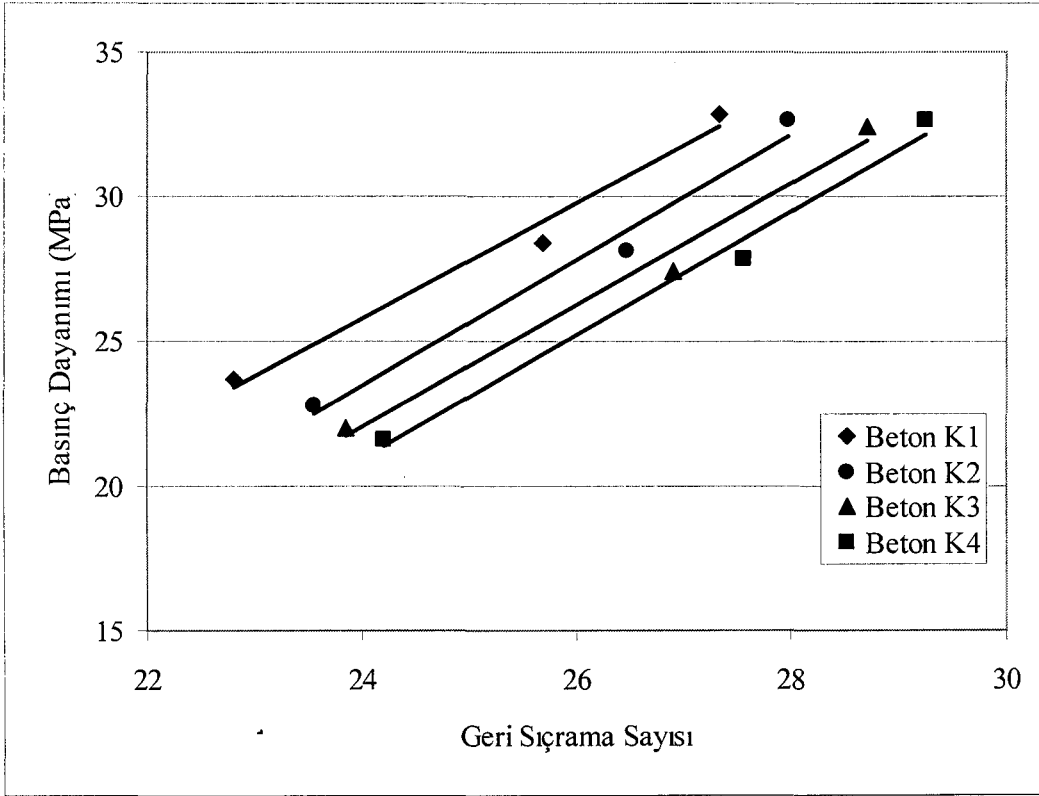


Şekil 7.58. Dere agregası ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen geri sıçrama sayıları

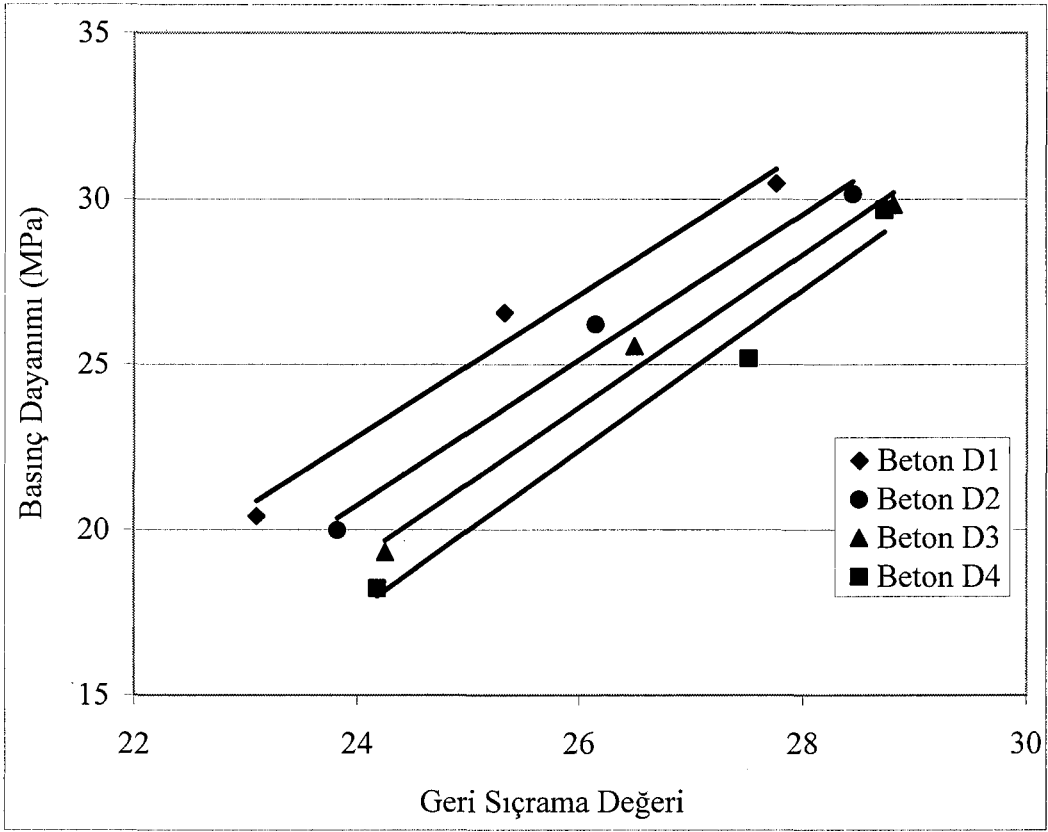
Şekillerden anlaşılacağı gibi, beton kirişler üzerinde ölçülen geri sıçrama sayısı ile beton yaşı arasında eğrisel bir ilişki vardır. Beton yaşının ilerlemesiyle geri sıçrama sayılarının artış oranında bir azalma gözlenmektedir. Grafiklere göre, beton agregasının değişmesi ile ölçülen geri sıçrama değerleri büyük farklılıklar göstermemektedir. Ancak maksimum agregata tane boyutunun artması her iki çeşit agregata ile üretilen betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarını artırmaktadır. Bunun nedeni, maksimum agregata tane boyutunun büyümesi ile birlikte, testin uygulandığı yerde iri bir agreganın çekicinin hemen altında bulunması olasılığının artmasından dolayıdır. Beton üretiminde kullanılan maksimum agregata tane boyutu büyüdüğünde agregata parçası hemen çekicinin altına gelebilmekte ve bu da geri sıçrama sayısını artırmaktadır.

Şekil 7.59-60 ise betonlarda ölçülen geri sıçrama değerleri ile 150 mm küp cinsinden ölçülen basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Buna

göre, basınç dayanımı ile geri sıçrama sayıları arasında doğrusal bir ilişki kurabilmek mümkündür. Burada agrega çeşidinin beton çekici ile yapılan basınç dayanımı üzerindeki etkisi göze çarpmaktadır. Grafiklere bakılacak olursa, aynı geri sıçrama sayıları için dere agregası ile üretilen betonların daha düşük dayanımlar sergiledikleri gözlenmektedir. Malhotra tarafından atıfta bulunulan Kliger bu farkın aynı geri sıçrama sayıları için 7 MPa değerine kadar çıkabileceğini söylemektedir [120]. Bu çalışmada bulunan basınç dayanımı farkı yaklaşık 2 MPa değerindedir. Bunun nedeni çimento hamurunun agrega miktarına oranı ile ve karışımda kullanılan kum miktarı ile ilgili olabilir. Ayrıca baronların basınç dayanım seviyeleri de bu farkın üzerinde etkili olabilir. Burada üretilen betonlar daha önce de bahsedildiği gibi, 26-28 MPa (150 mm küp cinsinden 28 günlük) dayanım seviyesine sahip betonlardır.



Şekil 7.59. Kırmataş ile üretilen betonlarda geri sıçrama sayısı ile basınç dayanım arasındaki ilişki



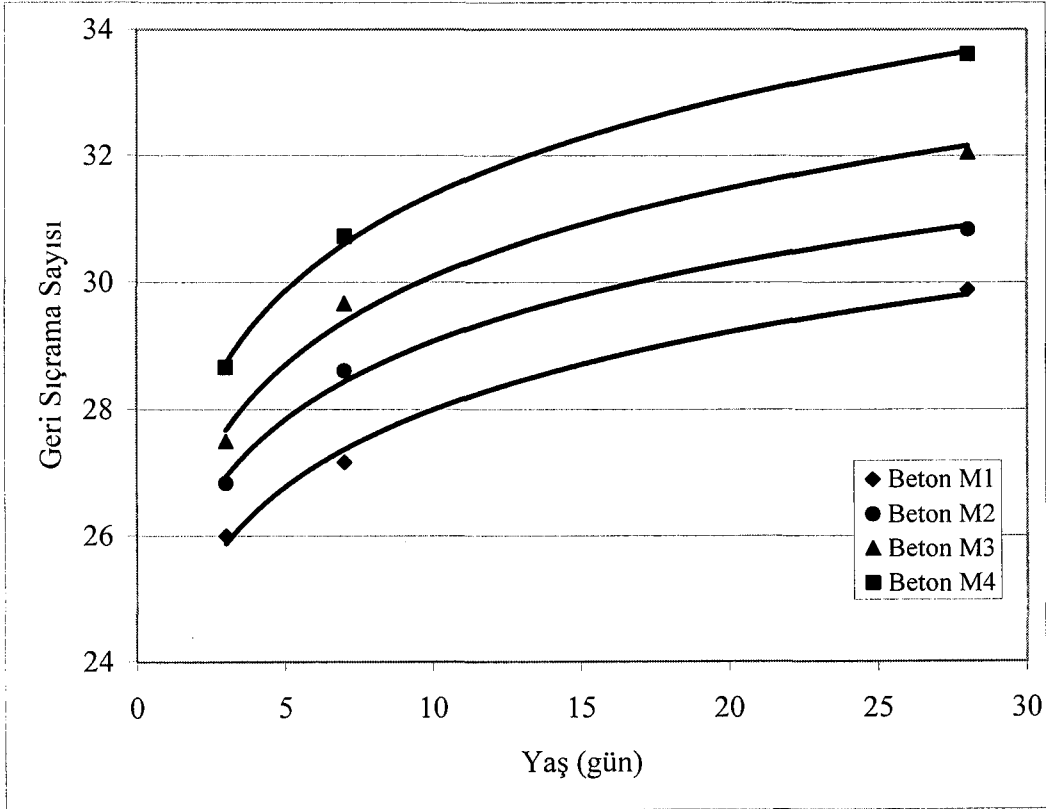
Şekil 7.60. Dere agregası ile üretilen betonlarda geri sıçrama sayısı ile basınç dayanım arasındaki ilişki

Eğer Şekil 7.59-60'da yeralan grafiklerde bir regresyon yapılacak olursa, Çizelge 7.39'da yazılan formüller ve bu formüllere ait R^2 değerleri elde edilebilmektedir. Bulunan formüllere göre, R^2 değerleri 0.9765 ile 0.9867 aralığında değişmektedir. Bu değerler 1'e çok yakın değerleridir. Bu da kurulan ilişkinin sağlıklı olduğunu göstermektedir. Burada agrega çeşidi ve maksimum agrega tane boyutunun bilinmesi R^2 değerlerini artırmaktadır. İçerdiği agrega türünden bağımsız olarak, belirli bir dayanım seviyesinde küçük maksimum agrega tane boyutunda agrega içeren (küçük Dmax) betonlarda, geri sıçrama sayıları küçüktür. Bu bir ölçüde bu karışımların nispeten fazla olan hamur içeriklerinden kaynaklanabilir. Böylesi bir durumda, çekicinin uygulandığı yerin agrega değil de hamur olma olasılığı artmaktadır.

Çizelge 7.39. Geri sıçrama sayılarından elde edilen formüller

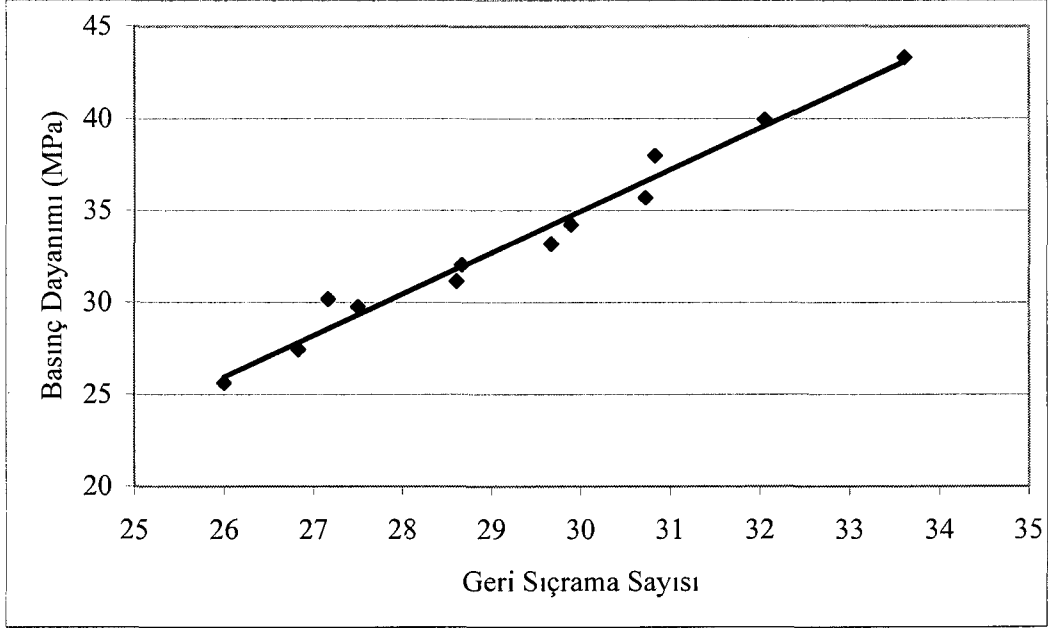
Karışım	Geri Sıçrama Değeri-Dayanım İlişkisi	R ² Değeri
Beton K1	$S=1.9865 RN - 21.892$	0.9802
Beton K2	$S=2.1778 RN - 28.806$	0.9822
Beton K3	$S=2.1142 RN - 28.738$	0.9834
Beton K4	$S=2.1403 RN - 30.435$	0.9862
Beton D1	$S=2.1496 RN - 28.785$	0.9765
Beton D2	$S=2.2040 RN - 32.165$	0.9840
Beton D3	$S=2.3133 RN - 36.442$	0.9867
Beton D4	$S=2.4297 RN - 40.772$	0.9803

Farklı dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan elde edilen kırışlar üzerinde beton çekici ile ölçülen geri sıçrama sayılarının beton yaşı ile değişimi Şekil 7.61’de gösterilmiştir. Geri sıçrama sayıları beton yaşı ile birlikte azalan oranda artmaktadır. Beton dayanım seviyesi yükseldiğinde eğrinin şeklinde önemli bir değişiklik olmamakla birlikte, geri sıçrama sayılarında bir miktar artış gözlenmektedir.



Şekil 7.61. Farklı dayanım seviyelerindeki betonlar için geri sıçrama sayısının beton yaşı ile değişimi

Şekil 7.62 ise beton dayanım seviyesinin etkisinin araştırıldığı kiriş numunelerinde ölçülen geri sıçrama sayıları ile 150 mm standart küp numunesi basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 7.62. Basınç dayanımı ile geri sıçrama sayısı arasındaki ilişki

Burada, basınç dayanımları ve bu değerlere karşılık gelen geri sıçrama sayıları arasında regresyon analizi yapıldığında, doğrusal bir eğilim çizgisi elde etmek mümkündür. Analiz sonucunda basınç dayanımı ile geri sıçrama sayıları arasındaki ilişki 25-45 MPa küp basınç dayanımına sahip betonlar için aşağıdaki gibi bulunmuştur;

$$S = 2.2484 RN - 32.481$$

Burada;

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

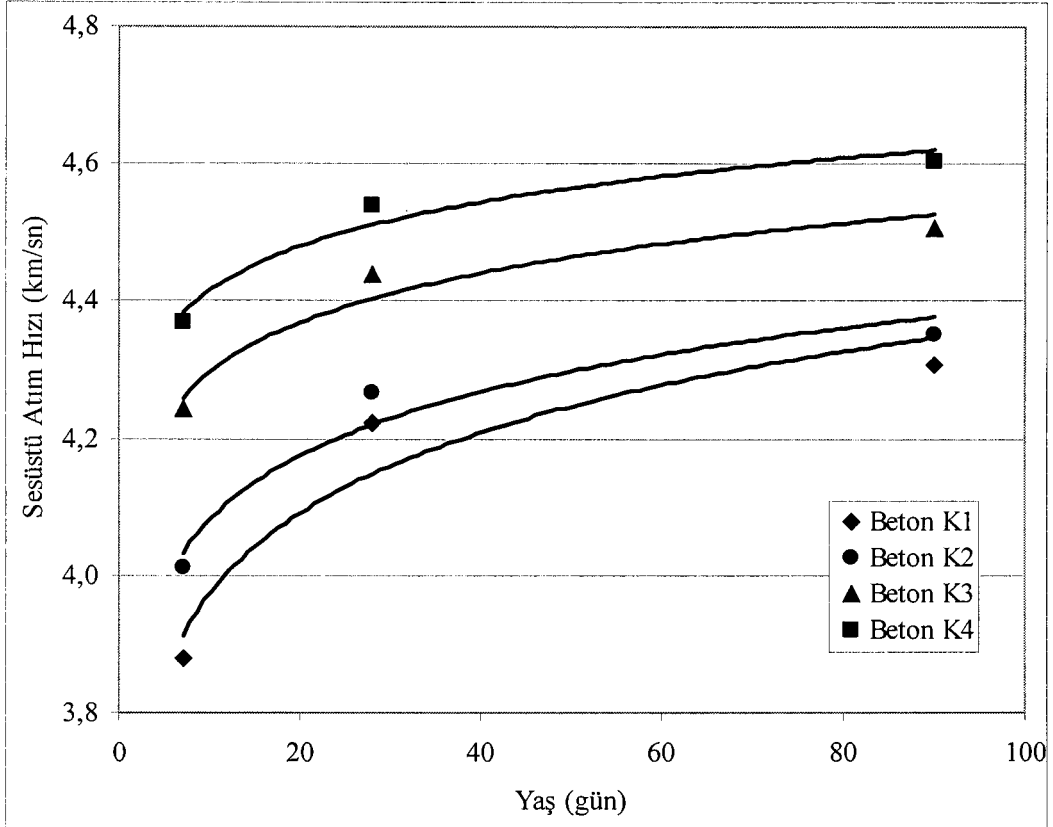
RN : Geri sıçrama sayısı

Bu regresyon analizinde R^2 değeri de 0.976 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'e çok yakın olduğunda kurulan ilişkinin sağlıklı olduğu söylenebilir.

