

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

707284

YÜKSEK FIRIN CÜRUFUNUN BETONUN
MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

101284

İnş. Müh. Özgür ÇAKIR

F.B.E. İnşaat Anabilim Dalı Mekanik Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Fevziye AKÖZ



İSTANBUL, 2000

U. Akşenir

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1 GİRİŞ.....	1
2 KONUS İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER.....	3
2.1 Çimento.....	3
2.2 Agrega.....	4
2.3 Beton Karma Suyu.....	4
2.4 Katkı Maddeleri.....	4
2.5 Beton Karışımı.....	5
2.6 Betonun Yerleştirilmesi ve Bakımı	5
2.7 Betonun Mekanik Özellikleri	7
2.7.1 Betonun basınç dayanımı	7
2.7.2 Betonun gerilme-deformasyon özellikleri.....	10
2.7.3 Betonun elastisite modülü:	13
2.7.4 Betonun çekme kuvvetleri altında deformasyonu ve çekme dayanımı	16
2.7.5 Betonun kayma kuvvetleri altında davranışı.....	20
2.7.6 Betonun donatı ile aderansı	20
2.8 Puzolanlar	21
2.8.1 Yüksek fırın cürufu.....	22
2.8.2 Cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılma koşulları.....	23
2.8.3 Cürufun puzolanik aktivitesinin araştırılması	25
2.8.4 Cüruf çimentolarının hidrasyonu	27
2.8.5 Cüruf çimentosunun türleri	28
2.8.5.1 Kireç esaslı cüruf çimentoları.....	28
2.8.5.2 Yüksek fırın cüruf çimentoları	28
2.8.5.3 Sülfatlı cüruf çimentosu	28
2.9 Yüksek Fırın Cürufunun Betona Etkileri	29
3 DENEYSEL ÇALIŞMA.....	32
3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler	32

3.2	Numune Üretimi ve Kürü.....	35
3.3	Kontrol Deneyleri	37
4	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	
	ve İRDELENMESİ.....	41
4.1	Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi.....	41
4.2	Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi	43
4.2.1	Basınç dayanımı	43
4.2.2	Elastisite modülü	45
4.2.3	Yarma dayanımı	50
4.2.4	Çekip çıkarma dayanımı	52
5	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	54
	KAYNAKLAR.....	56
	EKLER	
Ek 1	Basınç dayanımı - zaman ilişkisi.....	58
Ek 2	Yarma dayanımı - zaman ilişkisi.....	58
Ek 3	Aderans dayanımı - zaman ilişkisi.....	59
	ÖZGEÇMİŞ.....	60

SİMGE LİSTESİ

α	Betonun çekme dayanımı ile ilgili katsayı
α_f	Betonun çekme dayanımı ile ilgili katsayı
β	Betonun birim ağırlığı
σ	Gerilme
Φ	Donatı çapı
ε	Şekil değiştirme
ε_{co}	Maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme
ε_f	Gerilme $f_{cc}/3$ değerinde iken betonun şekil değiştirmesi
ε_5	Gerilme 5 kgf/cm^2 değerinde iken betonun şekil değiştirmesi
ε_u	Çeliğin sünekliği
ν	Poisson oranı
a	Kesit boyu
d	Silindir çapı
E	Elastisite modülü
E_{cj}	j günlük betonun elastiklik modülü
E_d	Dinamik elastisite modülü
E_s	Statik elastisite modülü
f_{cc}	Basınç dayanımı
f_{cj}	j günlük betonun basınç dayanımı
f_{cs}	Yarma dayanımı
f_{cf}	Eğilme dayanımı
f_{ct}	Çekme dayanımı
f_{ctc}	Basınç deneyinden belirlenen çekme dayanımı
f_{cts}	Yarma deneyinden belirlenen çekme dayanımı
f_{ctf}	Eğilme deneyinden belirlenen çekme dayanımı
f_{csb}	Aderans dayanımı
G	Kayma modülü
g	Yerçekimi ivmesi
k	Dinamik elastisite modülü ile ilgili katsayı
k_i	Katyonlar ile ilgili katsayı
l	Silindir boyu
L	Numune boyu
M_k	Eğilme momenti
P_{cs}	Yarılma yükü
P_{csb}	Maksimum aderans kuvveti
V	Ultrases hızı
w	Su/çimento oranı
W	Prizmanın numunenin mukavemet momenti

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
CEB	Comite Europeen du Beton
LVDT	Lineer Variable Differential Transformer Transducer
RILEM	Uluslararası Malzeme ve Yapı Laboratuarları Birliđi
TS	Türk Standartları



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1	Kür koşullarının basınç dayanımına etkisi 6
Şekil 2.2	Küp deneyinde numunenin kırılma aşamaları 9
Şekil 2.3	Sabit deformasyon hızı altında gerilme-şekil değiştirme ilişkisi 10
Şekil 2.4	Betonda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi 11
Şekil 2.5	Çeşitli betonlar için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi 12
Şekil 2.6	Gerilme-şekil değiştirme eğrisine çizilen teğetler 13
Şekil 2.7	Betonun basınç dayanımı-elastisite modülü ilişkisi 16
Şekil 2.8	TS 500 ve CEB'e göre öngörülen çekme dayanımları 19
Şekil 3.1	Agregaların granülometrik eğrileri 33
Şekil 3.2	Ultras ses deney düzeneği 37
Şekil 3.3	Yük hücresi ve transduser kullanılarak yapılan basınç deney düzeneği 38
Şekil 3.4	Yarma deneyi düzeneği 39
Şekil 3.5	Çekip çıkarma deney düzeneği 40
Şekil 4.1	Çökme miktarının zamanla değişimi 41
Şekil 4.2	Bağlı basınç dayanımı-zaman ilişkisi 43
Şekil 4.3	Gerilme-şekil değiştirmenin şematik gösterimi 45
Şekil 4.4	Modül oranı-zaman ilişkisi 48
Şekil 4.5	Modül oranı-basınç dayanımı ilişkisi 49
Şekil 4.6	Statik elastisite modülleri ve basınç dayanımı ilişkisi 49
Şekil 4.7	Bağlı yarma dayanımı-zaman ilişkisi 51
Şekil 4.8	Yarma dayanımı- basınç dayanımı ilişkisi 51
Şekil 4.9	Bağlı çekme dayanımı- zaman ilişkisi 53
Şekil 4.10	Aderans dayanımı- basınç dayanımı ilişkisi 53

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1	1 dm ³ harç üretimi için gerekli malzeme miktarı26
Çizelge 3.1	Agreganın fiziksel özellikleri33
Çizelge 3.2	Çimento ve cürufun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri34
Çizelge 3.3	Çimento ve cürufun mekanik özellikleri.....34
Çizelge 3.4	Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesinin teknik ve kimyasal özellikleri35
Çizelge 3.5	1m ³ betondaki gerçek malzeme miktarları.....36
Çizelge 4.1	Taze beton özellikleri.....42
Çizelge 4.2	Ortalama basınç dayanımları.....44
Çizelge 4.3	σ - ϵ Deney sonuçlarından belirlenen statik elastisite modülleri46
Çizelge 4.4	TS 500'göre basınç dayanımlarından hesaplanan statik elastisite modülleri....47
Çizelge 4.5	Dinamik elastisite modülleri47
Çizelge 4.6	Ortalama yarma dayanımları50
Çizelge 4.7	Çekip çıkarma deneyi sonuçları52

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın meydana gelmesinde, değerli zamanını ayırarak çalışmanın yürütücülüğünü üstlenen, her zaman olduğu gibi çalışma süresince de kıymetli bilgi ve bilimsel tecrübelerden yararlanma imkanı bulduğum kıymetli Hocam Sayın Doç. Dr. Fevziye AKÖZ'e,

Konu ile ilgili bilgi ve deneyimlerinden yaralandığım Sayın Prof. M.Ali SARAYLI ve Yard. Doç. Dr. Hasan BİRİCİK'e,

Deney aşamalarında yardımlarını esirgemeyen YTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı çalışanlarına,

Desteğini her zaman hissettiğim aileme, sonsuz teşekkür ederim.

Özgür ÇAKIR

Aralık, 2000

ÖZET

Beton, yapı mühendisliğinde 20. yüzyılın en önemli yapı malzemesidir. Betonun bağlayıcı fazını oluşturan çimento, betonun bileşenleri içinde özellikleri ve ekonomik değeri bakımından özel öneme sahiptir. Çimentonun yerini alan veya özelliklerine katkı sağlayan doğal veya endüstri atığı puzolan maddeler 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren beton üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü, yeryüzündeki doğal kaynakların verimli ve geri dönüşümlü kullanılması, gelişmiş ekonomilerin önemli sorunlarından biridir. Bu sorunun çözümü için doğal çevrenin kirlenmesine ve tahribine neden olan endüstriyel atıkların depolanması ve geri kazanımı ile ilgili pek çok çalışma yapılmaktadır. Demir-çelik endüstrisinin atığı olan yüksek fırın cürufunun (YFC) depolanması, miktarının çok fazla olması nedeni ile özel önem taşımaktadır. Bu atığın yapı sektöründe kullanılması, depolama sorununa kalıcı çözüm olmakta, çimento hammaddesinin ve/veya çimentonun yerini aldığı için üretimde ekonomi sağlamaktadır.

Yapılan deneysel çalışmada, İskenderun Demir-çelik fabrikasının atığı olan YFC'nun betonun mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Çimento ağırlığının %30'u ve %60'ı oranlarında YFC, betona üretim aşamasında çimento ile yer değiştirmeli (3R, 6R) ve ilaveli (3A, 6A) olarak katılmış, taze betonun işlenebilmesi ve sertleşmiş betonun 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerdeki mekanik özellikleri araştırılmış, bu özellikler YFC katılmamış şahit grup ile karşılaştırılmıştır.

Toplam 225 adet 10/20 silindir numuneden 75 tanesinde tek eksenli basınç deneyi yapılmış, bu deneyde basınç dayanımından başka ölçülen ve kaydedilen verilerden, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, bu ilişkiden de statik elastisite modülü belirlenmiştir. Diğer numunelerden 75 tanesinde yarma deneyi, 75 tanesinde de çekip çıkarma deneyi yapılmış, yarma dayanımı ve aderans dayanımı belirlenmiştir. Basınç ve yarma deneyi numunelerinde yapılan ultrases ölçümünden yararlanılarak dinamik elastisite modülü de belirlenmiştir.

Betonun basınç dayanımı, elastisite modülü, yarma dayanımı ve aderans dayanımı bütün gruplarda zamanla artmıştır. Elastisite modülü, yarma dayanımı ve aderans dayanımı gibi mekanik özellikler, basınç dayanımı ile paralellik göstermiştir.

%60 YFC ilaveli grubun işlenebilmesi ve mekanik özelliklerinin şahitten ve diğer gruplardan daha üstün olduğu, ince malzemeden yapılan azaltma ve dayanımdan sağlanan artış nedeni ile betonda kalite ve ekonomi sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Beton, yüksek fırın cürufu, basınç dayanımı , statik elastisite modülü, dinamik elastisite modülü.

ABSTRACT

In structural engineering, concrete is the most important building material in 20th century. Cement which takes place in concrete as a binder material, it has priority in concrete because of its components and economical value. Natural or industrial waste pozzolans which are replaced or add some benefits to cement have been using in casting concrete since the second half of 19th century. Because the use of natural sources efficiently and recycling is one of the most important issue of industrialized economies. In order to solve this problem, a lot of research works have been carrying out regarding the getting dirty of natural environment and destruction which are caused by industrial waste storage and recycling.

The storage of iron and steel by product ground granulated blast furnace slag (GGBFS), takes priority because of the high amount of waste. By using this waste in construction sector, it not only solves the storage problems but has advantages in economy by using either in or replaced with cement.

In this experimental research work, the mechanical properties of Iskenderun Iron and Steel Works's GGBFS on concrete were carried out. 30% and 60% of GGBFS were both replaced (3R, 6R) and added (3A, 6A) to cement during casting. Fresh concrete's workability and mechanical properties of hardened concrete were carried out at 7th, 28th, 90th, 180th and 300th days. The results were compared with slag free samples.

75 of 225 cylinder samples having dimension of 100/200 were applied, mono axial compressive strength test, strength-strain relation and static modulus of elasticity were determined by data measured and saved

In groups of 75 samples, splitting test, pull-out test were carried out, splitting strength and pull-out strength were determined. By using the ultrasonic pulse velocity test that was carried out on compressive and splitting test samples, dynamic modulus of elasticity was also determined.

Compressive strength, modulus of elasticity, splitting strength and pull-out strength increased in all groups. The mechanical properties such as modulus of elasticity, splitting strength and pull-out strength shows similarity with compressive strength.

It was determined that % 60 GGBFS added series's workability and mechanical properties are better than both slag free and other series as well. By decreasing the fine material and increase in compressive strength, quality and also economy are gained.

Keywords: Concrete, blast furnace slag, compressive strength, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity.