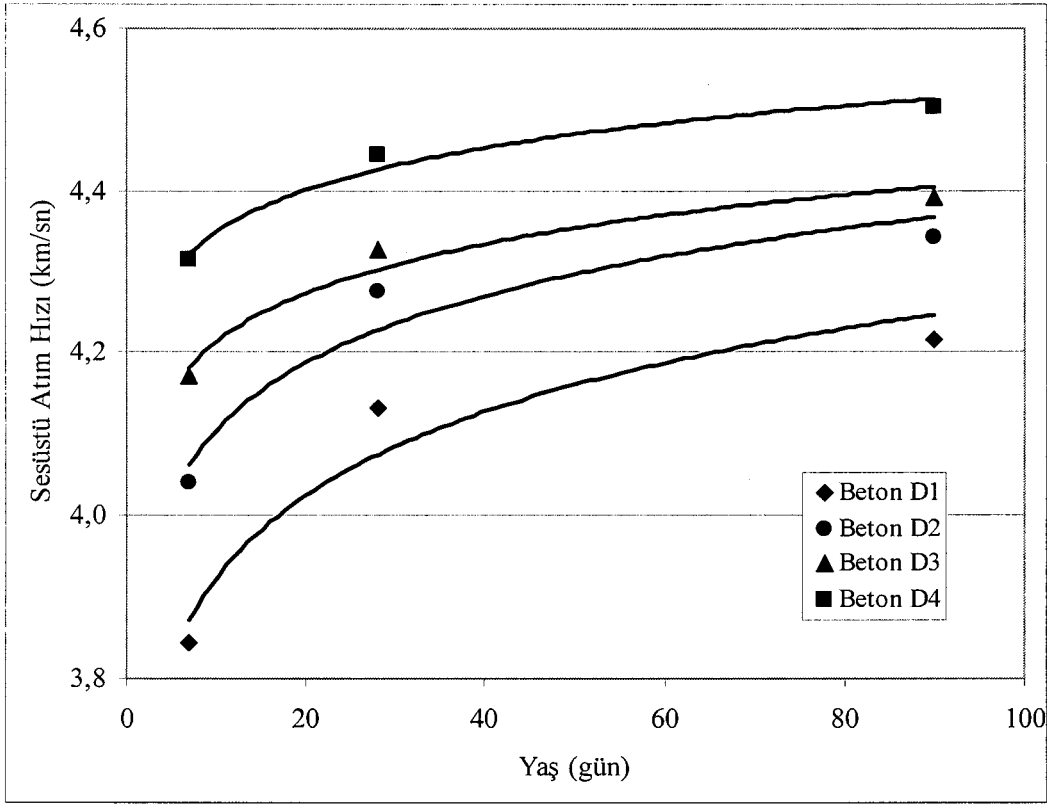
7.4. Sesüstü Atım Hızı Testlerinin Sonuçları

Sesüstü atım hızı testlerinde, doğrudan iletim yoluyla kiriş numuneleri üzerinde kirişin kısa doğrultusunda sesüstü atım hızları hesaplanmıştır. Daha çok maksimum agrega boyutunun deneyler üzerinde etkisinin incelendiği deneysel çalışmanın birinci bölümünde kiriş üzerinde 9 ayrı ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması sesüstü atım hızı olarak kaydedilmiştir. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde ise 8 ölçümün ortalaması alınarak sesüstü atım hızı değerleri analiz edilmiştir.

Şekil 7.63-64 doğrudan iletimle yapılan ölçmelerle elde edilen sesüstü atım hızı değerlerinin beton yaşı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 7.63. Kırmataş ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen sesüstü atım hızı değerleri



Şekil 7.64. Dere agregası ile üretilen beton kirişler üzerinde ölçülen sesüstü atım hızı değerleri

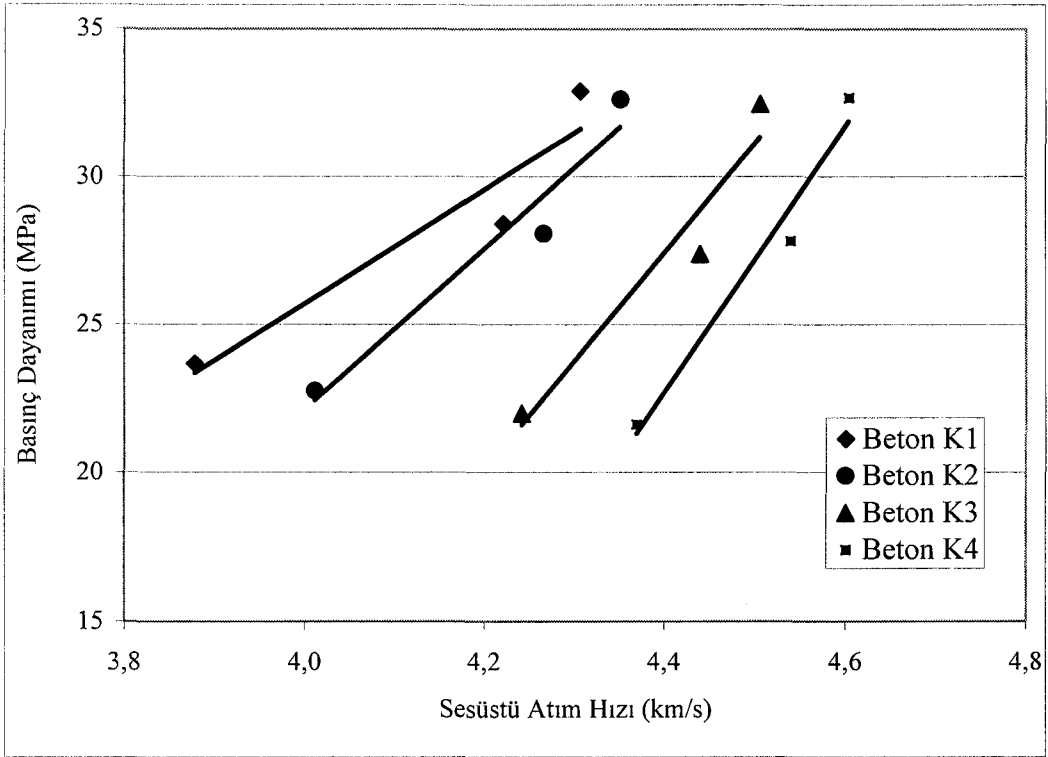
Sesüstü atım hızının beton yaşı ile değişimini gösteren grafiklerden, beton yaşı arttığında sesüstü atım hızının da arttığı görülmektedir. Bu artış genellikle erken yaşlarda daha fazla olmakta, daha sonraki günlerde artışta bir azalma gözlenmektedir.

Grafiklere dikkat edilecek olursa, maksimum agregatane boyutu ve agregatane çeşidi de sesüstü atım hızı sonuçlarını etkilemektedir. Maksimum agregatane boyutu büyüdüğünde sesüstü atım hızlarında da bir artış gözlenmekte, tersine, maksimum agregatane boyutu küçüldüğünde ise sesüstü atım hızlarında her yaş için geçerli olmak kaydıyla bir azalma gözlenmektedir. Örneğin, maksimum agregatane boyutunun 10 mm olduğu Beton K1 karışımında 28 günlük sesüstü atım hızı yaklaşık 4.2 km/sn iken maksimum agregatane boyutunun 30 mm olduğu Beton K4 karışımında 28 günlük sesüstü atım hızı yaklaşık 4.5 km/sn olarak hesaplanmıştır. Bu iki beton karışımının dayanımlarının birbirine çok yakın olduklarını hatırlayacak olursak, burada maksimum agregatane boyutu etkisini şu şekilde açıklayabilmek mümkündür; maksimum agregatane boyutu arttıkça,

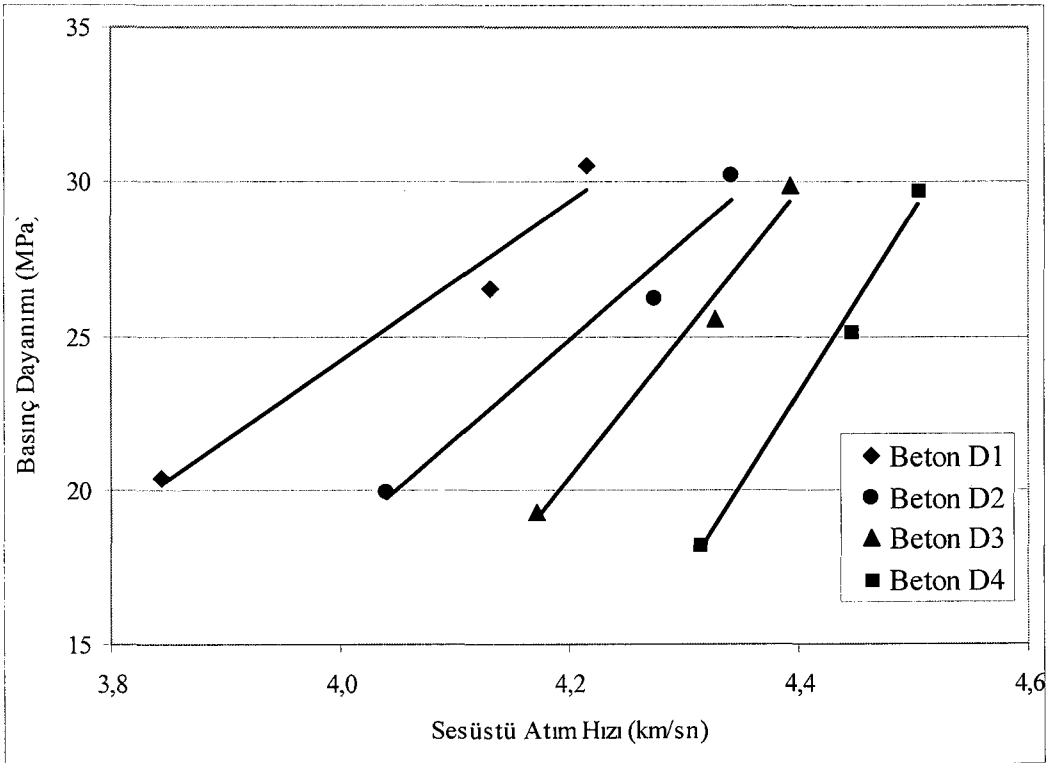
karışım içerisindeki büyük malzemeler artmaktadır. Bu iri agrega tanecikleri çimento hamuruna nazaran nispeten daha az gözenek içerirler. Gözenek miktarı sesüstü atım hızını etkilemektedir. Ayrıca, maksimum agrega tane boyutunun büyük olduğu karışımlarda hacim olarak daha az su ve su/çimento oranı aynı tutulduğundan, dolayısıyla da daha az çimento hamuru bulunmaktadır. Bu durumda, sesüstü atımların çimento hamuruna nazaran agrega parçaları içerisinde daha hızlı ilerlemesiyle, sesüstü atım hızları daha büyük agrega tane boyutu içeren numunelerde bir miktar daha yüksek çıkmaktadır.

Grafiklerden, sesüstü atım hızının beton yaşı ile ilişkisinin her iki agrega çeşidi için de benzer eğrisel yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Ancak kırmataş agregası ile üretilen betonlarda bir miktar daha yüksek sesüstü atım hızı değerleri ölçülmüştür. Örneğin, Beton K1 kirişi için 28 günlük sesüstü atım hızı yaklaşık 4.2 km/sn olurken, bu değer Beton D1 kirişi için 4.1 km/sn olarak hesaplanmıştır. Bunun nedenlerinden biri kırmataşın dere agregasına nazaran daha gözeneksiz bir yapıya sahip olmasıdır. Agregaların özgül ağırlık değerlerine de bakıldığında, kırmataş agregasının özgül ağırlığının dere agregasının özgül ağırlığına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, dere agregası daha fazla gözenek içeriyor olabileceğinden bu betonlarda ölçülen sesüstü atım hızı değerleri de bir miktar daha küçük çıkabilir.

Şekil 7.65-66'da yeralan grafikler sesüstü atım hızı ile 150 mm küp cinsinden ölçülen basınç dayanımları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada, basınç dayanımları ile sesüstü atım hızları arasında doğrusal bir ilişki vardır. Grafiklere bakılacak olursa, maksimum agrega tane boyutu büyüdüğünde doğrunun eğimi de artmaktadır. Bir başka deyişle, daha büyük tane içerikli agregaların kullanıldığı karışımlarda sesüstü atım hızlarının dayanıma göre daha dar bir aralıkta değişmektedir.



Şekil 7.65. Kırmataş ile üretilen betonlarda sesüstü atım hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 7.66. Dere agregası ile üretilen betonlarda sesüstü atım hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Grafiklerdeki noktalar doğrusal olarak en iyi eğilimi verecek şekilde analiz edildiğinde, sesüstü atım hızı ile 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı arasındaki formüller Çizelge 7.40’da özetlendiği gibi olur.

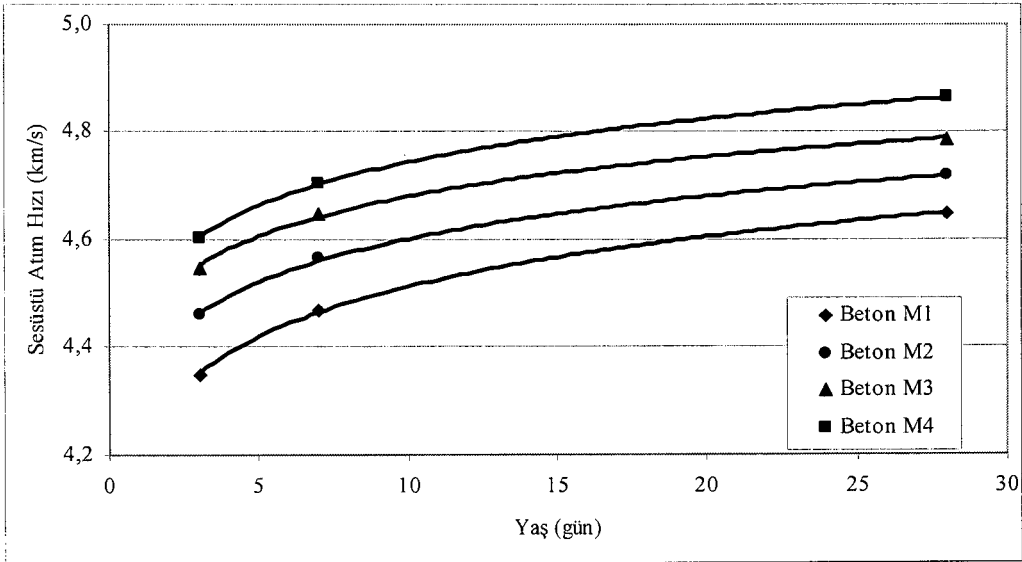
Çizelge 7.40. Sesüstü atım hızı değerlerinden elde edilen formüller

Karışım	Sesüstü atım hızı-Dayanım İlişkisi	R ² Değeri
Beton K1	$S=19.256 \text{ UPV} - 51.317$	0.9018
Beton K2	$S=27.146 \text{ UPV} - 86.461$	0.9469
Beton K3	$S=36.743 \text{ UPV} - 134.24$	0.9338
Beton K4	$S=44.807 \text{ UPV} - 174.46$	0.9663
Beton D1	$S=25.646 \text{ UPV} - 78.418$	0.9688
Beton D2	$S=31.951 \text{ UPV} - 109.36$	0.9681
Beton D3	$S=46.405 \text{ UPV} - 174.50$	0.9841
Beton D4	$S=59.349 \text{ UPV} - 238.02$	0.9912

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

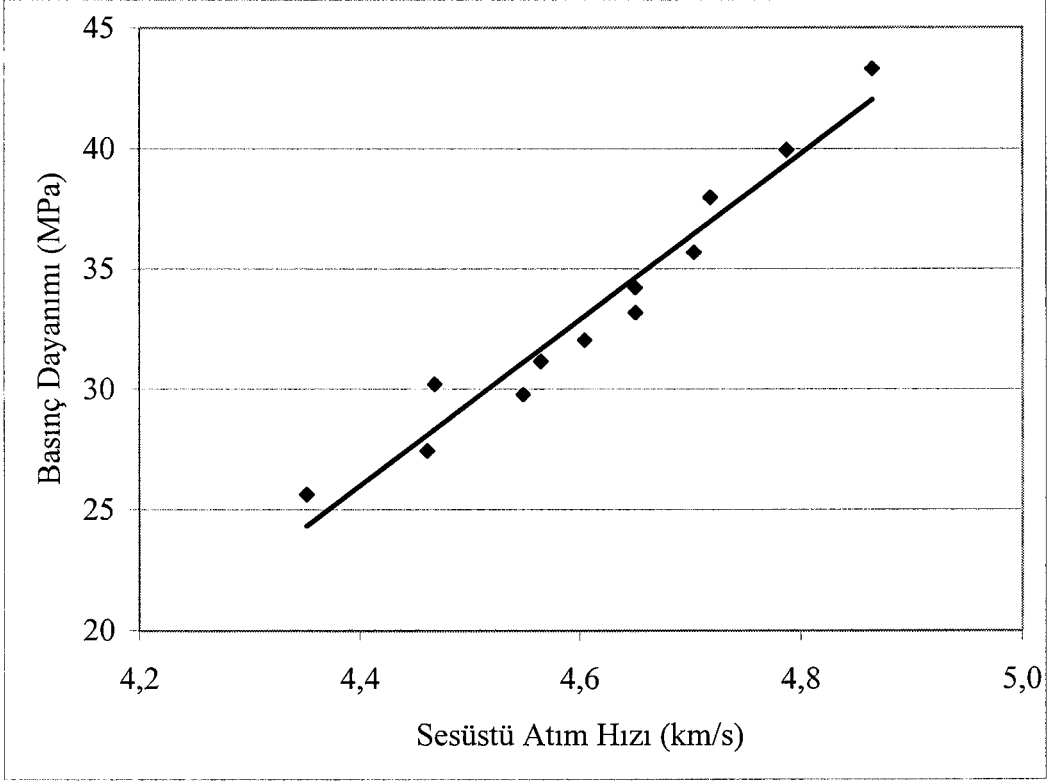
UPV : sesüstü atım hızı (km/s)

Farklı dayanım seviyelerinde üretilen betonlarla dökülen kirişler üzerinde ölçülen sesüstü atım hızı değerleri ile beton yaşı arasındaki ilişki Şekil 7.67’de gösterilmiştir. Sesüstü atım hızı değerleri beton yaşı ile azalan oranda artmaktadır. Beton dayanım seviyesi yükseldiğinde eğrinin şeklinde önemli bir değişiklik olmamakla birlikte, sesüstü atım hızı değerleri bir miktar artış göstermektedir.



Şekil 7.67. Farklı seviyelerindeki betonlar için sesüstü atım hızı değerlerinin beton yaşı ile değişimi

Şekil 7.68 ise sesüstü atım hızı değerleri ile 150 mm küp cinsinden beton basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 7.68. Basınç dayanımı ile sesüstü atım hızı değerleri arasındaki ilişki

Şekil 7.69’da gösterilen değerleri ile doğrusal regresyon analizi yapıldığında basınç dayanımı ile sesüstü atım hızı değerleri arasında aşağıdaki gibi bir ilişki kurulabilir;

$$S = 34.499 \text{ UPV} - 125.8$$

Burada;

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

UPV : sesüstü atım hızı (km/s)

Bu analiz sonucunda R^2 değeri de 0.9506 olarak hesaplanmıştır.

7.5. Beton Çekici ve Sesüstü Atım Hızı Testleri Sonuçlarının Birlikte Değerlendirilmesi

İki farklı yöntemin birlikte değerlendirilmesi, bazen yorum kolaylığı sağlamak ve sonuca ulaşmayı kolaylaştırabilmektedir. Beton çekici ve sesüstü atım hızının birlikte değerlendirilmesi beton dayanımı tahmininde her iki yöntemin ayrı kullanıldığı durumlara nazaran daha iyi sonuçlar vermektedir. Bu nedenle araştırmacılar, geri sıçrama sayısı ve sesüstü atım hızı değerlerini birlikte kullanarak beton dayanımını tahmin etmeye çalışmışlar ve çeşitli formüller üretmişlerdir. Çizelge 7.41 bu formüllerden bazılarını göstermektedir.