1 GİRİŞ

Demir çelik gibi bazı metallerin üretiminde elde edilmek istenen esas ürünün yanı sıra cüruf, ham katran, amonyum sülfat, yakıt karışımı, elektrot zifti, orta sıcaklık zifti, ham benzol, saf benzol, saf toluol, saf ksilol, solvent, blöf, oksijen, azot, karbondioksit gibi yan ürünler ve gibi endüstriyel atıklar ortaya çıkmaktadır (Katalog, 1998). Bunları depolamak veya atmak çoğu zaman büyük güçlükler yaratmakta, bu atıklar insan sağlığı ve çevre için yeni sorunların kaynağı olabilmektedir. Yan ürün veya endüstriyel atık olan ve büyük miktarlara ulaşan bu malzemeler, çeşitli yöntemler kullanılarak atıl durumdan faydalı hale dönüştürülebilir. Bu ürünlerin malzeme özellikleri incelendiğinde bazılarının yapı endüstrisinde kullanılabileceği görülmektedir. Örneğin cüruf, uçucu kül, silis dumanı gibi atık malzemelerin yapı sektöründe kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu ürünlerin inşaat sektöründe kullanılması ile çevre sorunları azalmakta, yerini aldığı doğal malzeme kaynaklarının tüketimi azalmakta, enerji tasarrufu ve ekonomi sağlanmaktadır.

Genelde metal filizlerinin fırınlarda artılma işleminin bir yan ürünü olarak ortaya çıkan cüruflardan en yaygın ve en bol bulunanı yüksek fırın cürufudur. Fırından ergimiş halde çıktıktan sonra havada yavaş yavaş soğutulduğunda atıl olan cüruf, su ile yeterli hızla soğutulduğunda gizli hidrolik bağlayıcı özelliği ortaya çıkmakta, çimento klinkerinin veya çimentonun bir bölümünün yerine kullanılabilmektedir.

Cürufun içerisinde bulunan silis ve alümin, su ile birlikte kireçle reaksiyona girer, kalsiyum silikat hidrate oluşturur ve bağlayıcılık özelliği kazanır. Betona üretim aşamasında cüruf ilave edilmesi, çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kirecin silikat hidrateye dönüşmesini sağladığından betonda çatlak oluşumunu önlemekte dolayısı ile dayanıklılığı arttırmaktadır. Düşük hidratasyon ısı, gerek kütle betonları gerekse sıcak iklimlerde betonun dökümlerinde oluşması muhtemel termik rötreyi en aza indirerek beton dayanıklılığını arttırmaktadır.

Yüksek fırın cürufu, kimyasal etkilere karşı dayanıklı olması ve betonun hidratasyon ısını düşürmesi nedeni ile beton üretiminde kullanılmaktadır. Betona katılan cüruf oranı, örneğin Japonya'da çimento ağırlığının %70'lerine kadar arttırılmış hatta bazı deneysel çalışmalarda bu oran, %95'lere kadar çıkarılmıştır (Nakamoto ve Togawa, 1995).

Bu çalışmanın amacı, belirli oranlarda yüksek fırın cürufunun beton üretiminde kullanılacak çimento ile ilaveli ve yerdeğıştirmeli olarak kullanılması durumunda betonun mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılmasıdır. Bu durum, taze ve sertleşmiş beton özellikleri bakımından etkisi fiziksel ve mekanik deneylerle araştırılmıştır.

Bunun için 375 kg/m^3 dozlu beton üretiminde agrega cinsi ve granülometrisi, çimento cinsi ve bağlayıcı miktarı, su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuş, çimentoya ağırlığının %30'u ve %60' ı oranlarındaki cüruf, betona, ilaveli (3A, 6A) ve yerdeğıştirmeli (3R, 6R) olarak katılmıştır. Cürufun filler malzeme olarak kabul edildiği ilaveli serilerde, ince agregada 3A serisinde %10, 6A serisinde %20 azaltma yapılmıştır. Her üretimde 0., 15., 30., 45. ve 60. dakikalarda çökme deneyi yapılarak taze betonun işlenebilme özelliği araştırılmış, 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde basınç dayanımı, statik ve dinamik elastisite modülleri, yarma dayanımı, çekip çıkarma dayanımı gibi mekanik özelliklerin belirlendiği deneyler yapılmıştır.

Taze betonda yapılan çökme deneyinde, 6A grubunun üretimden 1 saat sonra da pompalanabilir nitelikte olduğu, bu grubun basınç dayanımı, elastiklik modülü, yarma ve aderans dayanımlarının şahit ve diğer gruplardan yüksek olduğu, ince malzemede yapılan azaltma nedeni ile ekonomi sağladığı tespit edilmiştir.

2 KONU İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Beton, inşaat mühendisliği alanında yüzyılımızın en önemli yapı malzemesidir. Betonun bileşenleri içinde çimento gerek ekonomik, gerekse teknolojik özellikleri açısından farklı bir yere sahiptir. Çimento, agrega ve su karıştırıldığında ilk zamanlar kolayca şekil verilebilen, plastik özelliğe sahip bir malzemedir. Betonu diğer yapı malzemelerine üstün kılan en önemli özelliklerden biri, istenilen biçimin verilebilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Bu durumdaki betona taze beton denir, birkaç saat içinde beton katı hale geçer ve günlerce süren bir süreç sonunda sertliği artar, mukavemet kazanır. Yeterince mukavemet kazanmış betona sertleşmiş beton denir. Betondan, işlenebilir olması, mukavemetinin yüksek olması ve dış etkilere karşı dayanıklı olması gibi nitelikler beklenir. Basınç dayanımı, betonun kalitesi hakkında genel bir fikir verir, ancak bazı durumlarda geçirimsizlik ve dayanıklılık daha önemli özellik olabilmektedir (Akman,1990; Ersoy, 1987; Neville,1992).

2.1 Çimento

Betonun sürekli fazını oluşturan çimento, mineral kökenli, hidrolik bağlayıcıdır. Mineral kökenli bağlayıcılar genel olarak toz haldedir. Suyu karıştırılan toz bağlayıcılar önce viskoz sıvı veya hamur haldedir, daha sonra katılaşıp ve zaman içinde sertleşerek dayanım kazanırlar. Bağlayıcı maddelerin sıvı halden katı hale geçmesi olayına “priz” denir, bu hal değişimi fiziko-kimyasal bir olaydır. Priz olayı, bağlayıcı ile suyun karşılaştığı anda başlar, ancak belirgin değildir. Pratik yönden katılaşmanın belirgin bir düzeye varması durumuna “priz başlangıcı” denir. Priz olayını sadece havada yapabilen bağlayıcılara “hava bağlayıcıları”, hem havada, hem de su içinde katılaşabilen bağlayıcılara ise “hidrolik bağlayıcılar” denir (Akman, 1990).

Çimento üretiminde, belirli oranlarda kalker, kil karışımının içine ergimeyi kolaylaştırmak için demir filizi içeren toprak katılır. Karışım, döner fırında 1400 °C'ye kadar ısıtılır. Isıtılan maddenin ani soğutulması sonucu meydana gelen ceviz büyüklüğündeki granüle malzemeye klinker denir. Klinkerin dört ana bileşeni olan karma oksitler, bikalsiyum silikat ($C_2S=2Ca.SiO_2$), trikalsiyum silikat ($C_3S=3Ca.SiO_2$), trikalsiyum alüminat ($C_3A=3CaO.Al_2O_3$) ve tetra kalsiyum alümino ferrit ($C_4AF=4Ca.Al_2O_3.Fe_2O_3$) dir. Klinkerin çimentoya dönüşmesi yani bağlayıcı özellik kazanması için, alçı taşı katılıp çok ince

öğütülmesi gerekir. Alçı taşının görevi çimentonun priz süresini ayarlamaktır. Karma oksitler suyla karıştırıldıklarında derhal hidrate olmaya ve kristal yapıya dönmeye hazırdırlar, hidrate ürünler ve hidratasyon hızları her karma oksitte farklıdır. Çimentoların hidratlaşması ekzotermik bir olaydır (Akman, 1990).

2.2 Agregas

Agrega, mineral kökenli, taneli malzemedir ve betonun yaklaşık %75'i agregadır. Agregas çimento ile genellikle kimyasal tepkimeye girmez. Çimento hamuru ile agregas arasındaki bağlantı fiziksel ve mekanik karekterlidir, bu bağlantıya "aderans" denir.

Her taneli, mineral malzeme beton agregası değildir, agregas yığınının tane büyüklüklerine göre dizilişini saptamak amacı ile elek analizi yani granülometri deneyi yapılır. Amaç, minimum boşluklu ve toplam yüzeyi minimum olan bir agregas karışımı elde etmektir (TS 706).

2.3 Beton Karma Suyu

Betonu oluşturan maddelerden biri de beton karma işleminde kullanılan sudur, içilebilen su beton üretiminde rahatlıkla kullanılabilir. Betonda kullanılacak karma suyu asit karekterli olmamalı, sülfat (SO_3^-) içeriğini 2 gr/litre değerinden az olmalı, su içinde bulunan bazı anyon ve katyonlardan ve ayrıca organik maddelerden kaçınılmalıdır. Şeker, nişasta gibi maddeler de prizi geciktirici etkisinden dolayı sorun yarattığından bu hususta dikkatli olunmalıdır (TS 500, Akman, 1990).

2.4 Katkı Maddeleri

Çimento harcına veya betona bazı özellikler kazandırmak ve bazı özelliklerini değiştirmek için karışıma eklenen maddelere, "katkı maddeleri" denir. Bunlar organik veya inorganik kimyasal maddelerdir. Katkı maddeleri su, agregas ve çimento dışında betona çok düşük miktarlarda çimento ağırlığının %5'inden daha az olmak üzere üretim sırasında katılır (Akman, 1990). Katkı maddelerinin özellikleri kullanılmadan önce dikkatle incelenmeli ve uygulama bilinçli bir şekilde yapılmalıdır, çünkü bazı katkı maddeleri betonun belirli bir özelliğini istenen biçimde değiştirirken; diğer bir özelliğini olumsuz yönde etkileyebilir.

Betonda kullanılan ve reolojik özellikleri etkileyen katkı maddeleri akışkanlaştırıcı plastifiyanlar ve su tutuculuğu arttıran plastifiyanlar olmak üzere iki gruba ayrılabilir.

Bunlardan başka, priz ve serleşmeyi etkileyen katkı maddeleri, hava içeriğini değiştiren katkıları, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini arttıran katkı maddeleri, betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri ve betona ek özellikler kazandıran katkı maddeleri de vardır.

2.5 Beton Karışımı

Betondan aranan özelliklerin elde edilebilmesi için bileşime giren kum, çakıl, çimento ve suyun amaca uygun olarak ayarlanması gerekir. Betonda aranan en önemli özellik, genellikle basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı diğer birçok özelliği de etkilediğinden, karışımın seçiminde en önemli faktör olarak görülür. Belirli bir basınç dayanımını sağlayacak karışımda yerinde yerleştirilip, sıkıştırılmış 1 m³ beton bileşiminde bulunan çimentonun ağırlık olarak miktarı "dozaj" olarak adlandırılır. Betonarmede kullanılan betonların dozajı genelde 250-400 kg/m³ arasında değişir. Geçirimsizlik ve donatıyı paslanmadan korumak için, çimento dozajının belirli bir düzeyden az olmaması gerekir. Beton dayanımı sadece dozaj ile değil, su-çimento oranı ile de değişir ancak, bu oran istenilen dayanıma göre ayarlanırken, elde edilecek karışımın ekonomik ve işlenebilir kıvamda olmasına da özen gösterilmelidir (Ersoy, 1987).

Tam olarak güvenilmemesine karşın beton kıvamının belirlenmesinde ülkemizde yaygın olarak kullanılan deney, "çökme deneyi" (slump test) dir.

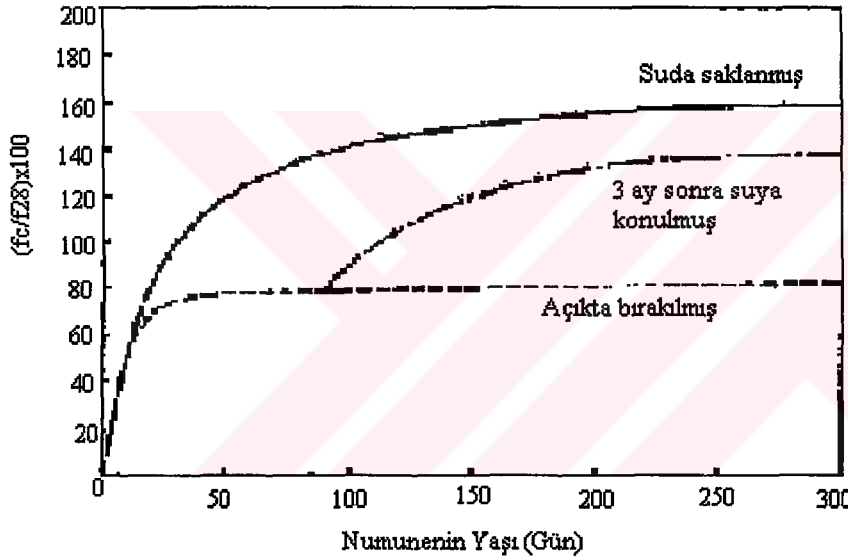
Beton karışım hesapları iki aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşamada, örnek beton karışımı teorik yolla hesaplanır. İkinci aşamada ise örnek beton üretilir ve bu betonun taze halde işlenebilmeyi, sertleşmiş halde mukavemeti sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. İstenilen sonuç elde edilmiş ise üretime geçilir, edilmemiş ise gerekli düzeltmeler yapılır ve üretim için kesin değerler bulunur (Akman, 1990).

2.6 Betonun Yerleştirilmesi ve Bakımı

Taze beton, prize başlamadan önce yerine dökülmeli, kalıplara yerleştirildikten sonra vibratör ile sıkıştırılmalıdır. Betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi sırasında malzemede ayrışma (segregasyon) olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrışım en fazla betonun gerektiği gibi taşınmadığı durumlarda oluşur ve sertleşmiş betonun gözenekli olması ile sonuçlanır.

Beton zamanla dayanım kazanan bir malzemedir. Bileşimindeki suyun bir bölümü belirli sürede hidrasyon için kullanılır. Bu suyun buharlaşarak kaybolması, hidrasyon için

gereken suyun yok olması ve dolayısıyla betonun gereken dayanımı kazanamaması ile sonuçlanır. Bu nedenle taze betonun bakımı, karışımın hazırlanması kadar önemlidir ve beton dayanımını önemli ölçüde etkiler. Kusursuz bir karışımla hazırlanmış beton, iyi bakılmadığı takdirde öngörülen dayanıma erişemez. Betonun içinde bulunduğu ortamdaki nemin ne denli önemli olduğu Şekil 2.1'den açıkça görülmektedir. 7 gün suda saklandıktan sonra açık havada bırakılmış bir grup numune, 10 ay sürekli suda saklanmış grubun dayanımının ancak yarısına erişebilmektedir. Standartlar (TS-1247 ve TS-1248) rutubet ve sıcaklık faktörlerini dikkate alarak deney numunelerinin deney gününe kadar 20°C de su içinde saklanmasını öngörmektedirler. Bu süre içinde ortamın sıcaklık ve neminin gerekli sınırlar içinde bulundurulmasına "taze betonun bakımı" veya "kür" denir (Akman, 1990).



Şekil 2.1 Kür koşullarının basınç dayanımına etkisi (Ersoy, 1987)

Beton, yedi günde, betonarme hesaplarında öngörülen 28 günlük dayanımının yaklaşık %70' ine ulaşır. Betonun dayanımını, özellikle ilk hafta içinde bulunduğu ortamın nem oranı ve sıcaklığı önemli ölçüde etkiler.

Betonun normal prizini yapması için en uygun sıcaklık 15 ile 25 °C'ler arasıdır. Yüksek sıcaklık betonun prizini hızlandırır. Bu durumda gerekli nem sağlanmazsa, betonda büzülme (rötre) çatlakları oluşur. Beton yüzeyini etkileyen kuru rüzgar büzülme çatlaklarının oluşmasını hızlandıracağından, taze betonun yüzeyi örtülerek bu tür etkilerden korunmalıdır.

Priz için ideal ortam, nemli bir ortamdır. Bu nedenle kür yapılırken beton yüzeyleri sürekli ıslatılmalı ve özellikle geniş yüzeylerde buharlaşmanın önlenmesi için yüzey örtülmelidir. Düşük sıcaklıkta priz yavaşlar. Sıcaklığın +4 °C'den düşük olduğu durumlarda önlem almadan beton dökülmemelidir. Alınacak önlemler, su ve agregayı ısıtmak veya özel katkı maddeleri kullanmaktır.

2.7 Betonun Mekanik Özellikleri

Beton, homojen olmayan gevrek bir malzemedir. Kendine özgü davranışı zaman ve yük geçmişine bağlıdır. Bu bölümde, betonun basınç dayanımı, basınç etkisinde deformasyonu ve diğer bazı önemli özellikleri tanıtılacaktır.

2.7.1 Betonun basınç dayanımı

Betonun mekanik dayanımları arasında en çok inceleneni, basınç dayanımıdır. Bunun nedeni, betonun gevrek bir malzeme olması, basit mukavemet değerleri arasında en yüksek olanının basınç, en düşük olanının çekme dayanımı olmasıdır. Pratik olarak betonun hiç çekme gerilmesi almadığı, hemen çatladığı varsayılır ve beton basınca çalıştırılır. Basınç dayanımı, betonun tüm olumlu nitelikleri ile paralellik gösterir. Yüksek dayanımlı beton doludur, serttir, su geçirmez, dış etkilere dayanır, aşınmaz. Basınç dayanımının belirlenmesi ile betonun niteliği hakkında genel bir değerlendirme yapılabilir. Basınç dayanımı deneyi diğer deneylere oranla en kolaydır. Basınç dayanımı, pek çok faktörün etkisi altındadır. Bunları, çimento ile ilgili faktörler, su miktarı ile ilgili faktörler, betonun yaşı, doluluğu, kür koşulları, numune geometrisi ve boyutları, yükleme hızı gibi faktörler olarak sıralamak mümkündür (Akman, 1990).

Çimento ile ilgili faktörler:

Çimentonun cinsi ve miktarı basınç dayanımında etkilidir. Betonun daha yüksek dayanımlı olmasında çimentonun yüksek dayanımlı olmasının etkisi büyüktür. Aynı dozajda PÇ 50 ile üretilen bir betonun dayanımı, PÇ 32,5 ile üretilen betonunkinden yüksektir. Çimento dozajının yüksek olması mukavemeti artırır, ancak dayanımı etkileyen faktör sadece dozaj değil aynı zamanda su/çimento oranıdır (Akman, 1990).

Su miktarı ile ilgili faktörler:

Karma suyunun gerekenden az veya çok fazla olması mukavemeti büyük ölçüde düşürür. Suyun esas görevi çimentonun hidratasyonunu sağlamaktır. Hidratasyon için gerekli olan su,

çimento ağırlığının %14'ü, hidrasyon ve jel yapı için gerekli olan su %25'i civarındadır. Betona işlenebilme için katılan su nedeniyle bu oran (s/ç) % 40'a ulaşır. Katılan fazla suyun bir kısmı buharlaşır ve beton içinde kılcal boşlukların oluşmasına neden olur (Akman, 1990).

Son zamanlarda geliştirilen özel çimentolar ve yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak beton üretiminde suyun bağlayıcıya oranı %16 olan çok yüksek mukavemetli betonlar üretilmektedir.

Kür koşulları

Katılma ve sertleşme aşamasındaki betona, çevrenin sıcaklık ve rutubet etkisi çok fazladır. Bu aşamadaki betonun bulunduğu ortamın rutubetini yüksek hatta doymuş halde (%100) tutmak kaydıyla sıcaklık 60 °C'nin üzerine çıkarılarak mukavemet artışı hızlandırılır. Prefabrik beton yapı elemanlarının üretiminde bu yöntemlerden yararlanılır. Bağıl nemin %50 nin altına düşmesi durumunda betondaki suyun buharlaşması, hidrasyon için gerekli suyun kalmaması problemini ortaya çıkarır. Özellikle sertleşmenin ilk günlerinde hidrasyon daha çok ve hızlı olduğundan sıcaklık artışı ve rüzgar hızının etkisi ile su kaybı daha da önem kazanır (Akman, 1990; Neville, 1992).

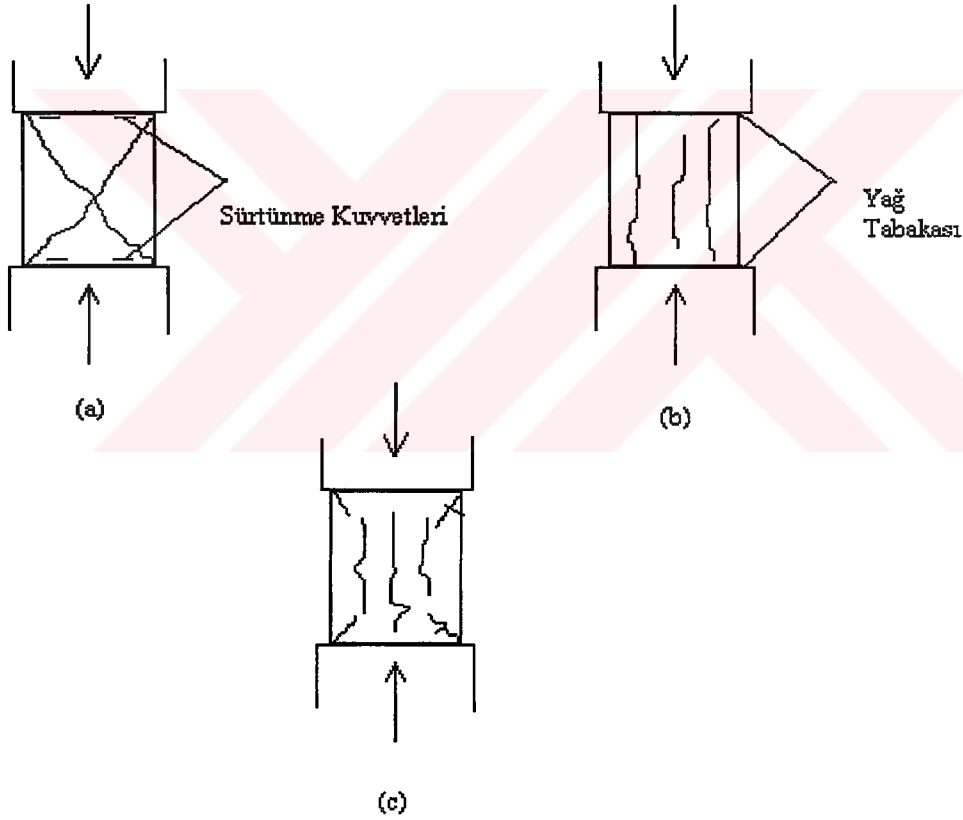
Numune geometrisi ve boyutları:

Basınç dayanımı silindir veya küp geometrik şeklindeki numunelerde saptanır. Yapılan çalışmalar silindirin küpten daha iyi olduğunu kanıtladığından, Avrupa Beton Komitesi (CEB) de silindiri standart numune olarak kabul etmiştir. Tercih nedenleri aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- a) Küp numunesinin alanı ve dayanımı silindire kıyasla daha büyük olduğundan, kırılma yükü yaklaşık %40 daha fazladır, bu durumda kullanılacak presin kapasitesinin küp deneyi için yüksek olması gerekir.
- b) Küpün keskin köşelerinde büzülme (rötre) nedeni ile gerilme yığılmaları olabilir.
- c) Küp deneyinde kırılma, Şekil 2.2a'da gösterildiği gibi, eğik çatlakların oluşması ile başlar ve giderek bu çatlaklar numunenin bir piramit şeklinde kırılmasına neden olur. Eksenel basınç altındaki bir numunenin bu tür kırılışının nedeni, pres tablası ile numune arasındaki sürtünmeden oluşan, yük eksenine dik kuvvetlerdir. Yapılan deneyler, numunenin alt ve üst yüzeyleri ve pres tablası arasında oluşturulan bir yağ tabakasının, sürtünmeyi azaltarak, kırılma biçimini değiştirdiğini göstermiştir. Bu durumda Şekil 2.2c'de gösterildiği gibi, kırılma eksenel basınç deneyinden beklendiği biçimde, yük eksenine dik

çatlaklarla oluşmakta ve dayanımda %50'ye varan azalmalar gözlenmektedir.

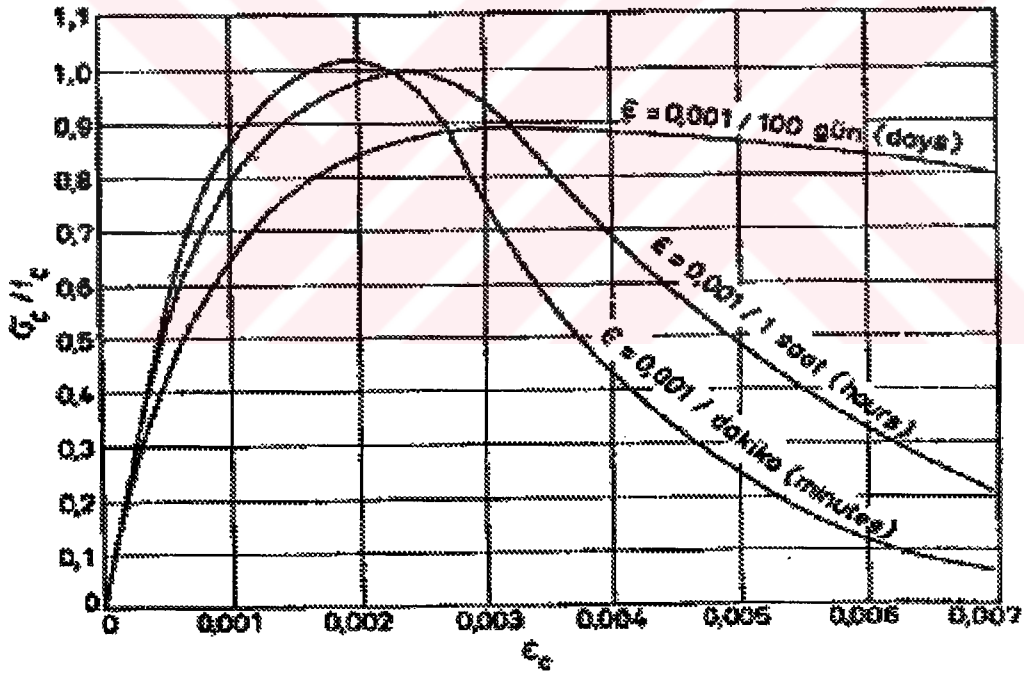
Pres tablası ile numune yüzeyleri arasında sürtünme nedeni ile oluşan kuvvetlerin etkisi, yükün uygulandığı yüzeyden uzaklaştıkça azalmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak, numune yüksekliğinin kesit boyutuna oranı büyüdükçe, sürtünme etkisi kırılmayı daha az etkilemektedir. Bu nedenle, yüksekliğin kesit boyutuna oranı 2,0 olan silindir, oranın 1,0 olduğu küpe kıyasla daha güvenilir bir numune olmaktadır. Standart silindir basınç deneyinde, yönetmeliklerde öngörülen kükürt ve parafinden oluşan başlık sürtünmeyi azalttığından, kırılma Şekil 2.2c'de gösterildiği gibi oluşmaktadır (Ersoy, 1987). Bazı durumlarda numuneler standart boyutlardan farklı olabilir. Özellikle yapıdan çıkarılan ve karot adı verilen örneklerde bu durumla karşılaşılır (Akman, 1990).