Çizelge 7.41. Beton çekici ve sesüstü atım hızı tekniklerinin birlikte değerlendirildiği formüller

No	Formül	Öneriyi Yapan
1	$f_c = -25.5680.000635 + 1.427(RN)^3 + 8.397(UPV)$	Bellander
2	$f_c = -24.668 + 1.427(RN) + 0.0294(UPV)^4$	Meynink ve Samarin
3	$f_c = -39.570 + 1.532(RN) + 5.061(UPV)$	Tanigawa ve ark.
4	$\log f_c = 3.077\sqrt{\log(RN^3UPV^4)} - 6.680$	Yapı Merkezi
5	$f_c = 0.00153(RN^3UPV^4)^{0.611}$	Arioğlu ve Köylüoğlu

f_c : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

RN : Geri sıçrama sayısı

UPV : Sesüstü atım hızı (km/s)

DeneySEL çalışmanın birinci bölümünde elde edilen geri sıçrama sayıları ve sesüstü atım hızı değerlerinin yukarıdaki formüllerde kullanılarak, betonların basınç dayanımları hesaplanmıştır. Yukarıdaki çizelgede yazılan formüllerle elde edilen basınç dayanımları, basınç dayanımı testinden elde edilen 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı değerleriyle kıyaslandığında hesaplanan yüzdelik farklar Çizelge 7.42-44'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.42. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (7 günlük)

Eşitlik No	Tahmin edilen ve deneysel dayanım arasındaki fark (%)							
	K1	K2	K3	K4	D1	D2	D3	D4
1	-38.6	-27.8	-15.1	-6.9	-28.7	-15.1	-4.1	7.8
2	-38.7	-27.2	-14.1	-4.8	-27.9	-14.0	-2.4	9.9
3	-36.7	-26.1	-16.1	-9.2	-25.1	-13.0	-3.2	6.0
4	-44.1	-33.1	-19.0	-9.3	-35.0	-20.8	-8.7	4.3
5	-45.3	-34.3	-20.3	-10.5	-36.3	-22.3	-10.2	2.7

K1: kırmataş, $D_{max}=10$ mm

K2: kırmataş, $D_{max}=15$ mm

K3: kırmataş, $D_{max}=22$ mm

K4: kırmataş, $D_{max}=30$ mm

D1: dere agregası, $D_{max}=10$ mm

D2: dere agregası, $D_{max}=15$ mm

D3: dere agregası, $D_{max}=22$ mm

D4: dere agregası, $D_{max}=30$ mm

Çizelge 7.43. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (28 günlük)

Eşitlik No	Tahmin edilen ve deneysel dayanım arasındaki fark (%)							
	K1	K2	K3	K4	D1	D2	D3	D4
1	-27.3	-21.6	-12.1	-7.1	-26.8	-17.3	-11.7	-0.8
2	-24.9	-18.7	-8.2	-2.4	-24.5	-14.3	-8.2	3.6
3	-25.5	-19.6	-11.9	-7.9	-24.2	-15.6	-10.3	-0.4
4	-29.3	-22.7	-10.3	-3.0	-29.9	-18.5	-11.9	1.8
5	-30.2	-23.5	-10.8	-3.1	-31.0	-19.4	-12.8	1.3

Çizelge 7.44. Tahmin edilen ve deneysel dayanım değerlerinin karşılaştırılması (90 günlük)

Eşitlik No	Tahmin edilen ve deneysel dayanım arasındaki fark (%)							
	K1	K2	K3	K4	D1	D2	D3	D4
1	-28.3	-23.7	-15.9	-11.3	-23.1	-15.4	-11.3	-8.0
2	-25.6	-20.9	-12.4	-7.3	-20.4	-12.5	-8.3	-4.3
3	-26.7	-22.4	-16.1	-12.6	-20.2	-13.8	-10.3	-8.3
4	-28.5	-23.0	-12.2	-5.3	-24.5	-14.7	-9.5	-4.0
5	-29.0	-23.4	-12.1	-4.8	-25.2	-15.1	-9.7	-4.0

Çizelgeler incelendiğinde, değerlendirmede kullanılan formüllerin maksimum agregata tane boyutu küçük olduğunda çok iyi sonuçlar vermediği gözlenmektedir. Tüm formüller 15 mm ve daha büyük maksimum agregata tane boyutu ile üretilen karışımlarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Maksimum agregata tane boyutu büyüdüğünde formüllerle elde edilen ve gerçek basınç dayanımları arasındaki farklar azalmaktadır.

Burada deneysel çalışmanın birinci bölümünde elde edilen sonuçlardan beton çekici sayıları ve sesüstü atım hızı değerleri arasında ikili bir regresyon yapılarak kırmataş ve dere agregasından üretilen betonlar için farklı ilişkiler

bulunmuştur. Çizelge 7.45'deki ilişkiler bu regresyon analizinin sonuçlarını formül halinde özetlemektedir;

Çizelge 7.45. Basınç dayanımı ile geri sıçrama sayısı ve sesüstü atım hızı arasındaki ilişki

Agrega Çeşidi	Formül
Kırmataş	$S = 3.009 RN - 14.080 UPV + 9.582$
Dere agregası	$S = 2.985 RN - 13.211 UPV + 3.022$
Bilinmiyor	$S = 2.659 RN - 9.388 UPV - 3.091$

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

RN : Geri sıçrama sayısı

UPV : Sesüstü atım hızı (km/s)

Beton karışımında kullanılan agreganın, kırmataş veya dere agregası olarak çeşidi bilindiğinde, geri sıçrama sayısı ve sesüstü atım hızının birlikte değerlendirildiği formüller daha iyi sonuçlar vermektedir.

Beton dayanım seviyesinin deney sonuçları üzerindeki etkisinin incelendiği deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, farklı dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan elde edilen kiriş numuneleri üzerinde ölçülen geri sıçrama sayıları ve sesüstü atım hızı değerleri birlikte değerlendirildiğinde aşağıdaki formül elde edilebilir;

$$S = 2.093 RN - 2.448 UPV - 39.232$$

Burada;

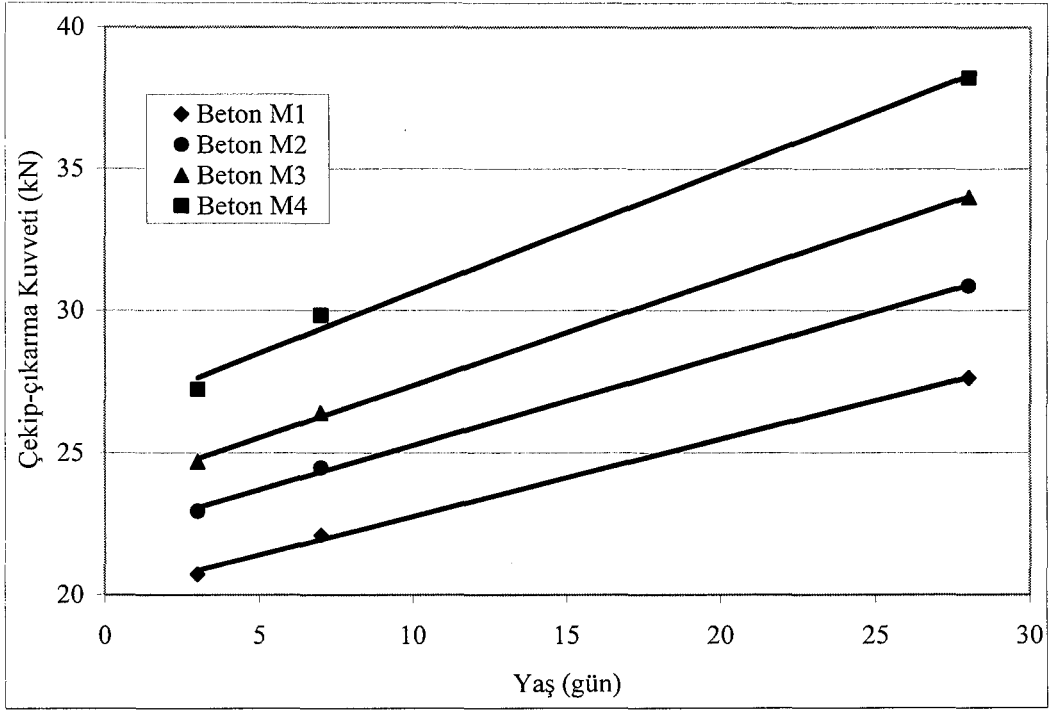
S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

RN : Geri sıçrama sayısı

UPV : Sesüstü atım hızı (km/s)

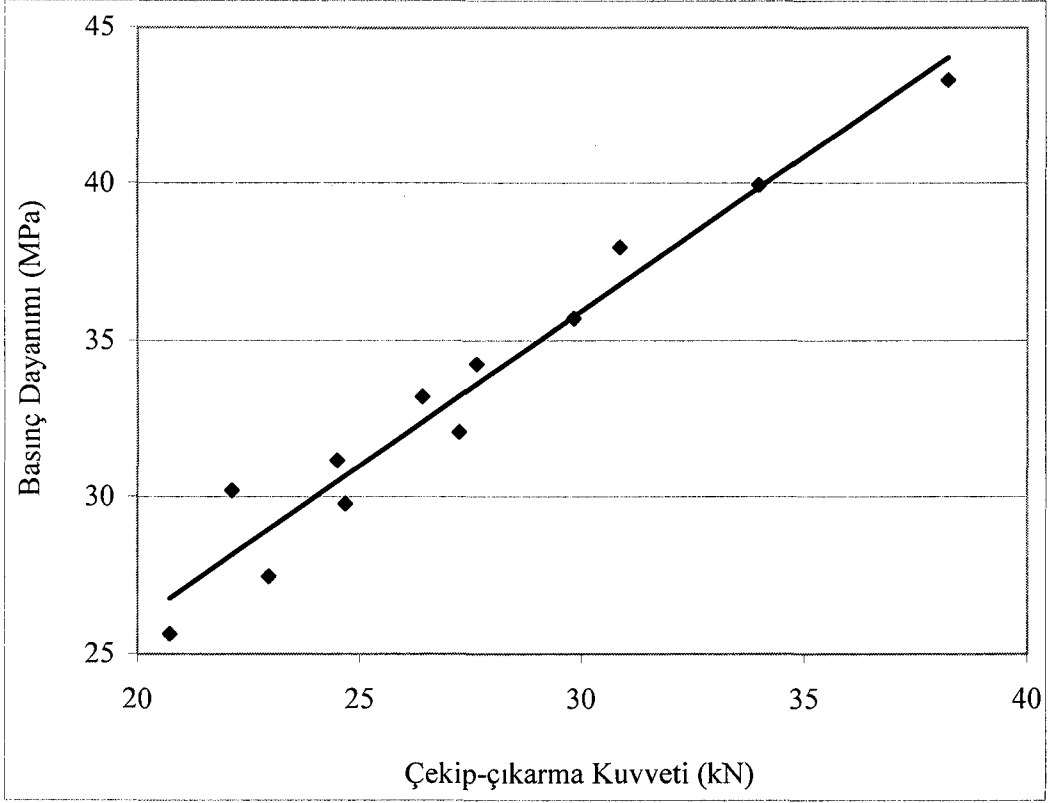
7.6. Çekip-Çıkarma Testleri Sonuçları

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, farklı dayanım seviyelerinde üretilen betonlardan elde edilen kirişler üzerinde çekip çıkarma deneyleri uygulanmıştır. Çekip-çıkarma deneyleri için her kiriş üzerinde 6 adet ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak çekip-çıkarma kuvvetleri hesaplanmıştır. Şekil 7.69 çeşitli dayanım seviyelerindeki beton numuneler üzerinde ölçülen çekip-çıkarma kuvvetinin beton yaşı ile değişimini göstermektedir. Grafiklere göre, beton kirişler üzerinde ölçülen çekip-çıkarma kuvveti beton yaşı ile doğrusal olarak değişmekte, beton yaşı ilerledikçe çekip-çıkarma kuvvetleri de artmaktadır. Ayrıca doğal olarak, nispeten yüksek dayanımlı betonlarda daha yüksek çekip-çıkarma kuvvetleri ölçülmektedir.



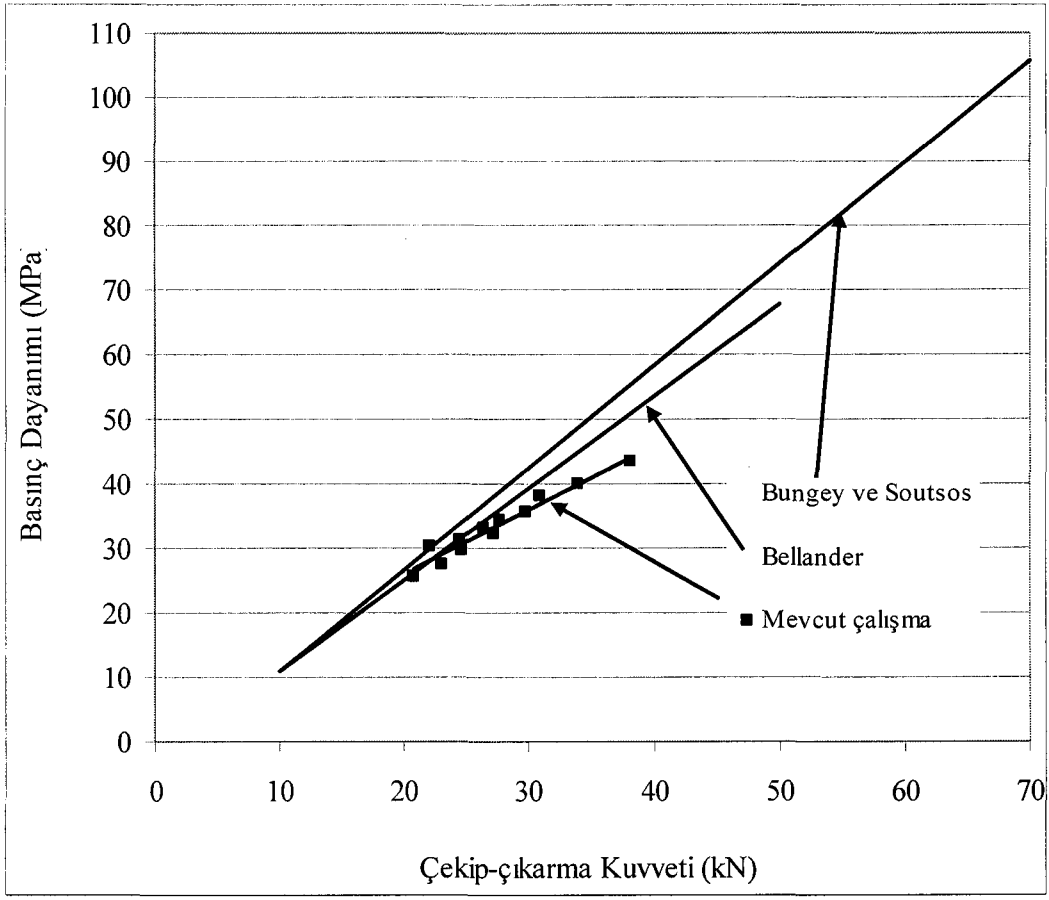
Şekil 7.69. Çekip-çıkarma kuvvetinin beton yaşı ile değişimi

Şekil 7.70 ise çekip-çıkarma kuvvetinin 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı ile korelasyonunu göstermektedir. Şekillerden anlaşılabileceği gibi çekip-çıkarma kuvveti beton yaşı ile doğrusal olarak, aynı zamanda basınç dayanımı da çekip-çıkarma kuvvetiyle doğrusal olarak değişmektedir.



Şekil 7.70. Çekip-çıkarma kuvvetinin basınç dayanımı ile değişimi

Sonuçlar Bellander tarafından ve Bungey ve Soutsos tarafından bulunan sonuçlara oldukça yakındır. Beton dayanımı arttıkça çekip-çıkarma kuvveti de doğrusal olarak artmaktadır. Şekil 7.71 sözü geçen araştırmacıların ve mevcut çalışmanın sonuçlarını birlikte göstermektedir. Mevcut çalışmada bulunan ilişki diğer araştırmacıların sonuçlarına düşük dayanım seviyelerinde daha yakındır. Bu da beton dayanım seviyesinin çekip-çıkarma testi sonuçlarını etkileyebileceğini göstermektedir. Mevcut çalışmada, çekip çıkarma deneyleri 25-45 MPa küp dayanımına sahip betonlar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, beton yapımında kullanılan malzemelerin özellikleri ve oranları da çekip-çıkarma kuvveti ile basınç dayanımı arasında bulunan ilişki üzerinde etkilidir.



Şekil 7.71. Mevcut çalışma ve diğer araştırmacıların sonuçları

Mevcut çalışmada bulunan basınç dayanımı ile çekip-çıkarma kuvveti arasındaki doğrusal ilişki formül haline getirilecek olursa aşağıdaki formül elde edilir;

$$S = 0.9868 PF + 6.3201$$

Burada;

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

PF : Çekip-çıkarma kuvveti (kN)

Bu regresyon analizinde R^2 değeri 0.9544 olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1'e çok yakın bir değerdir ve bu da çekip-çıkarma kuvvetiyle basınç dayanımı arasında sağlıklı bir ilişki kurabileceğini göstermektedir.