Şekil 2.2 Küp deneyinde numunenin kırılma aşamaları (Ersoy, 1987)

Yükleme hızı

Beton, zamana bağlı şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, deneyde yüklenme hızı çok önemlidir. Yapılan deneyler, yavaş yüklenen bir numune dayanımının, hızlı yüklenen bir numuneye oranla daha düşük olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı şartname ve yönetmeliklerde standart basınç deneyi tanımlanırken, yüklenme hızı da $\text{kgf/cm}^2/\text{saniye}$ olarak belirtilir. Türk yönetmeliklerinde bu hız, genellikle $1,0 \text{ kgf/cm}^2/\text{saniye}$ olarak verilmektedir (Ersoy, 1987). İdeal olanı, deneyde deformasyon hızının sabit tutulmasıdır. Şekil 2.3'de sabit deformasyon hızı altında yapılan deneylerden elde edilen bazı gerilme şekil değiştirme (σ - ϵ) eğrileri gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, yüklenme hızı azaldıkça dayanım düşmekte, buna karşılık süneklik önemli ölçüde artmaktadır. Bu nedenle, betonun sabit, ölü yükler altındaki davranışı ile, deprem gibi ani gelen yüklemeler altındaki davranışı farklıdır. Betonun σ - ϵ eğrisinin özellikleri, beton dayanımı ve yüklenme hızı dışında, numune boyutları ve kullanılan presin özelliklerine göre de değişir (Ersoy, 1987).



Şekil 2.3 Sabit deformasyon hızı altında σ - ϵ ilişkileri (Ersoy, 1987)

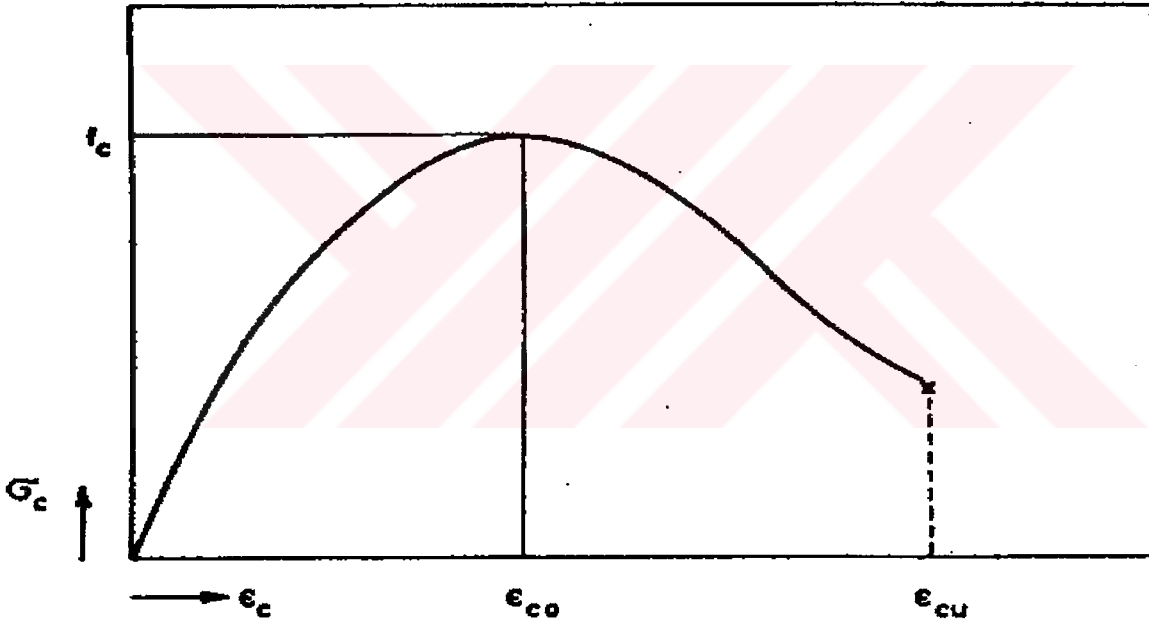
2.7.2 Betonun gerilme-şekil değiştirme özellikleri

Bir mekanik problemin çözümünde izlenecek yol, (a) denge koşulunun sağlanması, (b) uygunluk koşullarının sağlanması (c) malzeme ve malzemeler için gerilme-şekil değiştirme

ilişkilerinin belirlenmesidir. İlk iki aşama malzeme davranışından bağımsız olduğundan, malzeme özellikleri ancak (c) olarak gösterilen üçüncü aşamada dikkate alınır. Malzeme davranışı ne kadar gerçekçi modellenirse çözüm o kadar doğru olacağından, malzemenin gerilme deformasyon özellikleri büyük önem taşır.

Betonun çekme dayanımı çok düşük olduğundan, hesaplarda genellikle dikkate alınmaz. Beton için önemli olan basınç dayanımı, dolayısıyla basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisidir.

Betonun gerilme-şekil değiştirme özelliklerini birçok değişken etkilediğinden, beton için tek ve kesin bir σ - ϵ eğrisi tanımlamak olanaksızdır. Bu nedenle Şekil 2.4'te gösterilen σ - ϵ eğrisi, sadece betonun genel davranışı hakkında bir fikir vermektedir. Şekilde görüldüğü gibi σ - ϵ eğrisinin düşük gerilmeler altında eğimi çok az değiştiğinden,

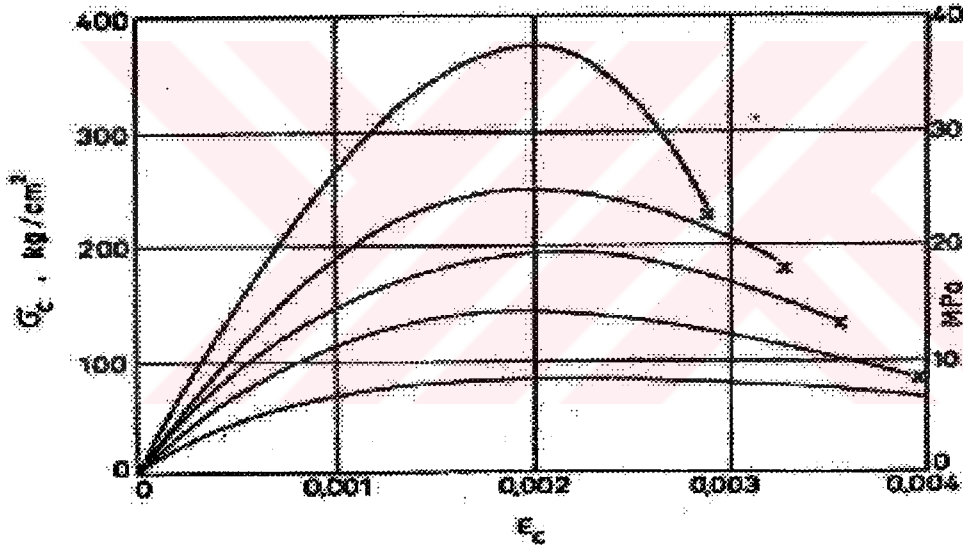


Şekil 2.4 Betonda gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Ersoy, 1987)

eğrinin bu bölümü doğrusal kabul edilebilir, bu durum ancak hızlı yüklemeler için geçerlidir. Uzun süreli yükler altında ise beton zamanla deformasyon gösteren bir malzeme olduğundan, eğrinin ilk bölümünün bile doğrusal kabul edilmesi yanıltıcı olabilir. Şekil 2.4'deki eğride, maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme ϵ_{co} aşıldığında, deformasyonun artmasına karşın gerilmeler azalmaktadır. Betonun σ - ϵ eğrisinin maksimum gerilmeden sonraki kısmı ihmal edilemeyecek kadar önemlidir, eğrinin bu bölümünün var olması nedeni ile, betonarme elemanda fazla zorlanan lifler daha az zorlanan liflere gerilme aktarabilmektedir. Bu özellik "gerilme uyumu" olarak adlandırılır. Betonun σ - ϵ özellikleri

beton dayanımı ile değişmektedir, Şekil 2.5'de çeşitli beton dayanımları için σ - ϵ eğrisi gösterilmiştir, bu eğrilerden çıkarılabilecek sonuçlar aşağıda verilmiştir.

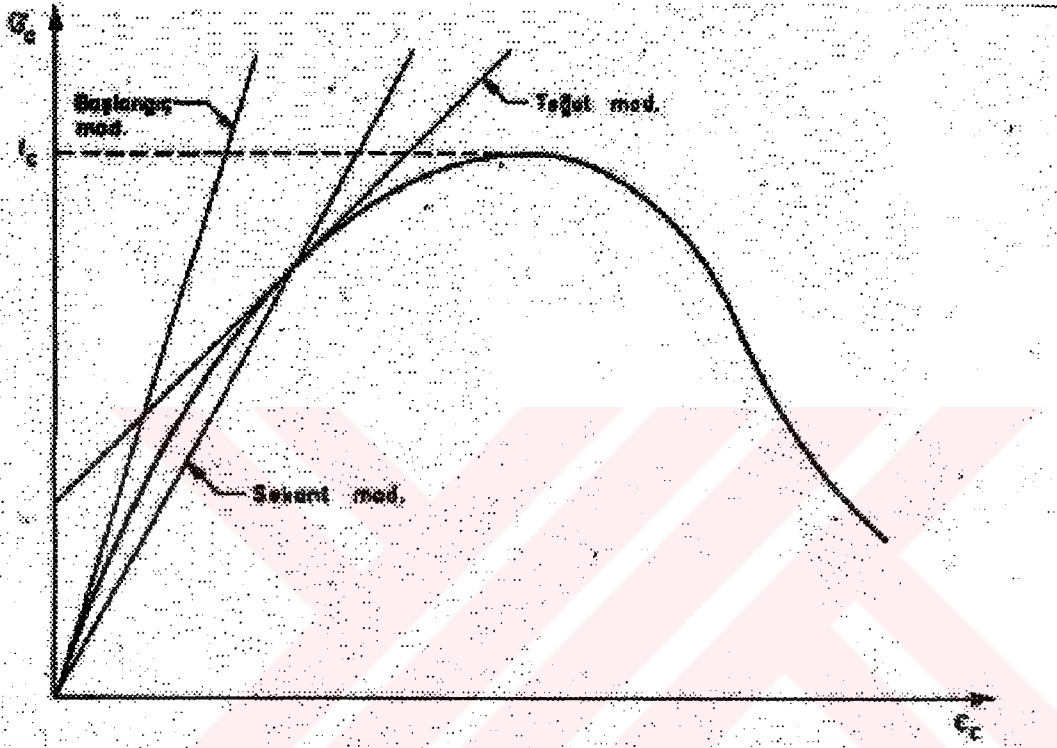
- Gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin başlangıç eğimi, elastisite modülü olarak tanımlanabilir. Elastiklik modülü, beton kalitesi yükseldikçe artmaktadır.
- Yüksek dayanımlı betonların tepe noktaları daha belirgindir.
- Düşük dayanımlı betonlar, yüksek dayanımlı olanlara oranla daha fazla sünekliğe (düktilite) sahiptir. Başka bir deyişle, düşük dayanımlı betonlarda kırılma anındaki birim kısalma, diğerlerine oranla daha büyüktür.
- Bu eğrilerde maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma, ϵ_{co} , beton dayanımından bağımsız olarak 0.002 mertebesinde dir.



Şekil 2.5 Çeşitli betonlar için σ - ϵ ilişkisi (Ersoy, 1987)

2.7.3 Betonun elastisite modülü:

Betonda gerilme-deformasyon eğrisinin bir doğru içermemesi nedeni ile, literatürde çeşitli tanımlar yapılmıştır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan üç tanesi Şekil 2.6'da σ - ϵ eğrisi üzerinde gösterilmiş ve tanımlar aşağıda verilmiştir (Ersoy, 1987).



Şekil 2.6 σ - ϵ Eğrisine çizilen teğetler (Ersoy, 1987)

Statik modül veya sekant modülü E_s ise, gerilme-deformasyon eğrisinin bir noktasının koordinat merkezine birleştiren doğrunun eğimidir. Bu modülün bilinmesi ile deformasyondan gerilmeye geçmek mümkündür ki E_s , gerilmenin değeri ile değişen bir büyüklüktür. Bu büyüklüğü belirsizlikten kurtarmak için RILEM tarafından önerilen deneysel metotta betona önce $f/3$ dolayında bir gerilme uygulanır ve sonra kuvvet azaltılarak gerilme 5 kgf/cm^2 değerine düşürülür. Her iki gerilme altında betonun yaptığı şekil değiştirme ölçülür ve bu işlem birkaç defa tekrarlandıktan sonra betonun şekil değiştirmesinin pratik bakımdan değişmeyen bir değer aldığı görülür. Bu duruma ulaşıldıktan sonra elastisite modülü aşağıdaki ifade ile saptanır.

$$E_s = \frac{f_{cc}/3 - 5}{\epsilon_f/3 - \epsilon_s} \quad (2.1)$$

$\varepsilon_f/3$ ve ε_5 sırasıyla gerilme $f/3$ ve 5 kgf/cm^2 değerlerine eşit iken betonun yaptığı en son şekil değiştirmedir.

Başlangıç elastisite modülü, σ - ε eğrisinin başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimi olarak tanımlanmış ve bazı yayınlarda dinamik modül olarak adlandırılmıştır. Bu elastisite modülünün saptanması için değişik metotlar vardır. Bunlardan biri gerilme-şekil değiştirme eğrisinden faydalanmaktır. Buna göre gerilme-şekil değiştirme eğrisinin türevinin $\varepsilon=0$ için değeri dinamik elastisite modülünü verir. Bu metot voellmy parabol denkleminde uygulanırsa dinamik elastiklik modülü E_d için aşağıdaki 2.2 ifadesi elde edilir:

$$E_d = \frac{2f_{cc}}{\varepsilon_0} \quad (2.2)$$

Burada f , yüksek yükleme hızı altında yapılan basınç deneyinde bulunan mukavemet, ε_0 ise, gerilmenin maksimum değere ulaştığı anda betonun yaptığı birim kısalmadır. Dinamik elastiklik modülü, bu metottan başka beton içinden geçen V ultrases hızının ölçülmesi suretiyle de bulunabilir. Ses dalgalarının meydana getirdiği şekil değiştirmelerin hareketi dikkate alınarak V ile E_d arasında teorik olarak aşağıdaki bağıntı kurulmuştur.

$$E_d = k \times V^2 \times \frac{\beta}{g} \quad (2.3)$$

Deneylerin de doğruladığı bu bağıntıda yer alan büyüklüklerin boyutları dikkate alındığında yukarıdaki 2.3 ifadesi aşağıdaki hale gelmektedir:

$$E_d = k \times 10^5 \times V^2 \times \frac{\beta}{9,81} \quad (2.4)$$

Bu ifadede V ses geçiş hızı (km/sn), β , betonun birim ağırlığı (kg/dm^3), g , yerçekimi ivmesi (m/sn^2) cinsinden yerine konulduğunda E_d dinamik elastisite modülü (kgf/cm^2) cinsinden elde edilecektir. Bu ifadede k katsayıdır ve ses hızının, uzunluğu L , kesit boyutu a ve prizma şeklindeki beton numunede saptanması halinde 1'e eşittir ancak prizma numunede $L \geq 5a$ olmalıdır. Numune prizmadan fark ediyor ve küp şekline yaklaşıyorsa k katsayısı aşağıdaki 2.5 ifadesi ile hesaplanmalıdır:

$$k = \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \quad (2.5)$$

Bağıntıda ν , betonun Poisson oranını göstermektedir.

Beton çok düşük gerilmelere maruz ise, başlangıç modülü kullanılarak gerçekçi sonuçlar alınabilir.

Teğet modülü, σ - ϵ eğrisine herhangi bir noktada çizilen teğetin eğimidir. Pratikte bu teğet, yaklaşık olarak $0.4 f_{cc}$ gerilmesi temel alınarak çizilir.

Sekant modülü, orijinden, eğriye herhangi bir gerilmeye karşılık gelen noktaya çizilen sekantın eğimi olarak tanımlanır. Bu modül, betonun emniyet gerilmesine yakın gerilmelere maruz olduğu durumlarda iyi sonuçlar verir. Genelde sekant modülü $0.5 f_c$ gerilmesine göre hesaplanır.

Pratikte bu üç elastisite modülünden hangisinin kullanılacağı, söz konusu olan probleme bağlıdır. Örneğin, incelenen, gerilmelerin çok düşük düzeyde kaldığı bir titreşim problemi ise, başlangıç modülünün kullanılması daha doğru olur.

Betonun basınç dayanımını ve gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisini etkileyen bütün değişkenler elastisite modülünü de etkiler. Bu nedenle beton gibi elastik ve doğrusal olmayan ve zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzemenin elastisite modülünü doğru ve kesin olarak tanımlamak olanaksızdır. Hesap için önerilecek elastisite modülünü, bütün değişkenleri dikkate alarak tanımlamak elbette pratik olmayacaktır. Elastisite modülünün hesabı için Amerikan (ACI), Avrupa (CEB) ve Türk (TS-500) yönetmeliklerinde öngörülen bağıntılar aşağıda verilmiştir. Bu bağıntılar ani yükleme içindir ve zamanın etkisinden bağımsızdır. Kalıcı yük durumunda bu değerler zamanla yarıya ve hatta üçte bire inecektir. Bugün, çeşitli ülkelerde yürürlükte olan bazı yönetmeliklerde hafif beton da işin içine katıldığından, beton ağırlığı da dikkate alınmaktadır.

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 318-83):

$$E_{cj} = \beta^{1.5} * 0.14 * \sqrt{f_{cj}} \quad (2.6)$$

$$E_{cj} = 15100 * \sqrt{f_{cj}} \quad \text{Normal ağırlıktaki beton için } (\beta=2270 \text{ kg/m}^3) \quad (2.7)$$

Avrupa Beton Komitesi (CEB-78):

$$E_{cj} = 44150 * (f_{cj} + 80)^{1/3} \quad (2.8)$$

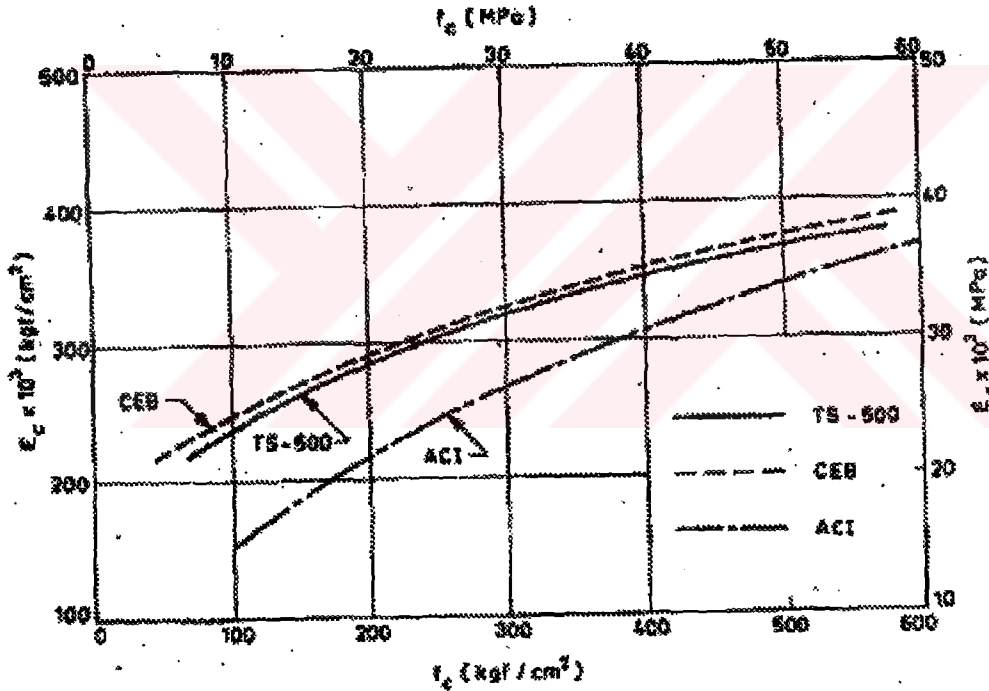
Türk Standardları Enstitüsü (TS-500):

$$E_{cj} = 10270 * \sqrt{f_{cj}} + 14000 \quad (2.9)$$

β =betonun ağırlığı, kg/m^3 , E_{cj} =j günlük betonun elastisite modülü, kgf/cm^2

f_{cj} =j günlük betonun silindir basınç dayanımı, kgf/cm^2

Genelde elastisite modülü denince 28. günde ani yükleme altındaki elastisite modülü anlaşılır. Şekil 2.7'de denklem 2.6, 2.7 ve 2.8'den elde edilen elastisite modüllerinin, beton basınç dayanımına göre değişimi gösterilmiştir (Ersoy, 1987).



Şekil 2.7 Beton basınç dayanımı- elastisite modülü ilişkisi (Ersoy, 1987)

2.7.4 Betonun çekme kuvvetleri altında şekil değiştirmesi ve çekme dayanımı

Beton, basınç mukavemetinin büyük olması nedeni ile, yapılarda basınç gerilmelerine maruz bırakılır, çekme kuvvetleri, meydana geldikleri bölgelerdeki çelik donatılar tarafından karşılanır. Çeşitli nedenlerle özellikle rötre nedeni ile çatlakların meydana gelmemesi için betonun çekme dayanımının belli bir değerden büyük olması gerekir. Betonun çekme

mukavemeti dolaylı ve dolaysız olmak üzere iki şekilde belirlenebilir. Dolaylı deneylerden birisi yarma metodu veya Brezilya deneyi diğeri ise eğilme deneyidir. Bu deneyler ve değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

Yarma metodu deneyinde, doğrultmanı üzerine yatırılmış, eksenini yatay düzlem içinde bulunan, silindirik şeklindeki beton numunesi üzerinde basınç deneyi yapılır. Böyle bir zorlamada silindirin basınç aleti tablalarına değdiği doğrultulardan geçen düşey kesitte çekme gerilmeleri oluşur uygulanan basınç kuvvetinin P_k gibi bir değere ulaşması sonucunda silindirik numunesi boylu boyunca yarılır. Bu durumda betonun çekme mukavemeti, aşağıdaki bağıntı yardımı ile bulunur.

$$\sigma_x = f_{cs} = \frac{2P_{cs}}{\pi * d * l} \quad (2.10)$$

Bağıntıda f_{cs} , yarma dayanımı, (N/mm²) P_{cs} , yarıma yükü, (kN), d , silindir çapı, (mm), l , silindir boyu (mm)'dur.

Yarma deneyi

Konu ile ilgili çalışmalarda ve standartlarda betonun çekme dayanımının, 2.11 bağıntısında da görüldüğü gibi basınç dayanımının karekökü ile doğru orantılı olduğu ortaya konulmuştur (TS 500,1985; ACI, 1994; Iravani, 1996).

$$f_{cs} = \alpha_f \sqrt{f_{cc}} \quad (2.11)$$

f_{cs} : Betonun yarma dayanımı

f_{cc} : Betonun basınç dayanımı

α_f = Beton çekme dayanımı için katsayı, (TS:0.53; ACI:0.59)

α_f katsayısı TS'de 0,53, ACI'da 0,59 değerini almaktadır. Bu bağıntı, Yerlici – Ersoy (1995) tarafından 2.12 ve Arıoğlu (1996) tarafından 2.13 bağıntıları ile biraz daha geliştirilerek, daha gerçekçi hale getirilmiştir.

$$f_{cs} = 0.36 f_{cc}^{0.62} \quad (2.12)$$

$$f_{cs} = 0.321 f_{cc}^{0.661} \quad (2.13)$$

Eğilme deneyi

Çekme mukavemetinin bulunmasında uygulanan dolaylı bir diğer metot ise, prizma şeklindeki beton numunelerinin eğilme deneyine tabi tutulmasıdır. Eğilme zorlaması sonunda meydana gelen çekme gerilmeleri, uygulanan kuvvetle birlikte artar, gerilmeler çekme mukavemetine eşit olunca numune kırılır. Numunenin kırılmasına neden olan eğilme momenti (M_k), prizmanın mukavemet momenti W ise bu deney sonunda bulunan betonun eğilme mukavemeti f_{ef} aşağıdaki 2.14 bağıntısından hesaplanır:

$$f_e = \frac{M_k}{W} \quad (2.14)$$

Bu deney genel olarak bir kenarı a olan kare kesitli prizmalar üzerinde yapılır, bu durumda $W = a^3/6$ değerine eşittir. f_{ef} ile gerçek çekme mukavemeti f_{ct} arasında aşağıdaki bağıntı kurulabilir.

$$f_{ct} = 0,6 f_{ef} \quad (2.15)$$

Dolaysız çekme deneyi ise kare kesitli veya dairesel kesitli beton numunelere eksenel kuvvet uygulanmak sureti ile yapılır. Bu deneyde, özel metal başlıkları beton prizmanın son bulan yüzeylerine özel yapıştırıcılar yardımı ile sabitlenerek yapılır. Eksenel bir P kuvvetinin uygulanması halinde prizma eksenine dik kesitlerde P/A_0 a eşit çekme gerilmeleri oluşur. P kuvvetinin değeri arttırılarak çekme gerilmeleri gittikçe büyük değerler alır. Kuvvet bir P_k değerine ulaştığında prizma ikiye ayrılarak kırılır. Bu durumda betonun gerçek çekme mukavemeti f_{ct} , P_k/A_0 değerine eşit olur. Çekme mukavemetine ulaşıldığında betonun yaptığı uzama oranı 8×10^{-5} ile 11×10^{-5} arasında değişen çok küçük değerler almaktadır. Çekme mukavemetinin zamanla artışı uzun sürmez, 90 günde bunun en son değerine ulaştığı kabul edilir (Postacıoğlu, 1986).