7.7. Olgunluk Testleri Sonuçları

Bu çalışmada, beton olgunluk deneyleri için bir beton olgunluk ölçeri kullanılmıştır. Bu cihaz, deney için hazırlanan kiriş numuneye deney süresince bağlı kalmış ve betonun sıcaklığını kür süresince ilk 48 saatte, yarım saatte 1 defa ve daha sonra saatte bir defa olmak üzere kaydetmiştir. Böylece, beton olgunluk faktörünü hesaplayabilmek için gerekli olan veri sağlanmıştır. Beton olgunluk ölçeri aynı mantıkla beton olgunluk faktörlerini de her ölçüm yaptığı saat için ayrıca hesaplamıştır. Burada, cihaz beton olgunluk faktörünü aşağıdaki formüle göre hesaplamaktadır;

$$M = \sum (T + 10) * t$$

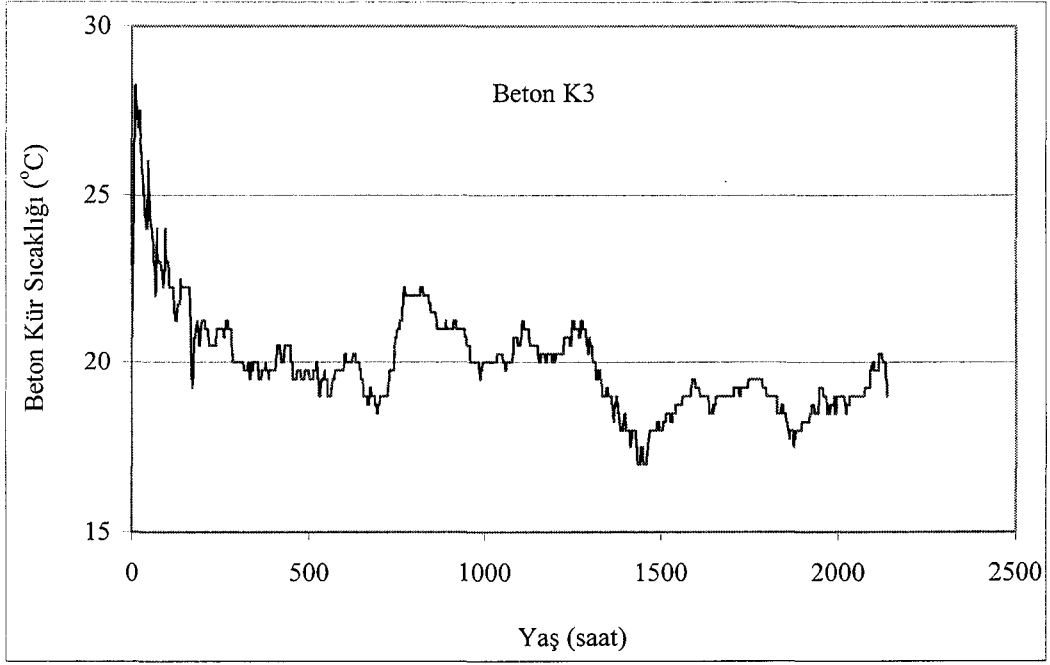
Burada;

M :olgunluk faktörü (°C*saat)

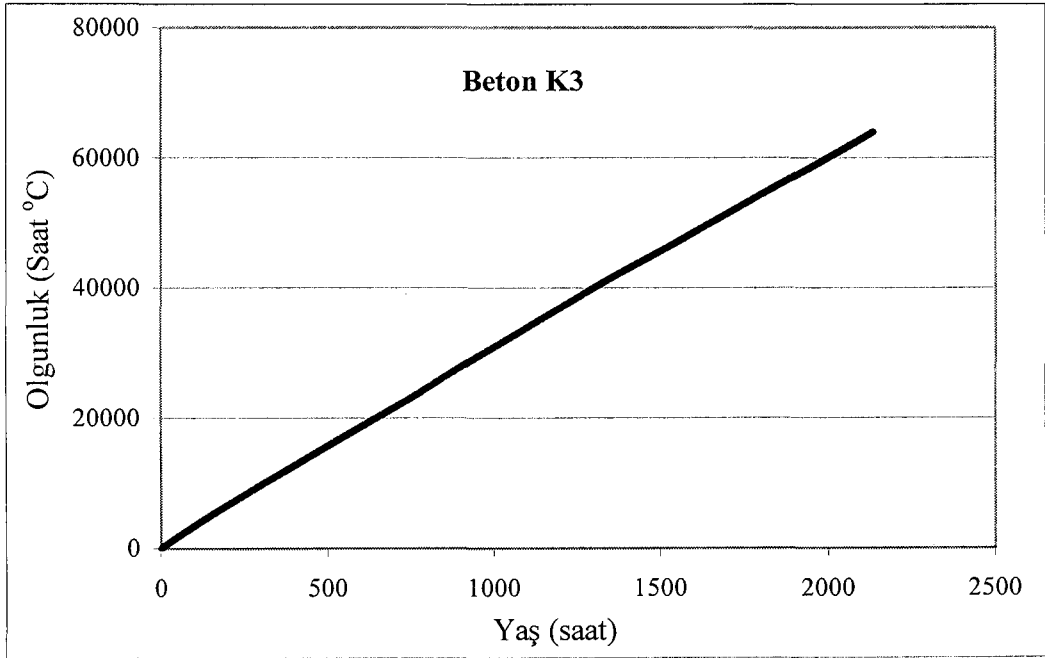
T :beton sıcaklığı (°C)

t :kür süresi (saat)

Deneylerde kullanılan beton olgunluk ölçeri 4 kanallı bir cihaz olduğundan, tüm hesaplamalar kirişin 4 farklı yerinden alınan verilerin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.72 Beton K3 karışımı ile üretilen kiriş üzerinde 90 gün boyunca ölçülen beton kür sıcaklıklarını, Şekil 7.73 ise beton olgunluk faktörünün kür süresi boyunca değişimini göstermektedir.



Şekil 7.72. Beton kür sıcaklığının kür süresi boyunca değişimi



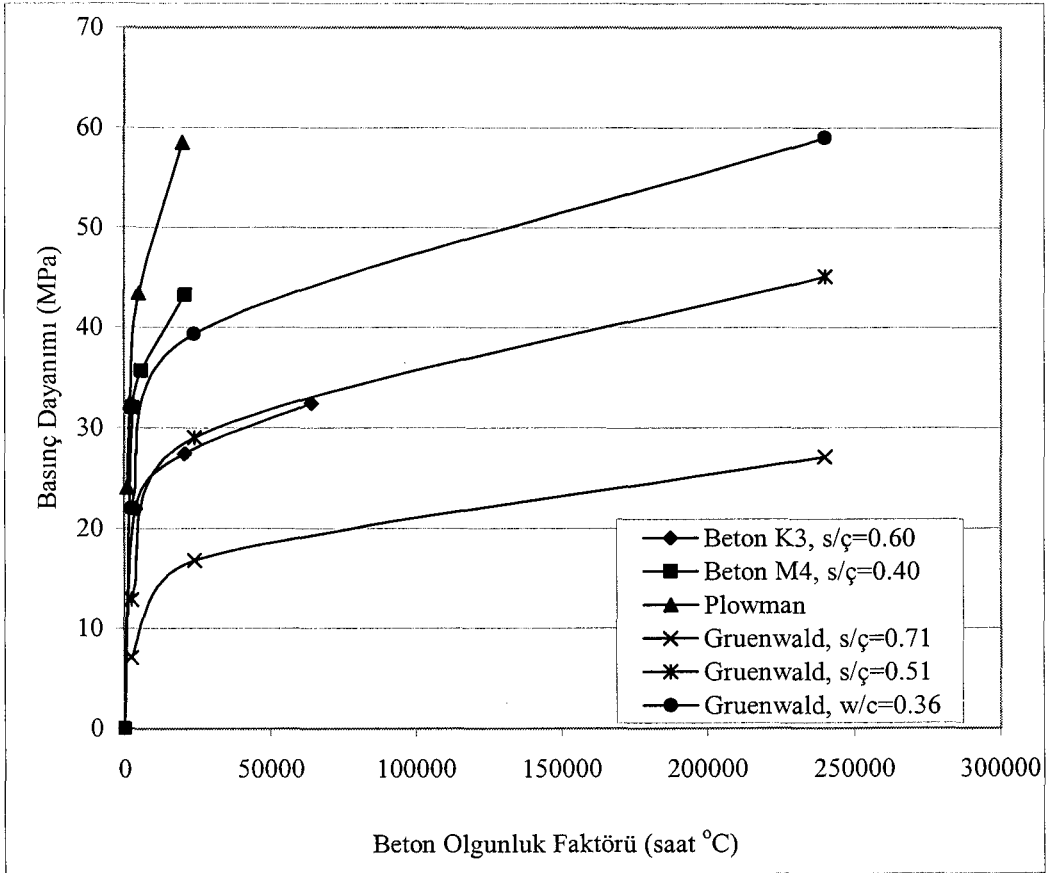
Şekil 7.73. Beton olgunluk faktörünün kür süresi boyunca değişimi

Beton kür sıcaklığı, kür süresi boyunca ölçüm yapılan kiriş için ortalama 20 °C civarında olmuştur. Betonun erken yaşlarında bu sıcaklık yaklaşık 28 °C dolaylarındadır. Bu durum betonun ilk yaşlarda ortaya çıkardığı yüksek

miktardaki ısıdan kaynaklanmaktadır. Çimentonun su ile reaksiyonu esnasında ısı açığa çıkmaktadır. Bu açığa çıkan ısı miktarı ilk yaşlarda daha fazla olmakta daha sonra ısı açığa çıkma hızı yavaşlamaktadır. Bu nedenle ilk yaşlarda ölçülen beton sıcaklıkları kür süresi boyunca ölçülen beton sıcaklıklarına göre bir miktar yüksektir.

Beton olgunluk faktörü de kür sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Beton kür sıcaklığının dar bir aralıkta seyretmesi sonucunda, beton olgunluk faktörünün beton yaşı ile olan ilişkisi de doğrusal olmuştur.

Beton olgunluk faktörü yardımıyla beton dayanımlarının belirlenmesi söz konusu olduğunda, deneysel çalışmanın birinci bölümünde üretilen Beton K3 karışımı ve deneysel çalışmanın ikinci bölümünde üretilen Beton M4 karışımı için Şekil 7.74’de verilen eğriler kullanılabilir. Bu grafikte diğer araştırmacıların ve kaynakların belirttiği ilişkiye çok benzer ilişkiler yer almaktadır. Grafik üzerinde diğer araştırmacıların bulduğu ve önerdiği ilişkiler de görülmektedir [1].

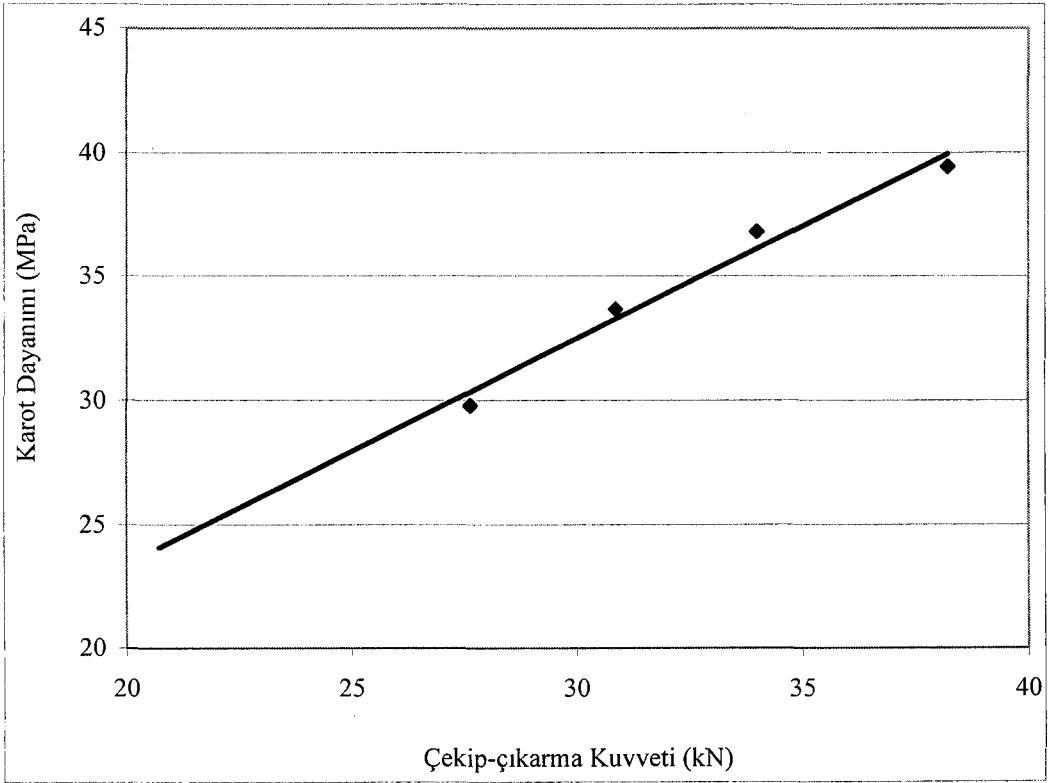


Şekil 7.74. Beton basınç dayanımının olgunluk faktörü ile ilişkisi

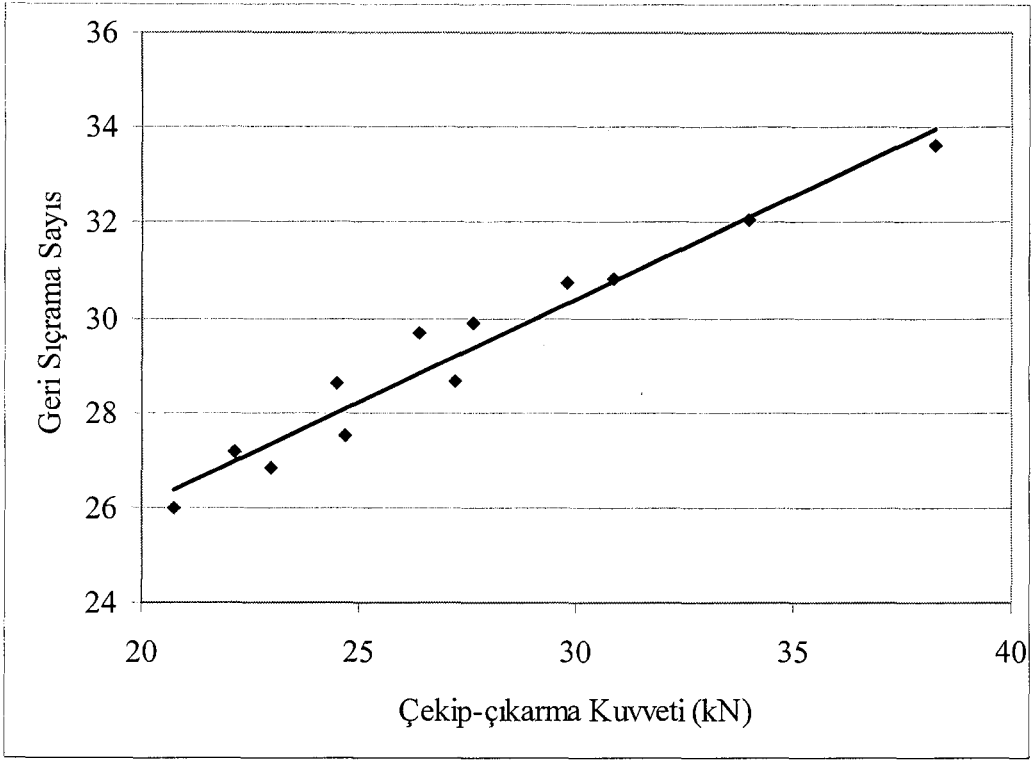
Burada, Gruenwald'ın 0.51 su/çimento oranıyla üretilen betonu ile 0.6 su/çimento oranıyla üretilen Beton K3 karışımı arasında oldukça yakın bir ilişki gözlenmektedir. Aynı şekilde Gruenwald'ın 0.36 su/çimento oranıyla ürettiği betonlarla 0.40 su/çimento oranıyla üretilen Beton M4 karışımının olgunluk faktörleriyle hesaplanan basınç dayanımları birbirine çok yakındır. Dolayısıyla, şunu belirtmek gerekir ki, beton olgunluk faktörü ile beton basınç dayanımı arasındaki ilişki beton karışımında yeralan malzemelerin oranlarına, malzemelerin çeşitlerine, su/çimento oranına, kür sıcaklıklarının değişim aralıklarına ve kür ortamının nem derecesine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu durumda, şantiyede yapılacak ölçümlerin değerlendirilmesi için mutlaka kullanılan betonun özelliklerinin iyi bilinmesi ve bu beton karışımı için özel bir olgunluk-basınç dayanımı ilişkisinin oluşturulması gerekmektedir.

7.8. Çekip-çıkarma Kuvveti ve Diğer Testlerin Sonuçları Arasındaki İlişki

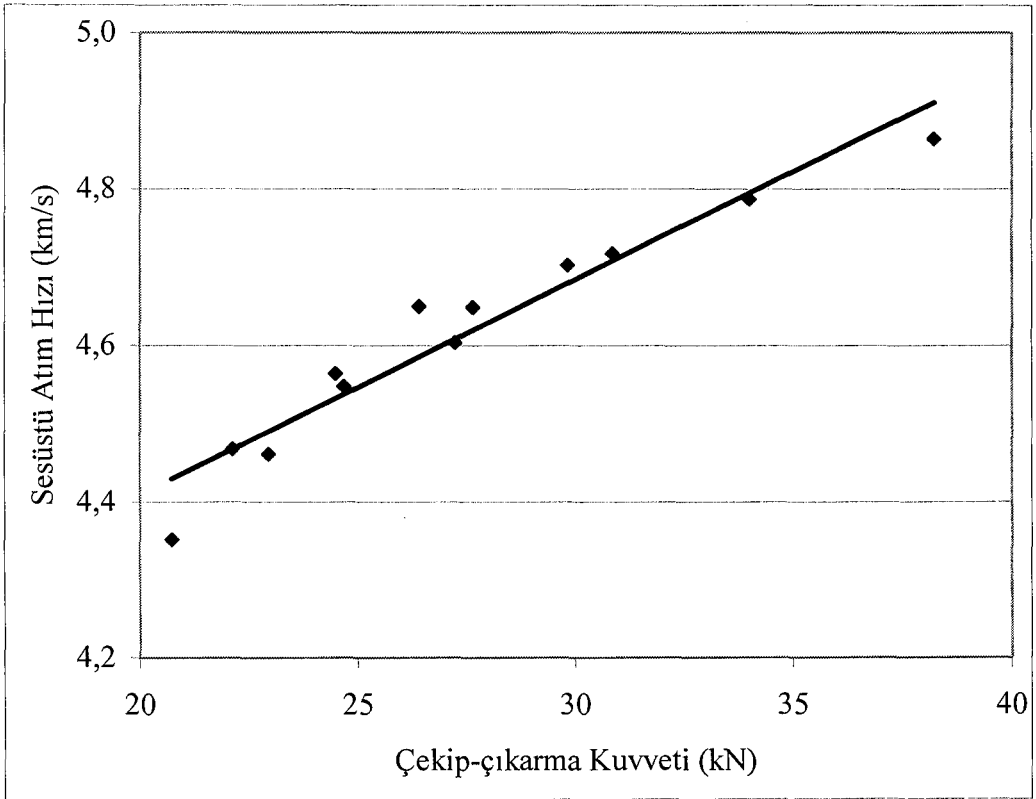
Daha önceki kısımlarda, karot dayanımları, geri sıçrama sayıları, sesüstü atım hızları, çekip-çıkarma kuvvetleri ve beton olgunluk faktörleriyle basınç dayanımı arasındaki ilişkiler gözden geçirildi. Araştırmacılar da daha önceki çalışmalarında bu tür ilişkiler kurmuşlar ve çeşitli dayanım tahmin modelleri önermişlerdir. Çalışmanın bu kısmında, daha önce henüz kurulmamış olan çekip-çıkarma kuvvetleriyle diğer testlerin sonuçları arasında ilişkiler kurulmuştur. Şekil 7.75-78 sırasıyla çekip-çıkarma kuvveti ile karot dayanımları, geri sıçrama sayıları, sesüstü atım hızları ve beton olgunluk faktörleri arasındaki ilişkileri özetlemektedir. Burada karot dayanımı 94 mm çapında ve boy/çap oranı 1 olan karot numunesinin basınç dayanımıdır.



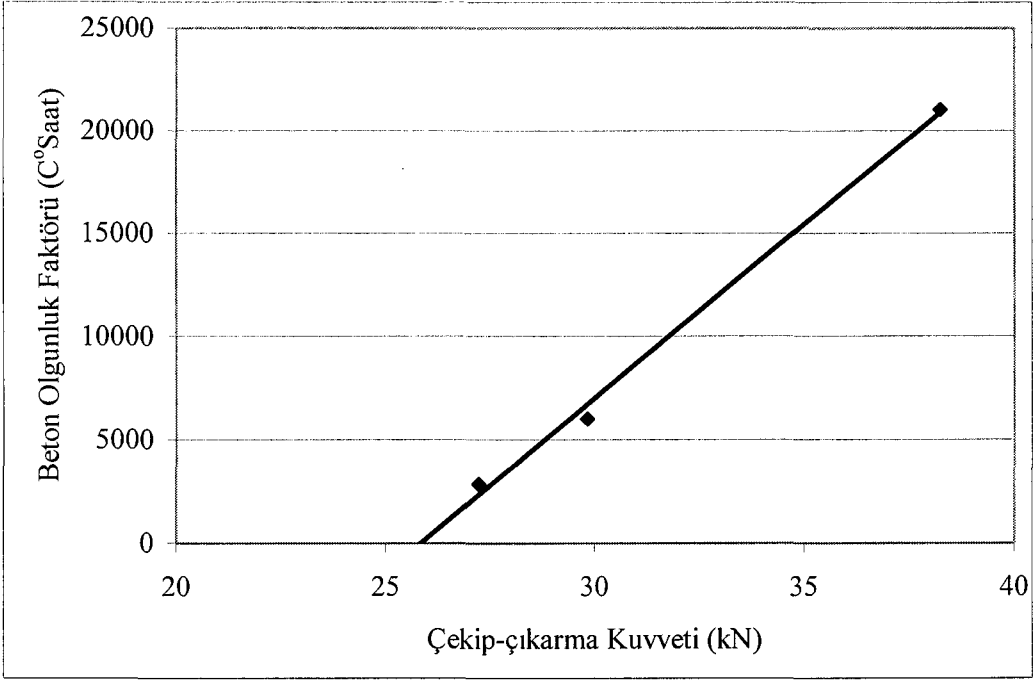
Şekil 7.75. Çekip-çıkarma kuvveti ile karot dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 7.76. Çekip-çıkarma kuvveti ile geri sıçrama sayısı arasındaki ilişki



Şekil 7.77. Çekip-çıkarma kuvveti ile sesüstü atım hızı değerleri arasındaki ilişki



Şekil 7.78. Çekip-çıkarma kuvveti ile beton olgunluk faktörü arasındaki ilişki

Burada doğrusal regresyon analizleri ile çekip-çıkarma yöntemi ve diğer yöntemler arasında aşağıda yazılan ilişkiler elde edilebilir;

CS = 0.9073 PF + 5.279	$R^2 = 0.9766$
RN = 0.4333 PF + 17.412	$R^2 = 0.9529$
UPV = 0.0276 PF + 3.8585	$R^2 = 0.9316$
M = 1687.3 PF - 43624	$R^2 = 0.9959$

Burada;

CS : 94 mm çapında ve boy/çap oranı 1 olan karot numunesinin dayanımı (MPa)

PF : Çekip-çıkarma kuvveti (kN) olur.

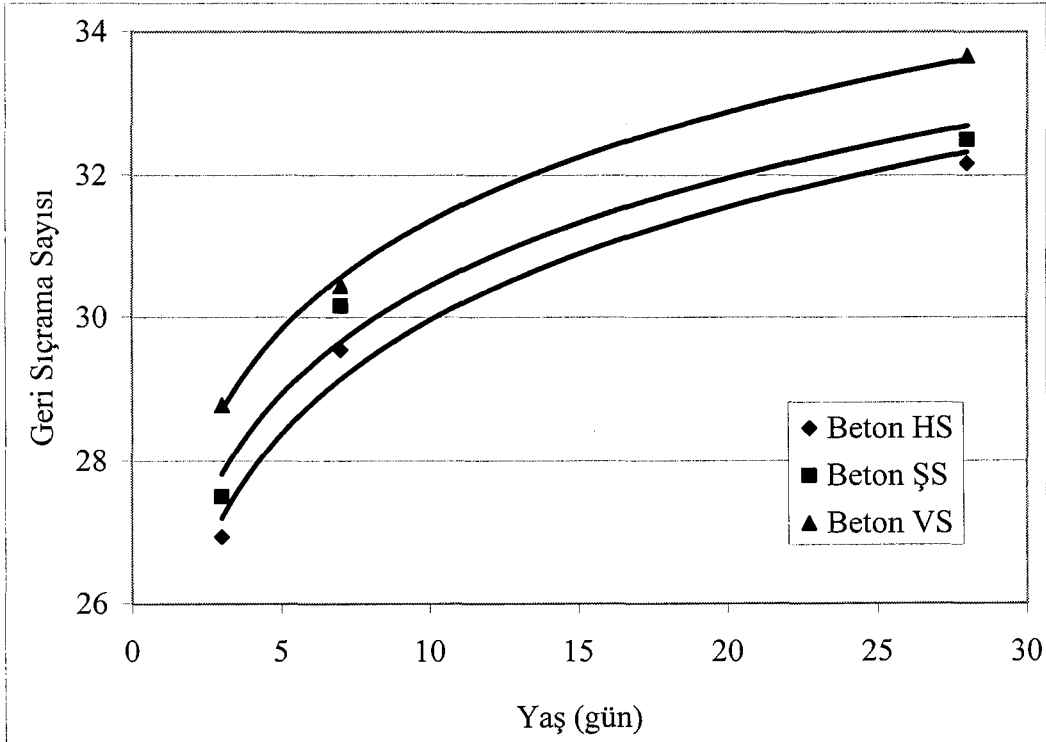
RN : Geri sıçrama sayısı

UPV : Sesüstü atım hızı (km/s)

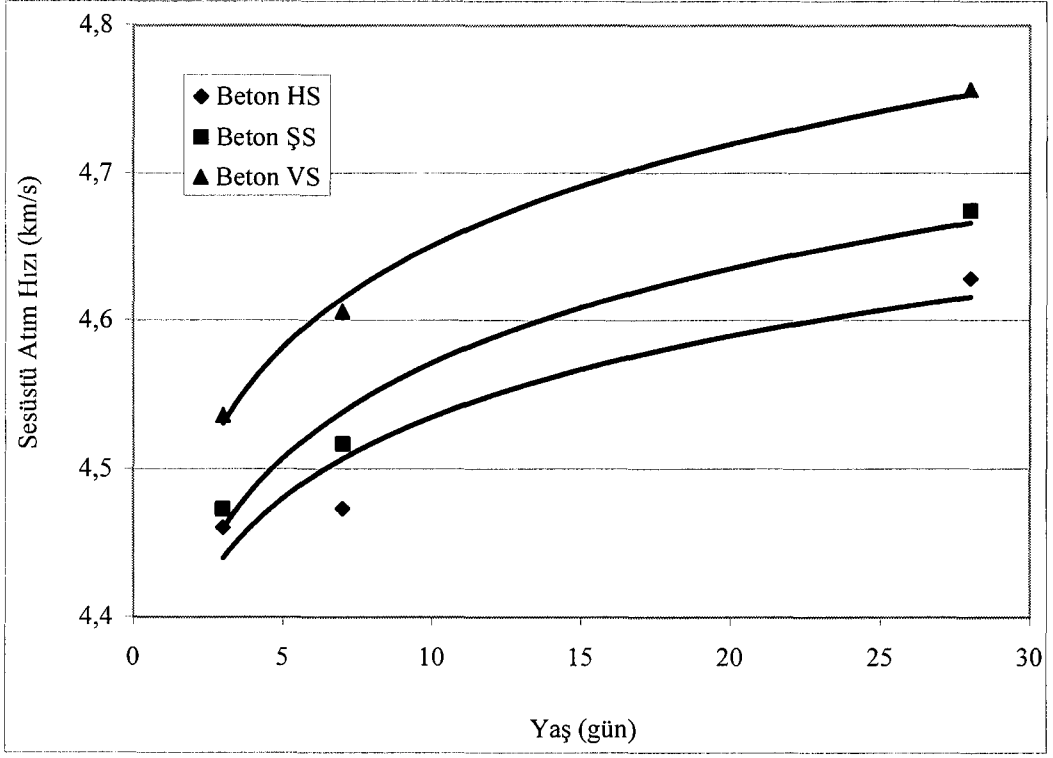
M : Beton olgunluk faktörü (°C saat)

7.9. Sıkıştırmanın Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi

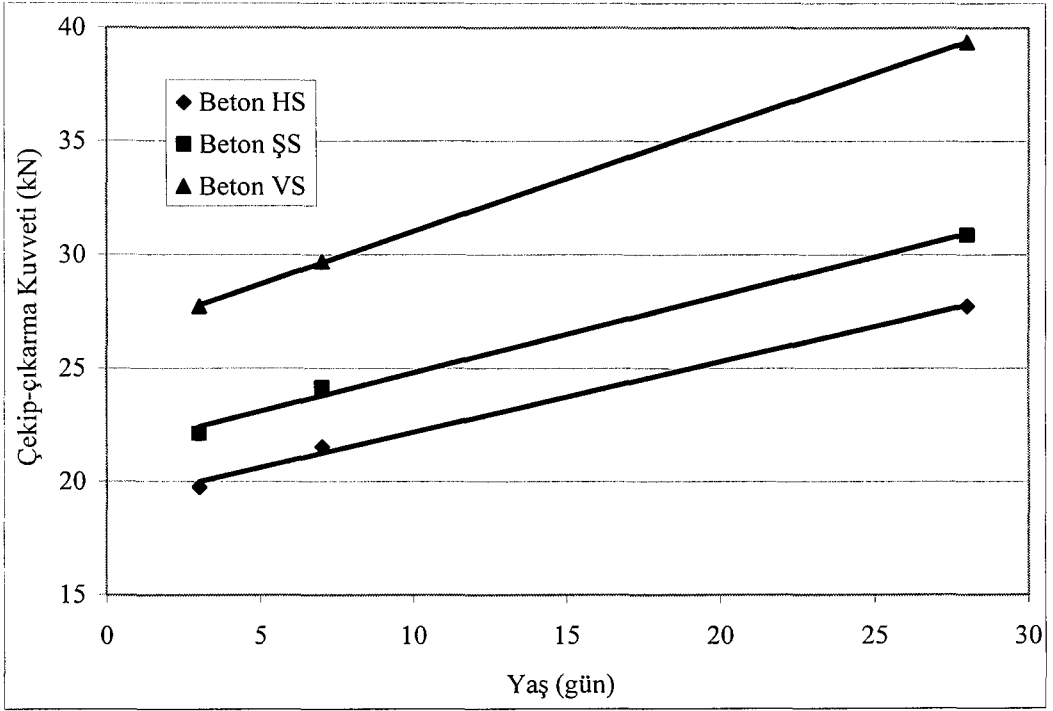
Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, bir grup beton numunesi üzerinde sıkıştırmanın dayanıma ve test sonuçlarına olan etkisi de incelenmiştir. Bu deneylerde, kiriş numuneleri döküldükten sonra üç farklı seviyede sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Bir grup kiriş vibratörle, bir kısım kiriş 10 cm²'ye bir vuruş yapılarak şişle sıkıştırılmış, bir grup kiriş numunesi ise hiç sıkıştırılmadan bırakılmıştır. Bu kiriş numuneleri üzerinde, beton çekici, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma testleri yapılmış, ayrıca, aynı kiriş numunelerinden farklı çaplarda karot numuneleri çıkarılmıştır. Bahsedilen testlerden elde edilen sonuçlar standart 150 mm küp numunelerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 7.79-81 sırasıyla, geri sıçrama sayısı, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma kuvveti değerlerinin farklı sıkıştırma seviyeleri için beton yaşı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 7.79. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarının yaş ile değişimi



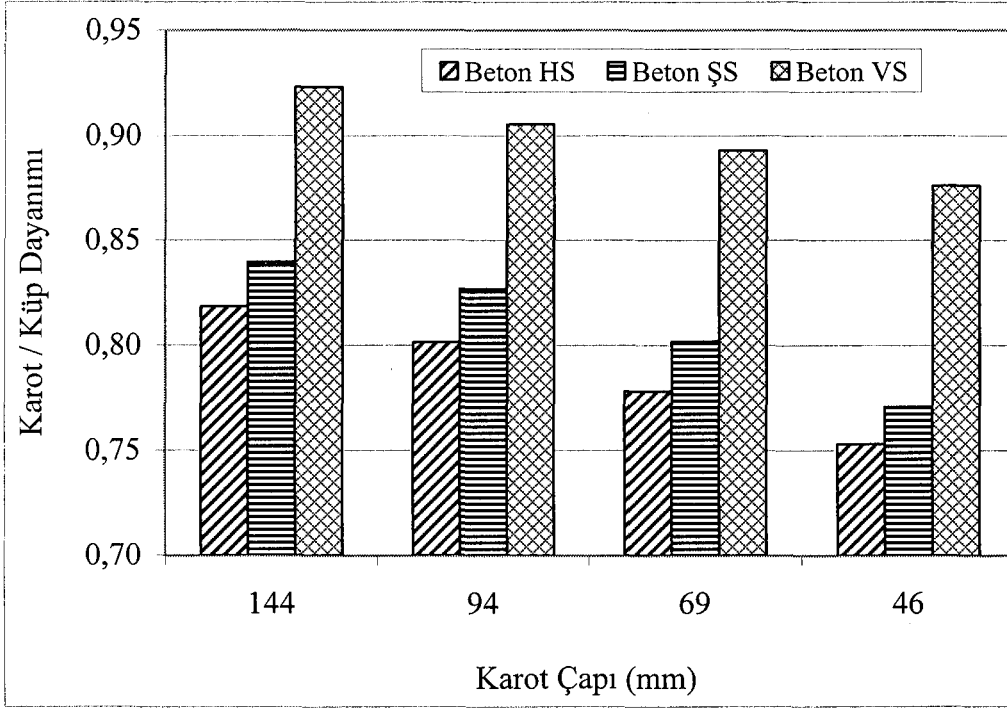
Şekil 7.80. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen sesüstü atım hızlarının yaş ile değişimi



Şekil 7.81. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlarda ölçülen çekip-çıkarma kuvvetlerinin yaş ile değişimi

Şekil 7.79-81'e göre, geri sıçrama sayısı, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma kuvveti betonun sıkıştırma seviyesiyle birlikte değişmektedir. Vibratörle sıkıştırılmış betonlarda, şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlara nazaran daha yüksek geri sıçrama sayıları, sesüstü atım hızları ve çekip-çıkarma kuvvetleri ölçülmüştür.

Şekil 7.82 farklı seviyelerde sıkıştırılmış kirişlerden kesilerek çıkarılan farklı çaplardaki karotların basınç dayanımlarının 150 mm standart küp dayanımına oranını göstermektedir. Burada karot numunelerinin boy/çap oranı 1.0 olarak seçilmiş ve basınç dayanımı deneyleri 28 gün yaşında gerçekleştirilmiştir.

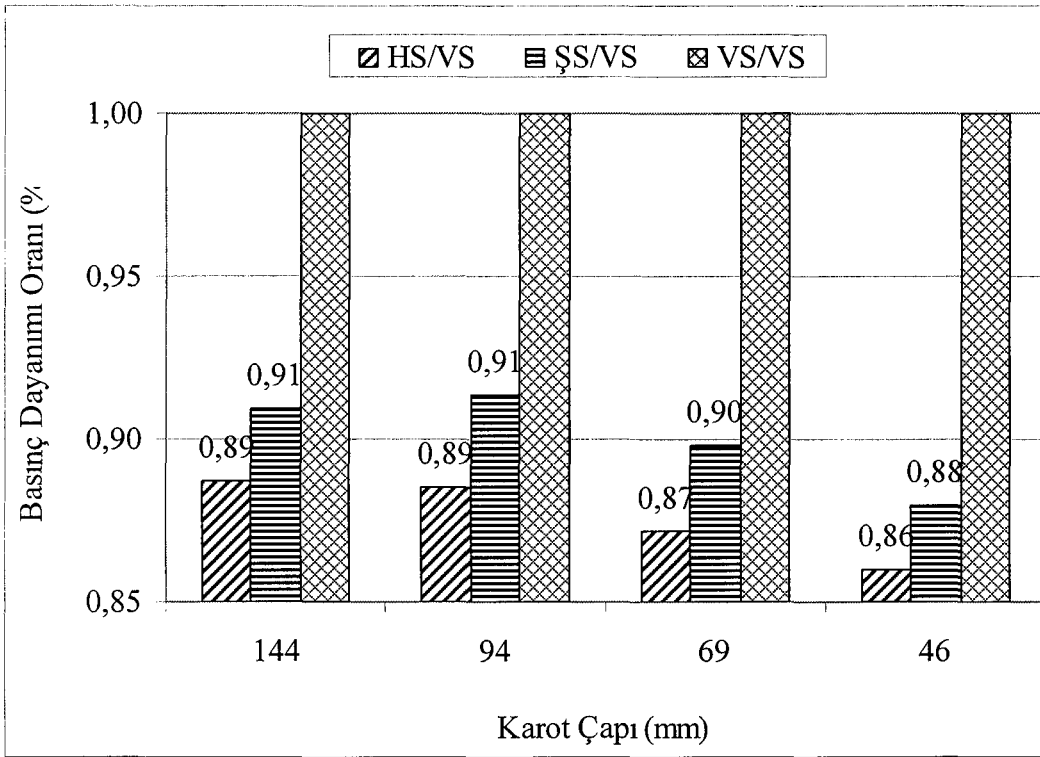


Şekil 7.82. Farklı sıkıştırma seviyelerine sahip betonlardan çıkarılan karotların basınç dayanımının 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı

Şekil 7.82'ye göre, vibratörle sıkıştırılmış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımının küp dayanımına oranı 0.9 civarındadır. Bu oran hiç sıkıştırılmamış betonlar için 0.8'dir. Burada betonların çökme değerlerinin 140 mm olduğu gözönünde bulundurulduğunda bu farkın az olması normaldir. Çökme değerinin çok düşük olduğu işlenebilirliği az olan betonlar için vibratörle

sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlar arasındaki dayanım farkı kaçınılmaz olarak çok daha fazla olacaktır.

Şekil 7.83 şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış kirişlerden çıkarılan karotların dayanımlarının vibratörle sıkıştırılmış kirişlerden çıkarılan karotların basınç dayanımlarına oranını göstermektedir. Bir başka deyişle, vibratörle sıkıştırılmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımı 1 olarak kabul edilmiş ve şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlardan çıkarılan karotların dayanımları buna göre normalize edilmiştir.