Herhangi bir yönetmelikte deney türü belirtilmeden salt çekme dayanımından bahsediliyorsa, bunu "eksenel çekme dayanımı" olarak anlamak gerekir. Aşağıda bazı önemli yönetmeliklerde öngörülen çekme dayanımları verilmiştir. Betonlarda f_{cc} , basınç dayanımı, f_{ct} , eksenel çekme dayanımını ve f_{ef} ise eğilmede çekme dayanımını ifade etmektedir,

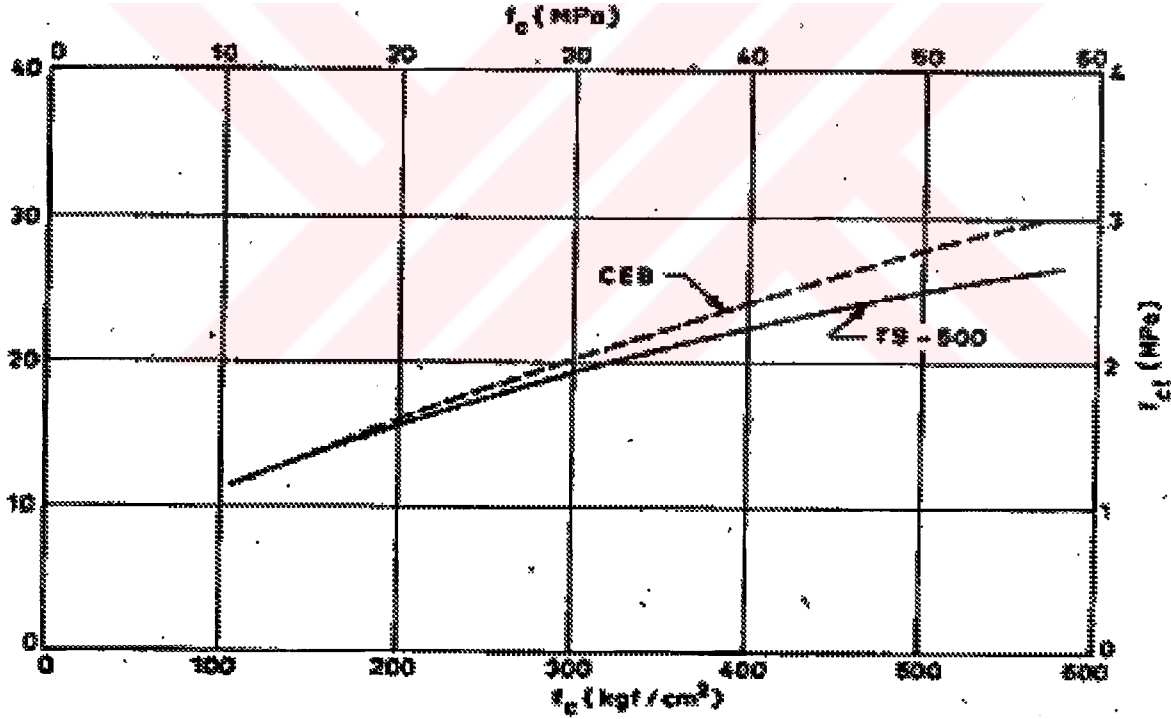
dayanımlar kgf/cm^2 olarak alınmalıdır.

$$\text{Amerikan (ACI)} \quad f_{ctf}=2.0\sqrt{f_{cc}} \quad (2.16)$$

$$\text{Avrupa (CEB)} \quad f_{ct}=2.16 * \alpha * \sqrt[3]{f_{cc}^2} \quad \alpha=0,21-0,225 \quad (2.17)$$

$$\text{Türk (TS-500)} \quad f_{ct}=1.1 * \sqrt{f_c} \quad (2.18)$$

CEB ve TS-500 de öngörülen çekme dayanımları Şekil 2.8'de karşılaştırılmış, yalnız eğilme çekme dayanımının belirlendiği ACI bu karşılaştırmaya dahil edilmemiştir. Şekilden görüleceği gibi, özellikle yüksek dayanımlı betonlar dikkate alınmazsa CEB ve TS-500 arasındaki fark çok azdır. Aslında TS-500 de verilen denklem, CEB denkleminin basitleştirilmesi ile elde edilmiştir (Ersoy, 1987).



Şekil 2.8 TS 500 ve CEB'e göre öngörülen çekme dayanımları (Ersoy, 1987)

2.7.5 Betonun kayma kuvvetleri altında davranışı

Betonun çekme mukavemeti basınç mukavemetinden küçük olduğundan kayma durumundaki davranışında çekme ile ilgili özellikleri etkilidir (Postacıoğlu, 1986).

Betonun kayma kuvvetleri altında yaptığı şekil değiştirme incelemek ve makaslama mukavemetini bulmak için içi boş veya dolu silindir şeklindeki beton numuneler üzerinde burulma deneyi yapılır. Birleşik Amerika'da yapılan bir çalışmada silindir mukavemeti 210-430 kgf/cm² arasında değişen betonların makaslama mukavemetlerinin 15-32 kgf/cm² aralığında değerler aldığı tespit edilmiştir. Belçika'da kayma açıları ölçülerek yapılan bir deneysel çalışmada, kayma gerilmesi 10,35 kgf/cm² ye eşit iken G kayma modülünün 185,000 kgf/cm² değerini aldığı saptanmıştır, bu da betonda G kayma modülünün aşağıdaki 2.19 bağıntısı yardımıyla hesaplanabileceğini gösterir. Bağıntıda E, elastisite modülünü, ν , poisson oranını göstermektedir.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.19)$$

2.7.6 Betonun donatı ile aderansı

Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının, betonarme olarak davranabilmesi için çubukların betona kenetlenmesi gerekir. Kenetlenmeyi sağlayan kayma gerilmeleri aderans adını alır. Aderansa etki eden faktörler, beton ile çelik çubuk arasındaki adezyon (yapışma) ve sürtünme kuvvetleridir. Donatı ve beton arasındaki aderans gerilmesi, donatıdaki gerilme ve moment nedeni ile oluşan deformasyonlardan, betondaki rötre ve sünmeden etkilenir (Ersoy, 1987). Aderans olayı, çatlama durumunu belirleyen ve betonun çatlamasından sonraki durumlarda da donatı ile birlikte çalışmasını sağlayan bir öge olması nedeni ile, limit durum için önemli faktörlerden biri olarak ayrıca önem kazanmaktadır (Karakoç, 1985). Aderans dayanımı özel deney düzeneğinde çekip çıkarma (pull-out) deneyi ile 2.20 bağıntısından belirlenir. Bağıntıda, P_{csb} , maksimum aderans kuvveti, (N), lb, aderans boyu, (200 mm), ϕ , donatı çapı (10 mm)'dir.

$$f_{csb} = \frac{2.P_{csb}}{\pi.l_b.\phi} \quad (2.20)$$

2.8 Puzolanlar

Hidratasyon ürünlerinden olan serbest kireci bağlaması ve ince boşlukları doldurması nedeni ile betonun zararlı ortama karşı dayanıklılığını arttırmak için betona üretim aşamasında puzolan malzeme katılır (Mehta ve Gjorv, 1982; Bonen, 1993). Bu bölümde, beton üretiminde yaygın olarak kullanılan puzolanların özellikleri, puzolanik aktivitenin araştırılması, çalışmanın konusu olan yüksek fırın cürufunun beton özelliklerine etkileri aşağıda açıklanmıştır.

Yalnız başına kullanıldığında bağlayıcı özelliği olmayan fakat kireç veya çimento ile karıştırıldığında su ile yaptığı reaksiyon sonunda bağlayıcı madde özelliğini kazanan maddelere puzolan denir. Puzolan maddelerin bileşiminde fazla miktarda kolloidal halde silis ve alümin bulunmaktadır. Bu maddelerin kireçle yapmış olduğu reaksiyon sonunda puzolan malzeme bağlayıcılık özelliği kazanır. Bir puzolana portland çimentosu karıştırıldığında çimentonun hidratasyonu sonunda meydana gelen Ca(OH)_2 ile SiO_2 ve Al_2O_3 arasında meydana gelen reaksiyon sonunda puzolan bağlayıcılık özelliği kazanır. Bu reaksiyonlar sonunda Ca(OH)_2 tespit edilir, başka bir deyişle çözülmez duruma getirilir.

Konu ile ilgili çalışmalarda asit karaktere sahip olan puzolanların başka bir deyişle $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ toplamının kuvvetli bir baz olan Ca(OH)_2 ile ilişkisinin büyük olduğunu göstermektedir. Bir puzolanın reaksiyon sonunda tespit ettiği kireç miktarı ne kadar fazla ise reaktivitesi o kadar büyüktür veya puzolanik özelliği o kadar yüksektir, bu özellik, en çok puzolanın özgül alanına bağlıdır. Şu halde puzolanik özelliğin arttırılması için maddenin çok ince bir şekilde öğütülmesi gerekmektedir. Puzolanik özelliği etkileyen diğer bir faktör puzolanın içerdiği Al_2O_3 ve SiO_2 gibi reaktif maddelerin amorf veya camsı ve zeolitik fazda bulunmasıdır. Çünkü kristal yapıdaki alümin ve silisin reaktif özellikleri yoktur. Diğer taraftan puzolanik özellik Al_2O_3 ile SiO_2 kireçle yaptığı reaksiyon sonunda meydana geldiğinden bir puzolanda CaO 'in az miktarda bulunması gerekmektedir. Bu açıklamalara göre puzolan maddelerde fazla miktarda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 amorf halde bulunmalı, CaO az miktarda yer almalıdır. Reaktif maddelerin oranı, A.S.T.M.'nin (C 618-72) nolu standardına göre;

$$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 0.70 \quad (2.21)$$

koşulu gerçekleşmeli, CaO miktarı da % 4' ü geçmemelidir. Ancak hemen belirtilmelidir ki yukarıdaki koşulun sağlanması o maddenin puzolan olduğunu göstermez çünkü puzolanın içerdiği SiO_2 ve Al_2O_3 amorf yapıya sahip değilse o maddenin puzolanik özellik göstermesi

beklenemez. Kimyasal analiz sonuçlarının miktar bakımından olumlu olması halinde maddenin puzolanik özelliğe sahip olup olmadığı kanıtlanmalıdır (Postacıoğlu, 1986).

Puzolanları doğal ve yapay olmak üzere iki büyük gruba ayırmak mümkündür (Postacıoğlu, 1986; Blanks, Kennedy, 1955; Neville,1987). Doğal puzolan olarak bilinen maddeler volkanik küller, killi şistler, diatome toprağı ve ponza taşıdır. Bunlar dünyanın belirli bölgelerinde bulunmaktadır. Doğal puzolanların en önemlisi Almanya'da Ren vadisinden çıkarılan ve Tras adı verilen puzolandır. Bu puzolan üstün özelliklere sahip olduğundan birçok ülkede ve ülkemizde tras, puzolan sözcüğünün yerini almıştır. İkinci önemli puzolan yatağı İtalya'da Roma ve Napoli arasındaki bölgede yer almaktadır. Yüksek nitelikli puzolanların bulunduğu bir diğer bölge de Ege Denizi'nde Yunanistan' a bağlı Santorin adalarıdır. Ülkemizde, Çorum civarında Mecitözü' nde geniş puzolan yatakları bulunmaktadır (Postacıoğlu, 1986).

Yapay puzolan olarak bilinen maddelerin en önemlilerinden biri pişmiş kildir. Bu amaçla kil, bileşimine bağlı olarak 600-900 °C arasındaki sıcaklıkta pişirilir. Elde edilen madde çimento inceliğinde öğütüldükten sonra çimentoya belirli oranlarda karıştırılarak kullanılır. Tuğla ve kiremit tozunun bir bağlayıcı madde ile karıştırılması da aynı sonucu verir. Tuğla tozu ve kireç karışımından oluşan ve Horosan denilen bu bağlayıcı madde ülkemizde eski eserlerin kışlaların, köprülerin yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu bağlayıcı madde, yağlı kireçten çok üstün özelliklere sahip olmakta ve özellikle su karşısında çözülmemektedir. Bu bakımdan deniz yapılarında kullanılmaya elverişlidir. Nitekim çimento icat edilmeden önce 1786 da inşaa edilen Cezayir limanında bağlayıcı madde olarak pişirilmiş kil ve kireç karışımı kullanılmıştır (Postacıoğlu, 1986). Uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi endüstri atığı maddeler, pirinç kapçığı külü, buğday sapı külü gibi tarım artıklarının yakılması ile elde edilen küller de puzolanik özelliğe sahiptir (Torii, 1992 ; Mazlum, 1989; Biricik, 1995).