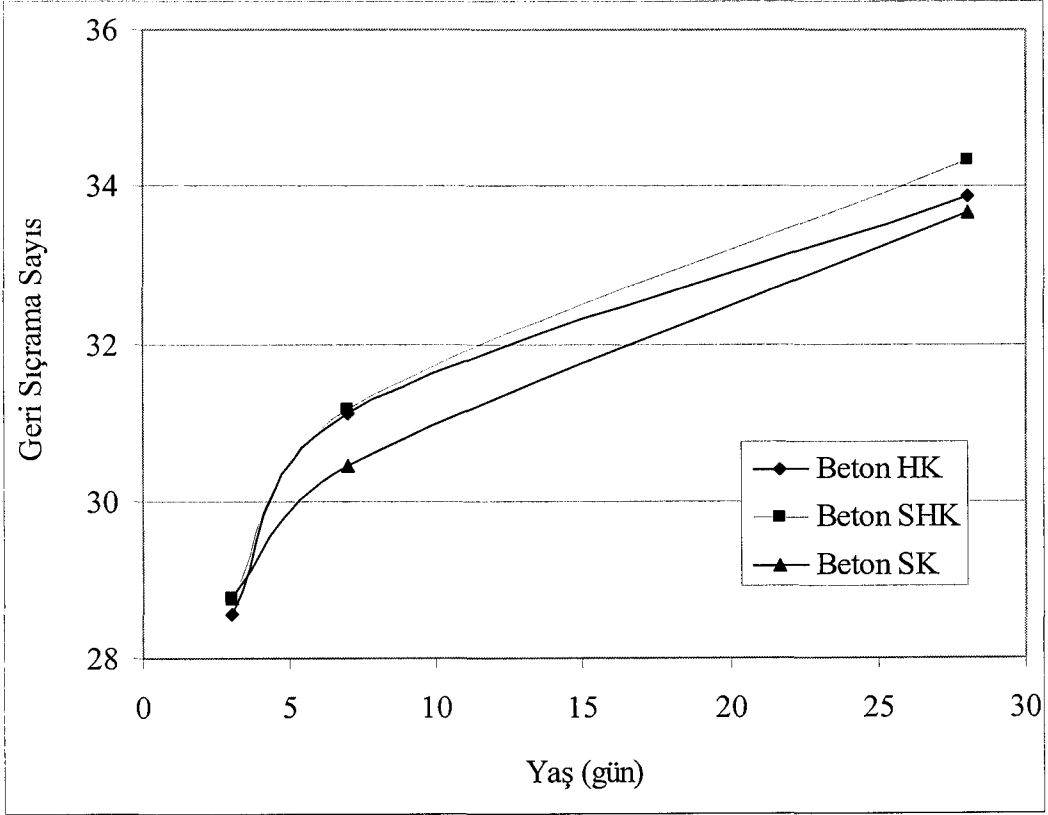


Şekil 7.83. Şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlardan çıkarılan karotların dayanımının vibratörle sıkıştırılmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımına oranı

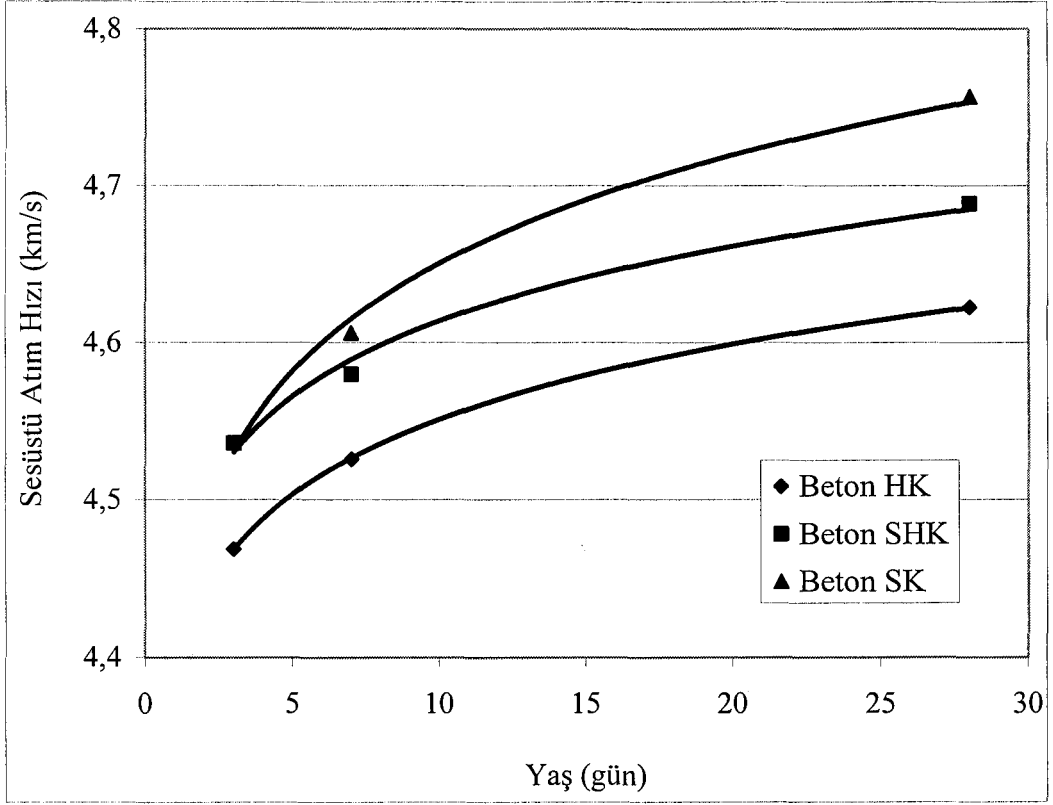
Şekil 7.83'e göre, şişle sıkıştırılmış ve hiç sıkıştırılmamış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımının, vibratörle sıkıştırılmış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımına oranı sırasıyla 0.91 ve 0.89 olarak bulunmuştur. Burada, şişle sıkıştırmanın çok büyük bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Vibratörle yapılan sıkıştırma iyi sonuçlar vermektedir. En düşük sonuçlar ise hiç sıkıştırılmamış betonlarda ölçülmüştür.

7.10. Kürün Beton Dayanımı Üzerindeki Etkisi

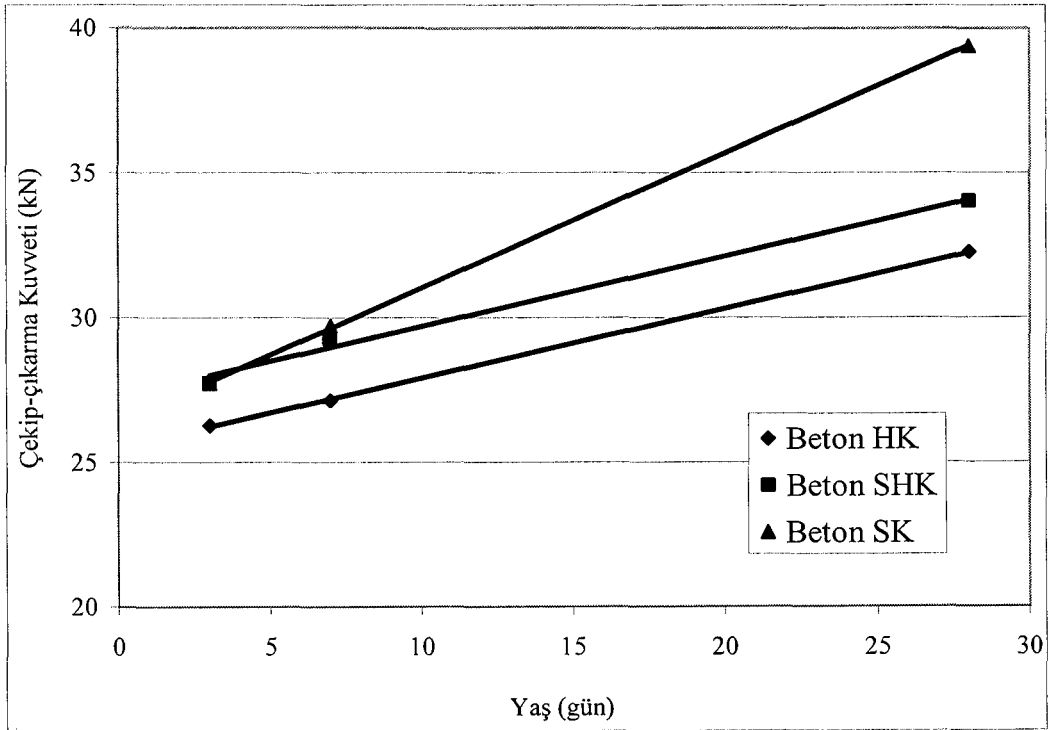
Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, bir grup beton numunesi üzerinde kürün dayanıma ve test sonuçlarına olan etkisi de incelenmiştir. Bu deneylerde, kiriş numuneleri döküldükten sonra üç farklı seviyede kür işlemi uygulanmıştır. Bir grup kiriş sürekli olarak laboratuvarında hava kürüne bırakılmış, bir kısım kiriş numunesine 3 gün boyunca su kürü uygulandıktan sonra hava kürü uygulanmış ve bir grup kiriş numunesi ise sürekli olarak su ile kürlenmiştir. Bu kiriş numuneleri üzerinde, beton çekici, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma testleri yapılmış, ayrıca, aynı kiriş numunelerinden farklı çaplarda karot numuneleri çıkarılmıştır. Bahsedilen testlerden elde edilen sonuçlar standart 150 mm küp numunelerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 7.84-86 sırasıyla, geri sıçrama sayısı, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma kuvveti değerlerinin farklı kür yöntemleri için beton yaşı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 7.84. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarının yaş ile değişimi



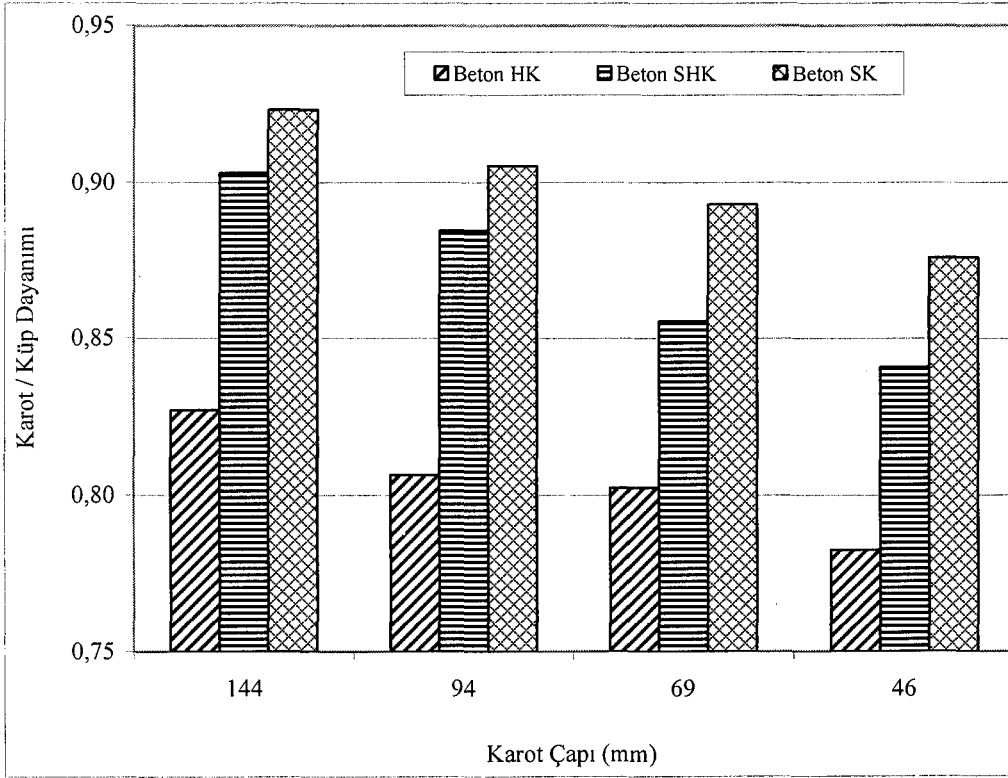
Şekil 7.85. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen sesüstü atım hızlarının yaş ile değişimi



Şekil 7.86. Farklı kür edilen betonlarda ölçülen çekip-çıkarma kuvvetlerinin yaş ile değişimi

Şekil 7.84-86'ya göre, geri sıçrama sayısı, sesüstü atım hızı ve çekip-çıkarma kuvveti betona uygulanan kür yöntemiyle birlikte değişmektedir. Sürekli olarak su kürü uygulanmış kirişlerde nispeten daha yüksek sesüstü atım hızları ve çekip-çıkarma kuvvetleri ölçülmüştür. Sürekli olarak hava kürü uygulanmış ve önce su kürü sonra hava kürü uygulanmış kirişlerde 28 günlük betonlarda bir miktar daha yüksek geri sıçrama sayıları ölçülmüştür. Bunun nedeni kuru numunelerin daha yüksek geri sıçrama değeri vermesidir.

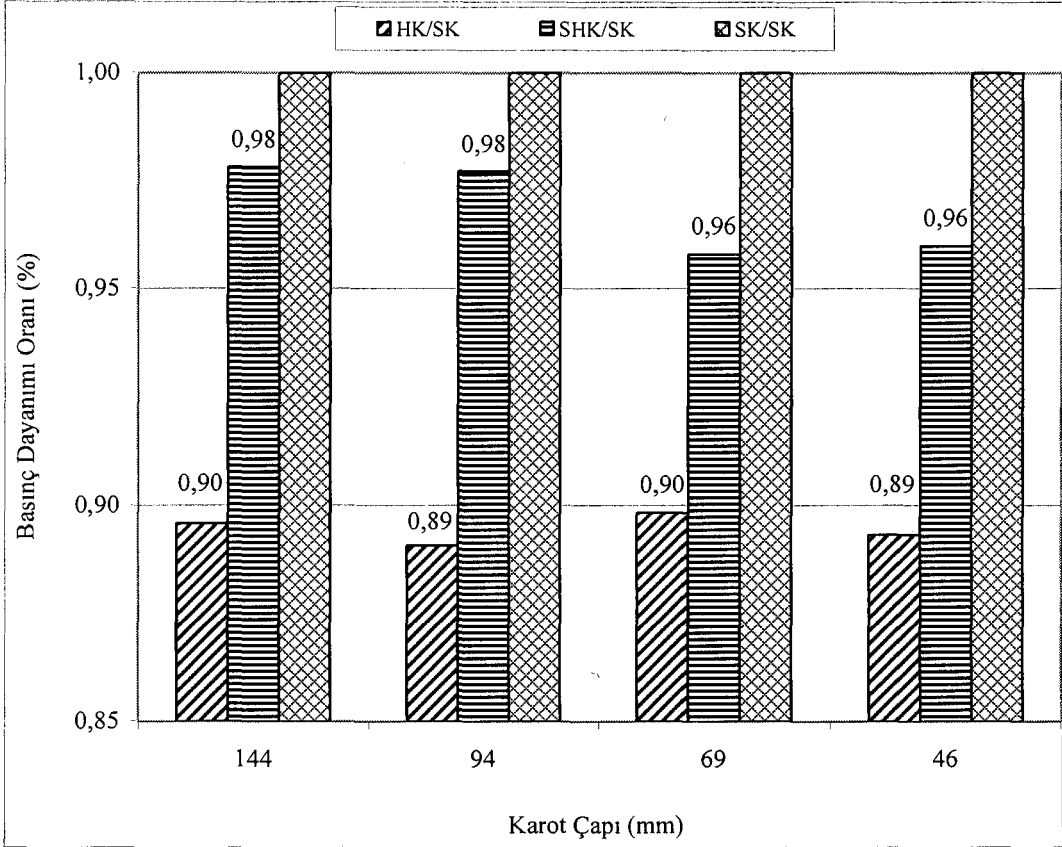
Şekil 7.87 farklı kür edilmiş kirişlerden kesilerek çıkarılan farklı çaplardaki karotların basınç dayanımlarının 150 mm standart küp dayanımına oranını göstermektedir. Burada karot numunelerinin boy/çap oranı 1.0 olarak seçilmiş ve basınç dayanımı deneyleri 28 gün yaşında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.87. Farklı kür edilen betonlardan çıkarılan karotların basınç dayanımının 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı

Şekil 7.87'ye göre, su kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımının küp dayanımına oranı 0.9 civarındadır. Bu oran sürekli hava kürü uygulanmış betonlar için 0.81'dir.

Şekil 7.88 hava kürü ve önce su sonra hava kürü uygulanmış kirişlerden çıkarılan karotların dayanımlarının sürekli su kürüne tabi tutulmuş kirişlerden çıkarılan karotların basınç dayanımlarına oranını göstermektedir. Bir başka deyişle, sürekli su kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımı 1 olarak kabul edilmiş ve diğer kür ortamlarında bırakılan kirişlerden çıkarılan karotların dayanımları buna göre normalize edilmiştir.

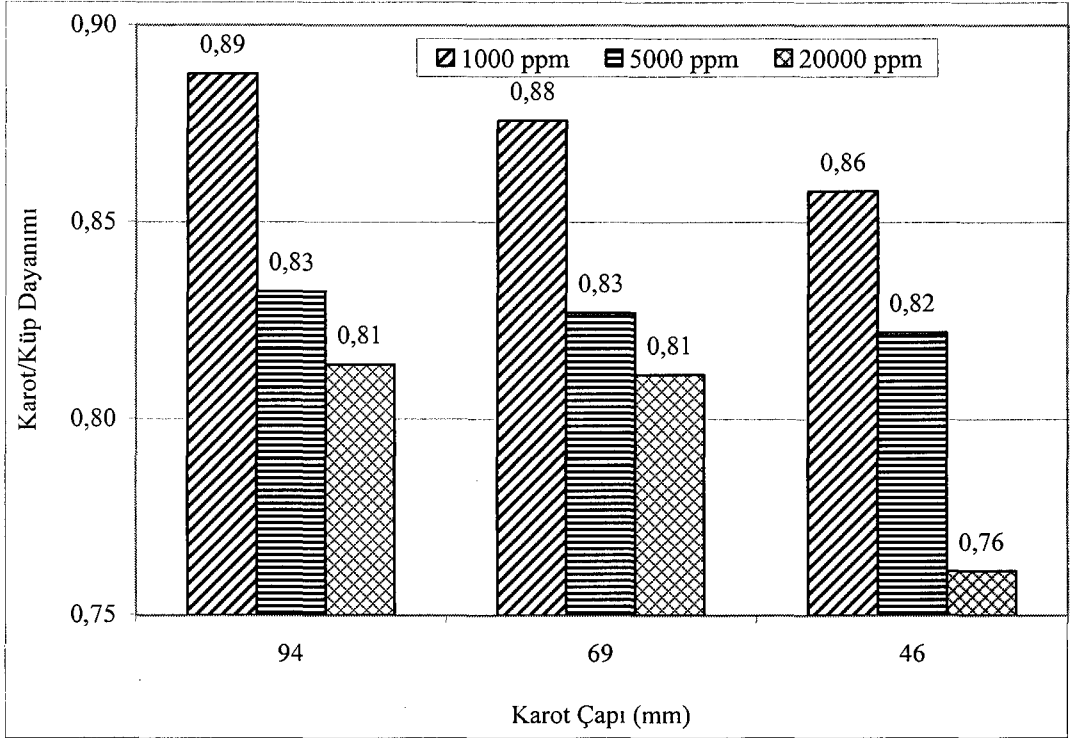


Şekil 7.88. Hava kürü ve önce su sonra hava kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımının su kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan karotların dayanımına oranı

Şekil 7.88'e göre, hava kürü ve önce su sonra hava kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımının, su kürü uygulanmış betonlardan çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımına oranı sırasıyla 0.89 ve 0.98 olarak bulunmuştur. Burada, en azından 3 günlük su kürünün önemli şekilde etkili olduğu anlaşılmaktadır. En yüksek dayanımlar, 28 gün sonunda test edilene kadar su kürü uygulanan kirişlerden çıkarılan karotlar üzerinde ölçülmüştür.

7.11. Sülfat Etkisi

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, bir grup beton numunesi üzerinde sülfat etkisi de incelenmiştir. Bu deneylerde, kiriş numuneleri döküldükten sonra üç farklı oranda sülfat içeren su dolu havuzlarda bekletilmiştir. 1000, 5000 ve 20000 ppm (bir milyonda kaç kısım) sülfat çözeltilerinde bekletilen kirişlerden farklı çaplarda karot numuneleri çıkarılmıştır. Karotlar 90 gün yaşında test edilmişlerdir. Sonuçlar standart 150 mm küp numunelerinden elde edilen 90 günlük basınç dayanımı testi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 7.89, üç farklı sülfat çözeltisinde bekletilen kirişlerden çıkarılan karotların dayanımının standart küp numunesi dayanımına oranını göstermektedir.

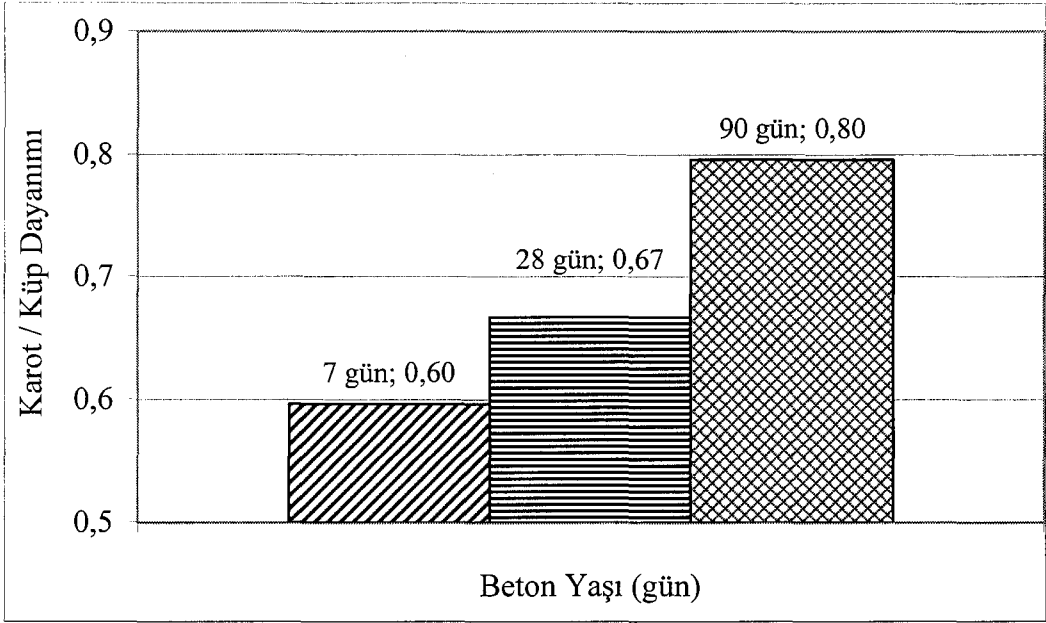


Şekil 7.89. Sülfat çözeltilerinde bekletilen kirişlerden çıkarılan karotların dayanımının 150 mm boyutunda standart küp numunesinin dayanımına oranı

Şekil 7.89'a göre, 1000 ppm, 5000 ppm ve 20000 ppm sülfatlı suda bekletilen kirişlerden çıkarılan 94 mm çapındaki karot dayanımının küp dayanımına oranı, sırasıyla 0.89, 0.83 ve 0.81 olarak bulunmuştur.

7.12. Donma-çözülme Etkisi

Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde, bir grup beton numunesi üzerinde donma-çözülme etkisi de incelenmiştir. Bu deneylerde, 150 mm standart küp numuneleri döküldükten sonra üç farklı yaşta 3 kere donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış ve daha sonra bu küplerden 69 mm çapında karot numunesi çıkarılarak basınç dayanımı belirlenmiştir. Basınç dayanımı testleri 7, 28 ve 90 gün yaşlarında uygulanmıştır. Sonuçlar standart 150 mm küp numunelerinden elde edilen basınç dayanımı değerleriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 7.90, üç farklı yaşta donma-çözülme etkisine maruz bırakılan küplerden çıkarılan karotların dayanımının standart küp numunesi dayanımına oranını göstermektedir.



Şekil 7.90. Farklı yaşlarda donma-çözülme etkisine maruz bırakılmış betonlardan çıkarılan karotların basınç dayanımının 150 mm standart küp numunesinin basınç dayanımına oranı

Şekil 7.90'a göre, erken yaşlarda betonun donma-çözülmeden daha çok etkilendiği anlaşılmaktadır. 7 gün yaşında karot dayanımlarının küp dayanımına oranı 0.6 iken, bu oran 90 günlük betonlarda 0.8'e yükselmiştir. Erken yaşlarda her ne kadar karot daha fazla örselenmekteyse de donma-çözülmenin de erken yaşlarda daha etkili olduğu gözlemlenmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çeşitli beton karışımlarından elde edilen numuneler üzerinde yapılan deneylerle gerçekleştirilen mevcut çalışmada elde edilen veriler işbu tezin deneysel bulgular ve tartışmalar kısmında değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerin ışığında, özetle aşağıdaki sonuçlar çıkarılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur;

1. Farklı maksimum agrega tane büyüklüğünde kırmataş ve dere agregası ile üretilen betonlarda 100x200 mm silindir numunelerin dayanımı 150x300 mm standart silindir numunelerin dayanımından bir miktar yüksek çıkmıştır. Bu iki farklı silindir numune arasındaki dayanım farkı maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe azalmış hatta 30 mm boyutta agregaların kullanıldığı karışımlarda 100x200 mm silindir numunelerin dayanımı biraz daha düşük çıkmıştır. Bunun nedeni duvar etkisidir.
2. Dere agregası ile üretilen betonların su/çimento oranları daha düşük olmasına rağmen kırmataş ile üretilen betonlara nazaran daha düşük dayanım değerine sahip oldukları bulunmuştur. Bunun nedeni dere agregasının yuvarlak şekilli ve yüzeyinin daha pürüzsüz olmasıdır.
3. 100x200 mm silindir numunelerin basınç dayanımlarının 150x300 mm standart silindir numunelerin basınç dayanımlarına oranları 0.98-1.04 arasında değişmektedir. Bu oran betondaki maksimum agrega tane boyutu büyüdükçe azalmakta hatta 30 mm boyutunda agregalarla üretilen betonlarda 1.0'ın altına düşmektedir.
4. 200 mm ve 150 mm küp numunelerin basınç dayanımları arasındaki oran 0.89-0.93 aralığında değişmektedir. Bu değer 28 günlük betonlar için 0.90-0.92 arasında değişmektedir.
5. 150x300 mm standart silindir numunesi ile 150 mm standart küp numunesi dayanımları arasındaki oran değişik yaşlarda kırılan beton numuneleri için 0.80-0.86 arasında değişmiştir. Bu değer 28 günlük betonlar için 0.82-0.86 arasındadır.

6. Karot numunelerinin boy/çap oranı azaldıkça basınç dayanımı artmaktadır. Bunun nedeni boy/çap oranı küçük olan numunelerin uç etkisine daha fazla maruz kalmalarıdır. Ayrıca, yine küçük boy/çap oranına sahip numuneler hacimsel olarak da daha küçük olduklarından kusur içerme olasılıkları da daha düşüktür. Bu da basınç dayanımını artırmaktadır.
7. Boy/çap oranı azaldıkça karot numunesi kolonsal kırılmaya uğramakta ve çizgiler halinde kırılmaktadır.
8. Narinlik (boy/çap) düzeltme faktörleri büyük çaplı karot numuneleri için ASTM ve BS Standartlarına göre biraz daha büyük bulunmuştur. Standartlar daha güvenli durumda çalışmaktadır.
9. Küçük çaplı karot numunelerinde elde edilen narinlik düzeltme faktörleri ASTM ve BS Standartlarında verilen değerlere daha yakındır. ASTM ve BS Standartlarında verilen değerlere en çok yaklaşan değerler karot çapı 46 mm olan numuneler üzerinde elde edilmiştir.
10. Karot çapı azaldıkça narinlik düzeltme faktörleri de bir miktar azalma göstermektedir. Bir başka deyişle, boy/çap oranının etkisi karot çapı küçüldükçe artmaktadır.
11. Agrega çeşidinin narinlik düzeltme faktörü üzerinde belirgin bir etkisi gözlenmemekle beraber, küçük çaplı karotlarda dere agregası ile üretilen betonlardan çıkarılan karotların narinlik düzeltme faktörlerinin bir miktar daha düşük oldukları gözlenmiştir.
12. Boy/çap oranı olarak 0.75 gibi 1.0'dan küçük bir oran da denenmiş ve özellikle büyük çaplı karot numunelerinde büyük farklar görülmemiştir. Ancak, nispeten küçük çaplı karot numuneleri için boy/çap oranı 1.0'den 0.75'e düştüğünde dayanımlar arasında daha büyük farklar gözlenmektedir. Boy/çap oranı 0.75 olan numuneler üzerinde daha fazla çalışma yapılarak bu oran karot dayanımı değerlendirmelerinde kullanılabilir.
13. Tüm beton karışımları için, karot çapı küçüldükçe karot numunesinin basınç dayanımı da düşmektedir. Bunun nedeni karot alma işlemi sırasında küçük çaplı numunelerin büyük çaplı numunelere göre daha fazla örselenmesidir. Özellikle maksimum agrega tane büyüklüğünün karot numunesi çapına oranla çok fazla yükseldiği durumlarda örselenme etkisi de artmaktadır.

Referanslarda 72 numara ile verilen yeni çıkan TS EN 12504-1 Standardında, maksimum agrega tane boyutu ve karot çapı ile ilgili olarak, karot dayanımlarının değerlendirilmesi hususunda bu konuya değinilmiştir. Böylece bu çalışma ile küçük çaplı karot numunelerinde daha önceki kaynakların bazılarında belirtilenden farklı olarak özellikle yüksek maksimum agrega tane boyutlarının kullanıldığı karışımlar için karot çapının karot basınç dayanımına etkisi olduğu bulunmuştur. Yeni çıkan ve çıkacak standartlar bu konuya önem göstermektedir.

14. Mevcut çalışmada, küçük çaplı karot numunelerinin betonun yerinde basınç dayanımı değerlendirmelerinde kullanılabileceği bulunmuştur. Bazı standartlar küçük çaplı karot numunelerin kullanılmasına izin vermemektedir. Ancak, iyi bir değerlendirme ile küçük çaplı karot numuneleri yerinde basınç dayanımı değerlendirmesinde kullanılabilir. Bu çalışmada en küçük karot çapı olarak 46 mm denenmiştir. 20 mm karot çapı da kullanılmış ancak basınç dayanımı testlerinde bunun pek uygun olmadığı anlaşılmıştır. Çünkü karot alımı esnasında bu numuneler çok zarar görmektedir. Ancak yine de bu küçük 20 mm çapındaki karot numuneleri, malzeme değerlendirmesi açısından olumlu sonuçlar verebilir.
15. Dere agregası ile üretilen karışımlardan kesilen küçük çaplı karot numunelerinde, iri agreganın çimento hamurundan daha kolay sıyrılabilirdiği gözlenmiştir.
16. Karot çapının basınç dayanımı üzerindeki etkisi beton yaşı ile önemli ölçüde değişmektedir. Numunenin yaşı arttıkça karot çapının dayanım üzerindeki etkisi de bir miktar azalmaktadır.
17. Maksimum agrega tane boyutunun nispeten küçük olduğu durumlarda, 144 mm çapındaki karotların dayanımı 150x300 mm standart silindirlerin dayanımına çok yakın bulunmuştur.
18. Beton karışımında kullanılan maksimum agrega tane boyutu karot dayanımlarının değerlendirilmesinde önemlidir.
19. Karot dayanımlarının standart silindir dayanımlarına oranı dere agregası kullanılan betonlarda kırmataş ile üretilen betonlara nazaran daha düşüktür.

20. Beton yaşı ilerlediğinde karot dayanımlarının standart numunelerin dayanımlarına oranında bir artış gözlenmektedir. Bu da karotların erken yaşlarda örselenmeden daha fazla etkilendiklerini göstermektedir.
21. Beton dayanım seviyesi yükseldiğinde, çap düzeltme faktörü 94 mm den daha küçük çaplı karotlar için azalmaktadır.
22. Beton dayanım seviyesi yükseldiğinde, karot dayanımlarının standart numunelerin dayanımlarına oranları da artmaktadır. Bu oran 144 mm çapındaki karotlar için 0.89-0.91 aralığında, 46 mm çapındaki karotlar içinse 0.82-0.88 aralığında değişmektedir.
23. Maksimum agrega tane boyutunun artması her iki çeşit agrega ile üretilen betonlarda ölçülen geri sıçrama sayılarını artırmaktadır. Çünkü büyük boyutlu bir agreganın çekicinin hemen altına gelme olasılığı artmaktadır.
24. Aynı geri sıçrama sayıları için dere agregası ile üretilen betonlar daha düşük dayanımlar göstermiştir.
25. Basınç dayanımı ile geri sıçrama değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır.
26. Sesüstü atım hızları beton yaşı ile birlikte artmaktadır. Bu artış erken yaşlarda bir miktar daha fazla olmaktadır. Çünkü çimentonun su ile reaksiyonu sonucunda beton içerisinde jeller oluşmakta ve betondaki gözenek oranı giderek azalmaktadır. Bu oluşum erken yaşlarda daha hızlıdır.
27. Maksimum agrega tane boyutu büyüdüğünde, sesüstü atım hızı değerlerinde de bir artış gözlenmektedir.
28. Kırmataş ile üretilen betonlarda, dere agregası ile üretilen betonlara nazaran bir miktar daha yüksek sesüstü atım hızı değerleri ölçülmüştür.
29. Basınç dayanımı ile sesüstü atım hızı arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Bu analizde çizilen doğruların eğimi maksimum agrega tane boyutu büyüdüğünde artmaktadır.
30. Sesüstü atım hızı ile basınç dayanımı arasında, özellikle dere agregasının kullanıldığı karışımlarda kuvvetli ilişkiler bulunmuştur. Bu da doğrudan iletim yöntemiyle yapılan sesüstü atım hızı testleri vasıtasıyla basınç dayanımı tahminlerinin belirlenen beton karışımları için yapılabileceği anlamına gelmektedir.

31. Sesüstü atım hızı yöntemi Türk Standartlarında yer almamaktadır. Ancak bu yöntem hem kolay uygulanabilen hem de iyi sonuçlar veren bir yöntemdir. Betondaki çatlakların ve diğer kusurların da anlaşılabilmesine olanak sağlayan bir yöntem olduğundan daha fazla deney yapılarak yardımcı test olarak Türk Standartlarında yer almalıdır.
32. Geri sıçrama sayıları ve sesüstü atım hızı değerlerinin birlikte kullanılarak basınç dayanımının hesaplandığı diğer araştırmacılar tarafından önerilen formüller, 15 mm ve daha büyük maksimum agrega tane boyutu ile üretilen karışımlarda daha iyi sonuçlar vermektedir.
33. Beton karışımlarında kullanılan agreganın çeşidi bilindiğinde, geri sıçrama sayısı ve sesüstü atım hızı değerlerinin birlikte kullanıldığı formüller daha iyi sonuçlar vermektedir.
34. Çekip-çıkarma kuvveti beton yaşı ile birlikte doğrusal olarak artmaktadır.
35. Basınç dayanımı ile çekip-çıkarma kuvveti arasında doğrusal bir ilişki vardır.
36. Çekip-çıkarma kuvveti ile beton dayanımının belirlenmesi yöntemi Türk Standartlarında yer almamaktadır. Ancak, beton basınç dayanımı ile çekip-çıkarma kuvveti arasında iyi bir korelasyon bulunmuştur. Çekip-çıkarma testi kolay uygulanan ve yapı elemanına hasar vermeyen bir yöntemdir. Ayrıca, bu test tamamıyla yüzeysel değildir. Bu yöntem ile farklı beton karışımları üzerinde daha fazla deney yapılarak bu yöntem Türk Standartlarına kazandırılmalıdır.
37. Beton olgunluk yönteminin sonuçları iyi kürlenmiş betonlar için iyi sonuçlar vermektedir. Ancak, beton olgunluk yöntemi ile bulunan basınç dayanımları birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Bu yüzden, farklı beton karışımları için çok fazla araştırmaya gereksinim duyulmaktadır. Özellikle kür koşullarının farklı olduğu durumlarda, beton olgunluk faktörü ile yapılan hesaplamalar yeterli sonuç vermemektedir. Mevcut çalışmanın haricinde, beton olgunluk metresi vasıtasıyla beton dayanımlarının tahmini ile ilgili çalışmalar devam etmelidir.
38. Vibratörle yapılan sıkıştırma kiriş numunelerinde 140 mm çökme değerine sahip betonlar için bile önemli ölçüde etkilidir.

39. Betonlara en azından 3 günlük bir su kürü uygulamak basınç dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Ancak, en iyi sonuçlar sürekli su kürü uygulanan betonlar üzerinde elde edilmiştir.
40. Sülfat etkisine maruz kalan kirişlerden çıkarılan karotların basınç dayanımlarının sülfat etkisi derecesinde azaldığı görülmüştür.
41. Donma-çözülme, döngü sayısı çok az olsa bile erken yaşlarda daha etkilidir.

Bu çalışmada tüm sonuçlar deneysel çalışmanın birinci ve ikinci bölümü için ayrı şekilde değerlendirilip, basınç dayanımı tahmininde kullanılan tahribatlı, yarı-tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı arasındaki ilişkiler Çizelge 8.1-2’de özetlenmiştir.

Çizelge 8.1. Deneysel çalışmanın birinci bölümünde basınç dayanımı tahmininde kullanılmak üzere elde edilen formüller

Karışım	Geri sıçrama sayısı	Sesüstü atım hızı	Geri sıçrama sayısı ve Sesüstü atım hızı	Beton olgunluk faktörü	Karot dayanımı
Beton K1	S=1.9865 RN - 21.892	S=19.256 UPV - 51.317	S = 3.009 RN – 14.080 UPV + 9.582	-	S = 0.8418 CS + 7.6865
Beton K2	S=2.1778 RN - 28.806	S=27.146 UPV - 86.461		-	S = 0.9080 CS + 6.4008
Beton K3	S=2.1142 RN - 28.738	S=36.743 UPV - 134.24		S = 3.7444 ln(M) - 9.2969	S = 0.8744 CS + 7.8235
Beton K4	S=2.1403 RN - 30.435	S=44.807 UPV - 174.46		-	S = 0.9188 CS + 7.6791
Beton D1	S=2.1496 RN - 28.785	S=25.646 UPV - 78.418	S = 2.985 RN – 13.211 UPV + 3.022	-	S = 1.0432 CS + 3.8521
Beton D2	S=2.2040 RN - 32.165	S=31.951 UPV - 109.36		-	S = 1.0079 CS + 5.5591
Beton D3	S=2.3133 RN - 36.442	S=46.405 UPV - 174.50		-	S = 1.0647 CS + 5.0648
Beton D4	S=2.4297 RN - 40.772	S=59.349 UPV - 238.02		-	S = 1.0942 CS + 4.7749

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)
RN : Geri sıçrama sayısı
UPV : Sesüstü atım hızı (km/s)
PF : Çekip-çıkarma kuvveti (kN)
M : Beton olgunluk faktörü (°C saat)
CS : 94 mm çapında ve boy/çap oranı 1 olan karot dayanımı (MPa)

Çizelge 8.2. Deneysel çalışmanın ikinci bölümünde basınç dayanımı tahmininde kullanılmak üzere elde edilen formüller

Deney Yöntemi	Dayanım Formülü
Geri sıçrama sayısı	$S = 2,2484 RN - 32,481$
Sesüstü atım hızı	$S = 34,499 UPV - 125,8$
Geri sıçrama + sesüstü atım hızı	$S = 2.093 RN - 2.448 UPV - 39.232$
Çekip-çıkarma	$S = 0,9868 PF + 6,3201$
Beton olgunluk faktörü	$S = 5,6899 \ln(M) - 13,462$
Karot dayanımı	$S = 1,0843 CS - 7,2103$

S : 150 mm küp cinsinden basınç dayanımı (MPa)

RN : Geri sıçrama sayısı

UPV : sesüstü atım hızı (km/s)

PF : Çekip-çıkarma kuvveti (kN)

M : Beton olgunluk faktörü (°C saat)

CS : 94 mm çapında ve boy/çap oranı 1 olan karot dayanımı (MPa)

Sonuç olarak, bu çalışmada, tahribatlı, yarı tahribatlı ve tahribatsız yöntemlerle, çeşitli karışım oranları ile üretilen betonların basınç dayanımı belirlenmiş ve bu farklı yöntemlerin nasıl değerlendirileceği belirlenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] NEVILLE, A.M., *Properties of Concrete*, Pitman Books Limited, London (1981).
- [2] MINDESS, S. ve YOUNG, J. F., *Concrete*, Prentice-Hall, inc, New Jersey (1981).
- [3] TROXELL, G.E., DAVIS, H.E. ve KELLY, J.W., *Composition and Properties of Concrete*, McGraw-Hill Book Company, New York (1968).
- [4] ERDOĞAN, T.Y., *Beton*, ODTÜ Yayınevi, Ankara (2003).
- [5] TAYLOR, W.H., *Concrete Technology and Practice*, McGraw-Hill Book Company, Sydney (1977).
- [6] ARIÖĞLU E. ve ARIÖĞLU N., Üst ve Alt Yapılarda Beton Karot Deneyleri ve Değerlendirilmesi, Evrim Yayınevi, İstanbul (1998).
- [7] ARIÖZ, Ö., YILDIZ, D., NALÇACI, M., KARAESMEN, E. ve ERKAY, C., *Betonarme-öngermeli beton taşıyıcı sistemlerde beton kalitesi yükseltilmesi olayının ekonomik boyutu*, Beton 2004 Kongresi, İstanbul, Türkiye, 131-140 (2004).
- [8] CHMIELEWSKI, T. ve KONOPKA, E., *Statistical evaluations of field concrete strength*, Magazine of Concrete Research, **51**, **1**, 45-52 (1999).
- [9] BARTLETT, F.M. ve Mac GREGOR, J.G., *Statistical analysis of the compressive strength of concrete in structures*, ACI Materials Journal, **93**, **2**, 158-168 (1996).
- [10] BUNGEY, J.H. ve SOUTSOS, M.N., *Reliability of partially-destructive tests to assess the strength of concrete on site*, Construction and Building Materials, **15**, 81-92 (2001).
- [11] HAQUE, M.N. ve AL-KHAIAT, H., *Carbonation of concrete structures in hot dry coastal regions*, Cement and Concrete Composites, **19**, 123-129 (1997).
- [12] ABDEL-HALIM, M.A.H., AL-OMARI, M.A. ve ISKENDER, M.M., *Rehabilitation of the spillway of Sama El-Serhan Dam in Jordan, using roller compacted concrete*, Engineering Structures, **21**, 497-506 (1999).