Bu çalışmanın konusu olması nedeni ile dolayı yüksek fırın cürufu aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

2.8.1 Yüksek fırın cürufu

Demir üretiminde metal cevheri, kömür ve ergitici olarak genellikle kireç yüksek fırının üst kısmına konur, bu maddeler ısınarak yavaş yavaş aşağıya doğru hareket eder ve ergime bölgesine ulaşır. Fırının alt kısmında sıvı halde yoğunlukları birbirinden farklı iki madde elde edilir. Bunlardan biri yoğunluğu yüksek olan font, diğeri yoğunluğu daha düşük olması nedeni ile bunun üstünde yer alan cüruf veya letiyedir. Cürufun içinde bulunan maddeler,

kireç, silis ve alümin. Cüruf içindeki bu maddelerin miktarı, demir üretiminde kullanılan cevherin birleşimine ve uygulanan üretim sistemine bağlı olarak oldukça geniş bir aralık içinde değişmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalara göre; cürufun bileşiminde, % 42-48 oranında CaO (kireç), % 26-34 oranında SiO₂ (silis), % 12-20 oranında Al₂O₃ (alümin), ve bu üç esas elemandan başka % 5 oranında MgO, % 1 oranında alkali maddeler bulunur.

Bileşiminden kolaylıkla görüldüğü gibi, bu maddeler çimentoyu da oluşturan maddelerdir, bu nedenle cürufu, çimento üretiminin ilkel maddesi olarak kullanmak mümkündür, bu durumda cüruf, kilin yerini tutmaktadır. Cüruf ayrıca beton üretiminde agrega olarak da kullanılabilir, özellikle yol yapımında çok iyi sonuçlar elde edilmektedir. Bu maddenin üçüncü bir kullanma şekli ise bir bağlayıcı madde ile karıştırılarak hidrolik bağlayıcı gibi kullanılmasıdır. Cürufun kirece ve daha çok da portland çimentosuna karıştırılmasıyla "cüruf çimentoları" denilen geniş bir bağlayıcı madde grubu elde edilir. Cürufun çimentoya karıştırılması ilk defa 1863'de Almanya'da Langen tarafından gerçekleştirilmiştir. Cürufun kullanılması ancak 1934 senesinde Fransa'da resmen kabul edilmiştir. Bu tür çimentoların tüketimi devamlı bir artış göstermiş, örneğin. 1973 senesinde, Rusya'da üretilen 110 milyon ton çimentoda cüruf çimentosunun miktarı 30 milyon ton gibi yüksek orana ulaşmıştır (Postacıoğlu, 1986).

2.8.2 Cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılma koşulları

Bir yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için bazı koşulların yerine getirilmesi gerektiği açıktır. Bu koşullar, kimyasal ve iç yapı bakımından öngörülen koşullar ve incelik bakımından gerekli özellikler olarak üç grup altında toplanabilir.

Herhangi bir cürufun çimento üretiminde kullanılabilmesi için kimyasal bakımdan gerekli koşullarla ilgili olarak birçok öneriler ileri sürülmüştür. Bunlardan bir tanesi TS 20' de verilen 2.22 bağıntısıdır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} \geq 1 \quad (2.22)$$

Bu bağıntıda, SiO₂, cüruftaki çözülen silis miktarını, CaO, MgO ve Al₂O₃ sırasıyla cürufun içerdiği kireç, magnezi ve alümin miktarlarını yüzde cinsinden göstermektedir. Bu kriter kesin olmayıp ülkelere göre değişmektedir. Örneğin, Japonya'daki 1,4 'den, Almanya'da ise 1,6 'dan büyük olması koşulu aranmaktadır. Amerikan standartında ise 2.23 bağıntısı yer almaktadır.

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \frac{1}{2} \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2 + \frac{2}{3} \text{Al}_2\text{O}_3} > 1 \quad (2.23)$$

Cürufu alüminyum ve magnezyum katyonlarının oynadığı rol gözönüne alınarak 2.24 bağıntısındaki (k_i) faktörü ileri sürülmektedir.

$$k_i = \frac{M_e O_6}{M_e O_4} \quad (2.24)$$

Bu bağıntıda, M_e simgesi ile, Al ve Mg katyonlarını gösterilmektedir. Yapılan araştırmalarda k faktörü 0,35 civarında değer alırsa cüruf, bağlayıcı madde olarak en yüksek mukavemetine ulaşmaktadır. Yukarıdaki ifadede 6 ve 4 indisleri, Al ve Mg metallerinin koordinasyon valansıdır. Bu konuda her ülkede değişik kriterler önerilmiş olsa da bunlar, birbirinden pek farklı değildir. Burada önemli olan, cürufun kimyasal bileşim bakımından gerekli koşulu sağlayıp sağlamadığının araştırılmasıdır. Koşul sağlanıyor ise cürufun bağlayıcı madde olabileceği anlaşılır ve aşağıda belirtilen özelliklere sahip olup olmadığının araştırılması yoluna gidilir.

Cürufun içerdiği maddeler ancak amorf veya camı yapıda ise bağlayıcı madde özelliğine sahiptir. Yüksek fırından çıkan ve yaklaşık 1500 °C derece sıcaklıktaki cüruf kendi haline soğumaya bırakıldığı takdirde kristal yapıli cisimler meydana gelir. Bu durumdaki cüruf, herhangi bir şekilde bağlayıcı madde özelliği göstermez. Cürufun amorf veya camı yapıya sahip olması durumunda iç yapısı çok kararsızdır, dolayısı ile kimyasal bakımdan daha kuvvetli ve enerjik bir şekilde reaksiyon yapma özelliğine sahiptir. Bu da cürufa bağlayıcı madde özelliği kazandırır, ancak cürufun en iyi şekilde camlaştırılması, en reaktif cürufun meydana getirildiği anlamına gelmez. Yapılan incelemeler kararsızlığı arttıran değişik kusurların bağlayıcılığı arttırdığını ortaya koymuştur. Özellikle cüruf tanelerinin yüzeyindeki kusurlar, bağlayıcı madde özelliğinin en yararlı bölgeleridir. Diğer taraftan X ışınları yardımıyla yapılan araştırmalarda, cürufu bir takım mikro-homojensizlik bölgelerinin bulunduğu anlaşılmıştır. Bu bölgelerin boyutlarının küçülmesi bağlayıcılık özelliğini artırır.

Yüksek sıcaklıkta sıvı halde olan cürufun ani şekilde soğutulması, yüksek fırından ince hüzmeler halinde çıkarılan cürufun su dolu geniş havzalara sevk edilmesiyle sağlanır. Cürufa su verilmesi denilen bu işlem sonunda boyutları 1-5 mm arasında olan tanelerden ibaret bir cisim elde edilir. Su verilmesi işlemi mümkün olduğu kadar az su kullanılarak

gerçekleştirilmelidir. Ancak bu şekilde cürufun bağlayıcılık özelliği en iyi duruma getirilmiş olur. Yapılan incelemeler 1 ton cüruf için yaklaşık 1 ton suyun kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir. (Postacıoğlu,1986)

İyi koşullar altında su verilmiş cürufun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için en az çimento inceliğinde öğütülmesi gerekmektedir. Bu işlem farklı şekillerde yapılabilir. Su verilmiş cüruf, klinkere karıştırılıp uygun miktarda alçıtaşı ilavesiyle birlikte öğütülebilir (Postacıoğlu, 1986). Diğer bir yöntem ise su verilmiş cürufun önce öğütülmesi, sonra çimentoya karıştırılmasıdır. Bu sayede cürufun, portland çimentosu klinkerinden daha ince olması ve üretilen çimentonun daha yüksek özelliklere sahip olması sağlanmıştır (Taşdemir vd, 2000).

Cürufun öğütülmesi konusunda önemli bir değişiklik Trief isimli Belçikalı bir mühendis tarafından yapılmıştır. Bu metotta su verilmiş tane halindeki cüruf, kurutulmadan yaş halde iken öğütülmekte ve yine yaş olarak özel silolarda saklanmaktadır. Bu şekilde hazırlanan cüruf beton üretimi sırasında doğrudan betonyeye konularak çimentoya karıştırılmaktadır. Bu yöntemin, kurutma işinin ortadan kaldırılması ve yaş haldeki cürufun daha ince öğütülmesinin sağlanması gibi iki üstünlüğü vardır. İnceliği arttırılmış cüruf ile üretilen çimentonun üstün özelliklere sahip olması sağlanır, bu bakımdan Trief metodunun uygulanması çok iyi sonuçlar vermektedir. Fransa'da İkinci Dünya Savaşından sonra Bort-les-Orgues barajının yapımında bu metot uygulanarak üretilen cüruf, portland çimentosuna %70 oranında karıştırılmış, elde edilen bağlayıcı madde başarıyla kullanılmıştır (Postacıoğlu, 1986).

Sonuç olarak bir yüksek fırın cürufunun bağlayıcı madde olarak kullanılabilmesi için, cürufun kimyasal bileşimi kriterlere uygun olmalı, cürufta yer alan silis ve alümin büyük ölçüde amorf bir yapıya sahip olmalı, başka bir deyişle, kristal yapılı elemanlar %30 dan fazla bulunmamalı, cüruf çimento inceliğinde öğütülebilmelidir.

2.8.3 Cürufun puzolanik aktivitesinin araştırılması

İnceleme konusu cüruf, yukarıdaki koşulları yerine getirirse bile bağlayıcı madde olarak kullanılmadan önce mekanik, kimyasal ve fiziksel bazı ön deneyler yapılmalıdır. Bu deneyler sonuç alma süresi dikkate alınarak aşağıda açıklanmıştır.

Bu konuda geliştirilen yeni bir deneysel yöntem , cüruf taneleri belirli bir süre morötesi ışınların etkisi altında bırakılmaktadır. İşleme son verildikten sonra cüruf taneleri belirli bir "luminesans" ışık dalgası meydana getiriyorsa cürufun bağlayıcılık özelliği iyidir. Bu deney

ile 10 dakika gibi kısa bir süre içinde cürufun bağlayıcılık bakımından durumu hakkında fikir edinilir. Yapılan karşılaştırmalar bu metodun güvenilir olduğunu ortaya koymaktadır (Postacıoğlu, 1986).

Cürufun bağlayıcılık özelliğinin araştırılması ve kısa sürede bilgi edinilmesi mümkündür. Bu amaçla 1lt. suya 200 g. NaOH koymak suretiyle bir sud çözeltisi hazırlanır. Deneyde Blaine özgül alanı $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ ağırlıkça 1 kısım cüruf, 3 kısım standart kum ve cüruf ağırlığının yarısı kadar sud çözeltisi karıştırılarak harç üretilir, $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ boyutundaki kalıplara yerleştirilen harç burada 6 saat tutulur. Bu süre sonunda kalıptan çıkarılan numunelerin bir kısmında derhal basınç deneyi yapılır. Geri kalan numuneler kalıptan çıkarılarak 18 saat 20°C 'deki suda tutuluktan sonra basınç deneyine tabi tutulur. Bağlayıcılık özelliği bakımından iyi durumda olan bir cürufta 6 saatlik basınç mukavemeti 80 kgf/cm^2 ve 24 saatlik mukavemet 125 kgf/cm^2 mertebesinde dir. Bu deneyde kullanılan sud eriyiği kirecin işlevini görmektedir.

Cürufun puzolanik özelliğinin araştırılması için Çizelge 2.1'de 1 dm^3 harç için verilen miktarlarda puzolan, sönmüş kireç, standart kum ve su karıştırılarak elde edilen harç $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$. boyutundaki kalıba belirli koşullarda yerleştirilir. Açık yüzeyleri kapalı olacak şekilde 24 saat laboratuvar ortamında kalıpta tutulan numuneler, kalıp sökülmeden $55 \pm 2^\circ\text{C}$ ' lik bir etüv içinde yüzeyi kapalı olarak 6 gün bekletilir. Bu süre sonunda kalıptan çıkarılan numunelerde TS 24'e göre eğilme deneyi ve kırılan parçalar üzerinde basınç deneyleri yapılır. Eğilme mukavemetinin 10 kgf/cm^2 den, Basınç mukavemetinin 40 kgf/cm^2 den büyük olması halinde maddenin puzolanik özelliğe sahip olduğu kabul edilir.

Çizelge 2.1 Harç üretimi (1 dm^3) için gerekli malzeme miktarları (TS 25)

Malzemeler	Standart Miktarlar
Standart kum	1350 g
Sönmüş kireç	150 g
Puzolan	$2 \times 150 \times (\delta_p / \delta_k)$
Su	$0.50(150 + \text{puzolan})$

Cürufun puzolanik özelliğinin araştırılmasında yararlanılan bir diğer deneyde ise, TS 26 esaslarına göre 20 gr.'lık 3 adet deney numunesi hazırlanır. Bunun için önce içi parafinlenmiş 250 ml' lik erlenler içine 100 ml. destile su konarak 40 ± 2 °C' ye ayarlanmış etüvde bir saat bekletilir. Bir saat sonunda etüvden alınan erlenlerin içine hazırlanan numuneler konularak çimentonun dağılması için çalkalanır. Ağızları kapatılarak 40 °C' ye ayarlanmış etüvde 7 gün bekletilir. Yedi günden sonra numuneler mavi bant süzgeç kağıdından süzülür. Süzüntü oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra, süzüntünün pH değerleri ölçülür ve TS 687' ye göre CaO içeriği belirlenir. Bunun için 0,1 N ayarlı hidroklorik asit ile metil oranj belirteci kullanılarak titre edilen 50 ml numune için harcanan asit miktarından, süzüntünün alkalitesi tayin edilir. Çözünürlük eğrisinin altında kalıp kalmadığına bakılır. Her iki değer de eğrinin altında kalmış ise, deney numunesinin puzolanik özellik gösterdiğine karar verilir.