- [13] MIAO, B., AITCIN, P.C., COOK, W.D. ve MITCHELL, D., *Influence of concrete strength on in situ properties of large columns*, ACI Materials Journal, **90**, 3, 214-219 (1993).
- [14] FRANCO, L., NOLI, A., DeGIRALAMO, P. ve ERCOLANI, M., *Concrete strength and durability of prototype tetrapods and dolosse: results of field and laboratory tests*, Coastal Engineering, **40**, 207-219 (2000).
- [15] KENAI, S. ve BAHAR, R., *Evaluation and repair of Algiers new airport building*, Cement and Concrete Composites, **25**, in press (2003).
- [16] PRICE, W.F. ve HYNES, J.P., *In-situ strength testing of high strength concrete*, Magazine of Concrete Research, **48**, No.176, 189-197 (1996).
- [17] BEEK, V.A., BREUGEL, V.K. ve HILHORST, M.A., *In-situ monitoring system based on dielectric properties of hardening concrete*, Structural Faults and Repair, **2**, 407-414 (1997).
- [18] OHTSU, M. ve WATANABE, H., *Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission*, Construction and Building Materials, **15**, 217-224 (2001).
- [19] ZHU, W., GIBBS, J.C. ve BARTOS P.J.M., *Uniformity of in situ properties of self-compacting concrete in full-scale structural elements*, Cement and Concrete Composites, **23**, 57-64 (2001).
- [20] ELVERLY, R.H.ve IBRAHIM, L.A.M., *Ultrasonic assessment of concrete strength at early ages*, Magazine of Concrete Research, **28**, 97, 181-90 (1976).
- [21] LONG, A.E., HENDERSON, G.D.ve MONTGOMERY, F.R., *Why assess the properties of near-surface concrete?*, Construction and Building Materials, **15**, 65-79 (2001).
- [22] ETSE, G., *Finite element analysis of failure response behavior of anchor bolts in concrete*, Nuclear Engineering and Design, **179**, 245-52 (1998).
- [23] BUNGEY, J.H., ve MADANDOUST, R., *Factors influencing pull-off tests on concrete*, Magazine of Concrete Research, **44**, 158, 21-30 (1992).
- [24] BARKER, M.G., ve RAMIREZ, J.A., *Determination of concrete strengths with break-off tester*, ACI Materials Journal, **July-August**, 221-28 (1988).

- [25] SOUTSOS, M.N., BUNGEY, J.H., LONG, A.E. ve HENDERSON, G.D., *In-situ strength assessment of concrete*, The European Concrete Frame Building Project, Cardington, U.K. (2000).
- [26] NAFFA, S.O., GOUEYGOU, M., PIWAKOWSKI, B. ve BUYLE-BODIN, F., *Detection of chemical damage in concrete using ultrasound*, Ultrasonics, **40**, 247-251 (2002).
- [27] AKHRAS, N.M., *Detecting freezing and thawing damage in concrete using signal energy*, Cement and Concrete Research, **28**, No.9, 1275-1280 (1998).
- [28] KHAYAT, K.H., MANAI, K. ve TRUDEL, A., *In situ mechanical properties of wall elements cast using self-consolidating concrete*, ACI Materials Journal, **94**, No.6, 491-500 (1997).
- [29] MCCARTHY, M.J. ve GIANNAKOU, A., *In-situ performance of CPF concrete in a coastal environment*, Cement and Concrete Research, **32**, 451-457 (2002).
- [30] RAO, G.A. ve PRASAD, B.K.R., *Influence of the roughness of the aggregate surface on the interface bond strength*, Cement and Concrete Research, **32**, 253-57 (2002).
- [31] AKÇAOĞLU, T., TOKYAY, M. ve ÇELİK, T., *Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression*, Cement and Concrete Composites, **26**, 633-38 (2004).
- [32] ÖZTURAN, T. ve ÇEÇEN, C., *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths*, Cement and Concrete Research, **27**, 165-70 (1997).
- [33] TASONG, W.A., LYNSDALE, C.J. ve CRIPPS, J.C., *Aggregate-cement paste interface II: influence of aggregate physical properties*, Cement and Concrete Research, **28**, 1453-65 (1998).
- [34] MONTEIRO, P.J.M., MASO, J.C. ve OLLIVIER, J.P., *The aggregate-mortar interface*, Cement and Concrete Research, **15**, 953-58 (1985).
- [35] NEVILLE, A.M., *Aggregate bond and modulus of elasticity of concrete*, ACI Materials Journal, **94**, No.1, 71-74 (1997).

- [36] KARAESMEN, E., ARIÖZ, Ö., ARMAĞAN, C., YAMAN, Ö. ve YILDIZ, D., *A study of the material aspect of the prestressed concrete technology*, Concrete Technology for Developing Countries, Fourth International Conference, Eastern Mediterranean University, Turkish Republic of North Cyprus, 32-40 (1996).
- [37] AMPARANO, F.E., XI, Y. ve ROH, Y.S., *Experimental study on the effect of aggregate content on fracture behavior of concrete*, Engineering Fracture Mechanics, **67**, 65-84 (2000).
- [38] ERDOĞAN, T.Y., *Çimentolar*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara (1995).
- [39] ERDOĞAN, T.Y., *Agregalar*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara (1995).
- [40] BESHAR, H., ALMUSALLAM, A.A. ve MASLEHUDDIN, M., *Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete*, Construction and Building Materials, **17**, 97-103 (2003).
- [41] YAŞAR, E., ERDOĞAN, Y. ve KILIÇ, A., *Effect of limestone aggregate type and water-cement ratio on concrete strength*, Materials Letters, **58**, 772-77 (2004).
- [42] ERDOĞAN, T.Y., *Karışım ve Bakım Suları*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara (1995).
- [43] OZER, B., ve OZKUL, H., *The influence of initial water curing on the strength development of ordinary portland and pozzolanic cement concretes*, Cement and Concrete Research, **34**, 13-18 (2004).
- [44] PLANTE, M., CAMERON, G. ve HAMOU, A.T., *Influence of curing conditions on concrete specimens at construction site*, ACI Materials Journal, **97**, 2, 120-26 (2000).
- [45] SHANNAG, M.J. ve SHAIA, H.A., *Sulfate resistance of high performance concrete*, Cement and Concrete Composites, **25**, 363-369 (2003).
- [46] PARK, Y.S., SUH, J.K., LEE, J.H. ve SHIN, Y.S., *Strength deterioration of high strength concrete in sulfate environment*, Cement and Concrete Research, **29**, 1397-1402 (1999).

- [47] COHEN, M.D. ve MATHER, B., *Sulfate attack on concrete*, ACI Materials Journal, **88**, 1, 62-69 (1991).
- [48] KHATRI, R.P., SIRIVIVATNANON, V. ve YANG, J.L., *Role of permeability in sulphate attack*, Cement and Concrete Research, **27**, 1179-89 (1997).
- [49] SUN, W., ZHANG, Y.M., YAN, H.D. ve MU, R., *Damage and damage resistance of high strength concrete under the action of load and freeze-thaw cycles*, Cement and Concrete Research, **29**, 1519-1523 (1999).
- [50] MU, R., MIAO, C., LUO, X. ve SUN, W., *Combined deterioration of concrete subjected to loading, freeze-thaw cycles and chloride salt attack*, Magazine of Concrete Research, **54**, 175-80 (2002).
- [51] MARZOUK, H. ve JIANG, D., *Effects of freezing and thawing on the tension properties of high-strength concrete*, ACI Materials Journal, **91**, 6, 577-86 (1994).
- [51] DAY, R.L. ve HAQUE, M.N., *Correlation between strength of small and standard concrete cylinders*, ACI Materials Journal, **90**, No.5, 452-62 (1993).
- [52] TOKYAY, M. ve ÖZDEMİR, M., *Specimen shape and size effect on the compressive strength of higher strength concrete*, Cement and Concrete Research, **27**, 8, 1281-88 (1997).
- [53] AITCIN, P.C., MIAO, B., COOK, W.D. ve MITCHELL, D., *Effects of size and curing on cylinder compressive strength of normal and high-strength concretes*, ACI Materials Journal, **91**, 4, 349-54 (1994).
- [54] TUNCAN, M., ARIÖZ, Ö., NERGİZ, V., APAK, D. ve RAMYAR, K., *Effect of sample moisture content on destructive and non-destructive testing of concrete strength*, Proceedings of Austceram 8 The 3rd International Conference on Advanced Materials Processing, 78-79 (2004).
- [55] TUNCAN, A., ARIÖZ, Ö., TUNCAN, M., APAK, D. ve RAMYAR, K., *Effect of loading rate on apparent splitting tensile strength of concrete*, Proceedings of Austceram 8 The 3rd International Conference on Advanced Materials Processing, 76-77 (2004).

- [56] ARIÖZ, Ö., *Review of methods and an experimental investigation on determination of concrete strength*, Proceedings of Austceram 8 The 3rd International Conference on Advanced Materials Processing, 221-22 (2004).
- [57] TS 3068, *Laboratuarda beton deney numunelerinin hazırlanması ve bakımı*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1978).
- [58] TS 3114, *Beton basınç mukavemet tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1990).
- [59] TS EN 12390-1, *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 1: deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2002).
- [60] TS EN 12390-2, *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 2: dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve kürlenmesi*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2002).
- [61] TS EN 12390-3, *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2003).
- [62] TS EN 12390-4, *Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 4: basınç dayanımı-deney makinelerinin özellikleri*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2002).
- [63] ASTM C 31, *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the field*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [64] ASTM C 39, *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [65] ASTM C 192-90a, *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [66] BS 1881: Part 108: 1983, *Method for making test cubes from fresh concrete*, British Standards (1983).
- [67] BS 1881: Part 110: 1983, *Method for making test cylinders from fresh concrete*, British Standards (1983).
- [68] BS 1881: Part 111: 1983, *Method of normal curing of test specimens (20 °C method)*, British Standards (1983).

- [69] BS 1881: Part 116: 1983, *Method for determination of compressive strength of concrete cubes*, British Standards (1983).
- [70] ENV 206: 1992, *Concrete: Performance, production, placing, and compliance criteria*, European Standards (1992).
- [71] TS 10465, *Beton deney metodları-yapı ve yapı bileşenlerinde sertleşmiş betondan numune alınması ve basınç mukavemetinin tayini (tahribatlı metod)*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1992).
- [72] TS EN 12504-1, *Beton-yapıda beton deneyleri-bölüm 1: karot numuneler-karot alma, muayene ve basınç dayanımının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2002).
- [73] ASTM C 42-90, *Test for obtaining and testing drilled cores and sawed beams of concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [74] BS 1881: Part 120: 1983, *Method for determination of the compressive strength of concrete cores*, British Standards (1983).
- [75] BARTLETT F.M. ve MacGREGOR, J.G., *Effect of core length-to-diameter ratio on concrete core strengths*, ACI Materials Journal, **91**, 4, 339-348 (1994).
- [76] BARTLETT, F.M. ve MacGREGOR, J.G., *Effect of core diameter on concrete core strengths*, ACI Materials Journal, **91**, 5, 460-470 (1994).
- [77] ACI 318-89, ACI Committee 318, *Building code requirements for reinforced concrete and commentary (ACI 318-89/ACI 318 R-89)*, American Concrete Institute, Detroit, 353 sayfa (1989).
- [78] BARTLETT, F.M. ve MacGREGOR, J.G., *Effect of moisture condition on concrete core strengths*, ACI Materials Journal, **91**, 3, 227-236 (1993).
- [79] BARTLETT, F.M., *Precision of in-place concrete strengths predicted using core strength correction factors obtained by weighed regression analysis*, Structural Safety, **19**, No.4, 397-410 (1979).
- [80] BUNGEY, J.H., *Determining concrete strength by using small diameter cores*, Magazine of Concrete Research, **31**, No.107, 91-98 (1979).
- [81] QASRAWI, H.Y., *Concrete strength by combined non destructive methods simply and reliably predicted*, Cement and Concrete Research, **30**, 739-746 (2000).

- [82] BUYUKOZTURK, O., *Imaging of concrete structures*, NDT&E International, **31**, 4, 233-243 (1998).
- [83] McCANN, D.M. ve FORDE, M.C., *Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures*, NDT&E International, **34**, 71-84 (2001).
- [84] TS 3260, *Beton yüzey sertliği yolu ile yaklaşık beton dayanımının tayini kuralı*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1978).
- [85] ASTM C 805-85, *Standard test method for rebound number of hardened concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [86] BS 1881: Part 202: 1986, *Recommendations for surface hardness testing by rebound hammer*, British Standards (1986).
- [87] OHDAIRA, E. ve MASUZAWA, N., *Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete – the possibility of NDE*, Ultrasonics, **38**, 546-52 (2000).
- [88] QASRAWI, H.Y. ve MARIE, I.A., *The use of USPV to anticipate failure in concrete under compression*, Cement and Concrete Research, **33**, 2017-21 (2003).
- [89] YASAR, E. ve ERDOGAN, Y., *Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **41**, 871-75 (2004).
- [90] YASAR, E. ve ERDOGAN, Y., *Estimation of rock physicommechanical properties using hardness methods*, Engineering Geology, **71**, 281-88 (2004).
- [91] ASTM C 597-83, *Standard Test method for Pulse Velocity through Concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [92] BS 1881: Part 203: 1986, *Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete*, British Standards (1986).
- [93] YAMAN, I.O., INCI, G., YESILLER, N. ve AKTAN, H., *Ultrasonik puls velocity in concrete using direct and indirect transmission*, ACI Materials Journal, **98**, 6, 450-457 (2001).

- [94] TOMSETT, H.N., *The practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality*, Magazine of Concrete Research, **32**, **110**, 7-16 (1980).
- [95] ARIÖĞLU, E., ARIÖĞLU, N. ve GIRGIN, C., *A discussion of the paper "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted" by H.Y. Qasrawi*, Cement and Concrete Research, **31**, 1239-40 (2001).
- [96] ARIÖZ, O., TORE, I. ve AY, N., *Utilisation of waste ceramic tiles in concrete production*, Second FAE International Symposium, European University of Lefke, Gemikonağı, Turkish Republic of North Cyprus, 159-161 (2002).
- [97] ARIÖZ, Ö., TÖRE, İ. ve AY, N., *Utilisation of waste bricks as cement replacement material in concrete production*, Key Engineering Materials, Vols. **264-268**, 2421-2424 (2004).
- [98] LASKAR, M.A.I., KUMAR, R. ve BHATTACHARJEE, B., *Some aspects of evaluation of concrete through mercury intrusion porosimetry*, Cement and Concrete Research, **27**, 93-105 (1997).
- [99] CHAN, Y.N., LUO, X. ve SUN, W., *Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C*, Cement and Concrete Research, **30**, 247-251 (2000).
- [100] KUMAR, R. ve BHATTACHARJEE, B., *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*, Cement and Concrete Research, **33**, 155-164 (2003).
- [101] ASTM C 900-87 (Reapproved 1993), *Standard test method for pullout strength of hardened concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [102] BS 1881: Part 207: 1992, *Recommendations for the assessment of concrete strength by near-to-surface tests*, British Standards (1986).
- [103] ASTM C 803-90, *Standard test method for penetration resistance of hardened concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [104] ASTM C 1150-90, *Standard test method for the break-off number of concrete*, Annual Book of ASTM Standards (1994).

- [105] ASTM C 1074-87, *Standard practice for estimating concrete strength by maturity method*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [106] OLUOKUN, F.A., BURDETTE, E.G. ve DEATHERAGE, J.H., *Early age concrete strength prediction by maturity-another look*, ACI Materials Journal, **87**, No.6, 565-572 (1990).
- [107] KJELSEN, K.O. ve DETWILER, R.J., *Later age strength prediction by a modified maturity model*, ACI Materials Journal, **90**, No.3, 220-227 (1993).
- [108] ASTM C 873-94, *Standard test method for compressive strength of concrete cylinders cast in place in cylindrical molds*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [109] TS 3223, *Beton basınç deney numunelerinin hazırlanması, hızlandırılmış kürü ve basınç dayanımı deneyi*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1979).
- [110] ASTM C 684, *Standard test method for making, accelerated curing and testing concrete compressive test specimens*, Annual Book of ASTM Standards (1994).
- [111] BS 1881: Part 112: 1983, *Methods of accelerated curing of test cubes*, British Standards (1983).
- [112] TS 3530, *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımı tayini-eleme metodu*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1999).
- [113] TS EN 1097-6, *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2002).
- [114] TS 3523, *Beton agregalarının yüzey nemi oranı tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1980).
- [115] TS 802, *Beton karışım hesap esasları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1985).
- [116] TS 2871, *Taze beton kıvam deneyi (çökme hunisi metodu ile)*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1977).

- [117] TS 2901, *Taze betonda hava miktarının basınç metodu ile tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1977).
- [118] TS 500, *Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (2000).
- [119] TS 500, *Betonarme yapıların hesap ve yapım kuralları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara (1984).
- [120] MALHOTRA, V.M., *Testing hardened concrete: nondestructive methods*, ACI Monograph series, No.9, Published jointly by the Iowa State University and ACI (1976).