2.8.4 Cüruf çimentolarının hidratasyonu

Cüruf çimentolarının hidratasyonu çok karmaşık bir olaydır ve henüz tam anlamıyla açıklığa kavuşmuş değildir. Böyle olmakla beraber yapılan araştırmalar olayın şu şekilde gelişme gösterdiğini ortaya koymaktadır. Cüruf çimento su ile karşılaşınca karışımdaki portland çimentosunun hidratasyonu sonucu C-S-H ve Ca(OH)_2 oluşur, (OH) elemanları camsı cürufun içine girerek, zaten kararsız olan, mevcut sistemin elektrostatik dengesini bozar, cürufun ayrışmasına neden olur. Böylelikle serbest kirecin cüruftaki elemanlarla birleşmesine yol açılmış olur. Bu reaksiyonu tüm SO_4^{-2} iyonlarının tükenmesi izler, bu şekilde ettringite kristalleri meydana gelir, bunlar da zamanla monosülfoalüminatlara dönüşür.

Bu açıklamalardan, cüruf çimentolarının hidratasyonu sonunda çok az miktarda serbest kireç meydana gelmekte, hatta bazı özel hallerde hidratasyon sonunda hiç kireç oluşmamaktadır. Bu durum, sertleşmiş cüruf çimentolarında serbest kirecin çok az miktarda bulunması ve kimyasal mukavemetin artması anlamına gelir. Hatta Fransa'da Copla bu konuda daha ileri giderek %80 cüruf içeren çimentoları, hiç bir deneye tabi tutulmadan, deniz suyunun etkisine dayanıklı bir bağlayıcı madde olarak kabul etmektedir. Cüruf çimentolarda cüruf ile karıştırılacak portland çimentosunun trikalsiyum alüminat oranının (C_3A) % 8'den büyük olması, trikalsiyum silikat oranının (C_3S) de % 60-70 arasında bulunması gerekir. Cüruf çimentolarında hidratasyon olayı, SO_4^{-2} iyonlarının tüketilmesi nedeni ile portland çimentosuna göre çok daha yavaş ilerlemektedir.

Cüruf çimentolarında hidratasyon olayının gelişmesi puzolanlı çimentolardan farklı olmakla

birlikte hidrasyon olayında çok büyük benzerlikler vardır, bu nedenle cüruf çimentolarının, puzolanlı çimentoların bütün üstünlüklerine ve sakıncalı durumlarına sahip oldukları söylenebilir. Bu arada cüruf çimentolarının kuru havalarda ve düşük sıcaklıklarda kullanılmasının bazı zararlara yol açabileceği göz önünde tutularak bu gibi hallerde gerekli önlemlerin alınması gerektiği de belirtilmelidir.

2.8.5 Cüruf çimentosunun türleri

Cürufa karıştırılan bağlayıcı maddelerin türü ve miktarı değiştirilerek farklı cinste cüruf çimentoları elde edilmektedir. Bunların en önemlileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

2.8.5.1 Kireç esash cüruf çimentoları

Bu çimentolar ağırlıkça % 70'den fazla cüruf ve % 30'dan az yağlı kireçten oluşmaktadır. Fransa'da üretilen bu bağlayıcı maddenin 7 ve 28 günlük ortalama basınç mukavemetleri sırasıyla 100 kgf/cm² ve 160 kgf/cm² den büyük olmaktadır. Bu bağlayıcı maddenin aynı zamanda kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı da yüksektir, bu nedenle 1900 senelerinde Paris yeraltı trenlerinin (metrosunun) yapımında kullanılmıştır.

2.8.5.2 Yüksek fırın cüruf çimentoları

Türk standartları tarafından da kabul edilmiş olan bu çimentolar, belirli oranda cürufun, portland çimentosu klinkerine karıştırılarak alçıtaşı (CaSO₄ 2H₂O) ile birlikte öğütülmesi sonunda elde edilmektedir. Standart bu çimentoları iki ayrı sınıfa ayırmaktadır. Birincisi demir portland çimentosudur ki (DPC) bunda ağırlıkça % 70-85 arasında portland çimentosu, % 30-35 arasında cüruf bulunur. Diğeri ise cüruf çimentosudur (CÇ) ve % 15-69 oranında portland çimentosu, % 85-31 oranında taneli cüruf içerir. Bu çimentolar kimyasal özellik bakımından, SO₃ miktarının DPC de % 3'den CÇ de % 4'den , kızdırma kaybının her iki çimentoda % 5'den az olması, CÇ de CaO miktarının % 55'in altında kalması koşullarını yerine getirmelidir. Burada şu da belirtilmektedir ki cürufun bulunmasından dolayı çimentoların özgül yoğunluğu 3.1gr/cm³ den belirgin bir şekilde küçük olup 2.8 gr/cm³ mertebesinde değer alır.

2.8.5.3 Sülfatlı cüruf çimentosu

Türk Standartlarınca kabul edilen bu cüruf çimentosu, granüle yüksek fırın cürufü, portland çimentosu klinkeri ve içinde en az % 5 kükürt trioksit (SO₃) bulunmasını sağlayacak miktarda kalsiyum sülfatın katalizör olacak kadar az miktarda karıştırılması ve birlikte öğütülmesiyle

elde edilmektedir. Bu çimentonun başlıca üstünlüğü iyi bir mekanik mukavemete sahip olması ve kimyasal etkilere karşı dayanıklılığın yüksek olmasıdır. TS'na göre sülfatlı cüruf çimentosunun bileşiminde MgO'in % 7 den çok olmaması, çözünmeyen kalıntının % 3 değerini geçmemesi, SO₃ miktarının % 5 den fazla olması, çözülmeyen kalıntı miktarının % 3 den az olması, Al₂O₃ miktarının % 14-20 arasında kalması koşulları aranır.

Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından, priz başlama süresi, 30 dakikadan az ve 10 saatten fazla olmamalı, hacim sabitliği deneyinde Le Chatelier halkasındaki iğnelerin açılması 5 mm. yi geçmemeli, incelik deneyinde, 0,09 mm.lik elek üstünde % 5 den fazla kalıntı olmamalı ve Blaine Özgül alanı 3200 cm²/g' dan büyük olmalıdır. Mukavemeti PÇ 32,5 değerini sağlamalıdır.

2.9 Yüksek Fırın Cürufunun Betona Etkileri

Beton üretiminde yüksek fırın cürufu çimento kullanımı taze beton özelliklerini etkiler. Uygulamada cürufu çimentolarla üretilen betonlarda genellikle PÇ betonuna göre aynı kohezyonu sağlayacak şekilde su içeriğinde bir miktar azalma olur. Cürufu çimentoların priz süresi normal portland çimentolarına göre daha uzundur ve bu süre cüruf oranı ile artar. Bu özellik, büyük kütle betonu dökümünde soğuk derzden kaçınmak için önemlidir (Taşdemir vd, 2000). Cürufun inceliği, hidrasyon ısısında ve basınç dayanımında etkilidir. Yüzey alanı düşük olan cüruf, hidrasyon ısısını düşürmede daha etkilidir. Örneğin yüzey alanı 5180 cm²/g olan cüruf, erken yaşlarda daha etkili dayanım gösterirken, 3880 cm²/g olan daha geç yaşlarda etkili olmaktadır (Togawa ve Nakamoto, 1992). Yüksek fırın cürufu çimentoların hidrasyon ısısının düşük olması bir avantajdır. Bu özellik nedeni ile mukavemet kazanımı çok yavaş olmaktadır. Cürufun, çok ince öğütülmesi ve NaOH, Na₂CO₃ gibi alkali sıvı ortamlarda aktifleştirilmesi ile hidrasyon ısısı yükseltilmeden mukavemet kazanması hızlandırılabilir (Akman, 1992). Dünyanın en uzun süspansiyon köprüsü olan Akashi Kaiyko köprüsünde beton üretiminde kullanılan yüksek fırın cürufu çimentolarda, laboratuarda yapılan deneylerde, betonun çok iyi işlenebilme performansı gösterdiği, taze betonda kohezyonun yüksek olduğu bu betonların da su altında avantajları olduğu gözlenmiştir. Ayrıca su altı beton dökümünden sonraki dayanımın standart kür koşullarında elde edilen dayanımın %90 'ını sağladığı görülmüştür (Kashima vd.,1992).

Cürufu çimento ile üretilen betonun basınç dayanımı, cüruf içeriğinden, kür sıcaklığından ve betonun yaşından bağımsız olarak, cürufun inceliği arttıkça artmaktadır (Honda vd, 1992). Harç ve betonda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi silisli yan ürünlerin,

kullanılması ile bu malzemelerin basınç dayanımı, boşluk yapısı ve geçirimsizlik gibi özelliklerinde iyileşme gözlenmiştir (Bagel,1998). Basınç dayanımının zamanla artmasının nedeni hidrasyon süresinin artması ile betondaki toplam boşluğun düşmesine bağlanmaktadır (Dongxue vd, 1997). Beton basınç dayanımı ve elastiklik modülünün 6 saatten başlayarak 28 güne olanlara kadar araştırıldığı bir çalışmada, basınç dayanımı ile elastiklik modülünün ilişkili olduğu ve birindeki artışın genel olarak diğerindeki artışla sonuçlandığı gösterilmektedir (Francis vd, 1991).

Bazı durumlarda yüksek fırın cürufunun mikrofiller etkisi, puzolanik etkisinden daha belirgin olabilmektedir. Örneğin %50 oranında cürufun, çimentonun yerini alması başka bir deyişle puzolan malzeme olarak kullanılması durumunda, 90. günde basınç dayanımında belirgin bir düşüşe neden olmuştur (Bagel,1998).

Günümüzde, beton üretiminde, agrega-çimento hamuru arayüzünü ve çimento hamurundaki boşlukları doldurmak için ultra incelikte silis dumani, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi puzolanik özellikteki ve mikrofiller malzemelerin süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile birlikte kullanılması, beton teknolojisinde büyük ilerlemelere yol açmıştır. Hem ultra ince mineral malzeme hem de süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların kullanılması s/ç oranının düşmesini sağlamış, ince malzeme boşlukları doldurarak daha yoğun bir malzemenin oluşturulmasına neden olmuştur. Sonuç olarak betonun hem basınç dayanımı hem de dayanıklılığı artmıştır (Taşdemir ve Akyüz,1999).

Yüksek fırın cürufu ile üretilen betonların statik elastiklik modülleri, cüruf içeriği, inceliği ve kür sıcaklığından bağımsız olarak dayanımının karekökü ile doğru orantılı olarak artmaktadır (Nakamoto ve Togawa, 1995). Elastiklik modülü ve gerilme arasındaki ilişkide, karışım oranlarının da önemli bir yer tuttuğu görülmektedir. Çünkü agrega, çimento hamurundan daha yüksek elastiklik modülüne sahiptir. Ayrıca numunenin elastiklik modülü geç yaşlarda, basınç dayanımından daha hızlı artış göstermektedir (Neville, 1992).

Pauw (1960) tarafından tavsiye edilen elastiklik modülünün tahmini, 2.25 bağıntısı, çeşitli araştırmacıların sonuçlarına dayanmaktadır.

$$E_s = 57.000 (f_{cc})^{0.5} \quad (2.25)$$

Deneye tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları 13,79 MPa ile 41,37 Mpa arasında değişmektedir. Bununla beraber Carrasquillo, Nilson ve Slate (1981), ACI eşitliğinin orta ve yüksek dayanımlı betonlara uygulanmasının tatminkar sonuç vermediği kanısındadırlar, orta ve yüksek dayanımlı betonlar için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir .

$$E_s = 40.000 (f_{cc})^{0.5} + 1.0 \times 10^6 \quad (2.26)$$

Shah ve Ahmad, yüksek dayanımlı betonların fiziksel özellikleri doğrultusunda çalışma yapmışlar ve sekant elastiklik modülünün orta ve yüksek dayanımlı betonlar için geleneksel ACI formülü ile uyummadığını belirlemişlerdir. Deneysel sekant elastiklik modül değerleri ile ACI 318 tarafından önceden belirlenen ifadeler kıyaslanmıştır. Bu çalışma göstermiştir ki ACI 318 eşitliği, 34,47 MPa' dan aşağı ve yukarı basınç dayanıma sahip betonlar için sırasıyla düşük ve yüksek elastiklik modülü tahmini yapmaktadır (Francis vd, 1991)



3 DENEYSEL ÇALIŞMA

Bir endüstri atığı olan ve beton teknolojisinde yaygın olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun betonun mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, belirli oranda yüksek fırın cürufunun betona çimento ile yerdeğiştirmeli (R) ve ilaveli (A) olarak katılması durumunda betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde zaman içinde meydana gelecek değişimleri araştırmak amacı ile deneysel çalışma yapılmıştır. Deneyle, numune üretimi, kuru ve kontrol deneyleleri olmak üzere üç aşmada gerçekleştirilmiştir. Cürufun betonun mekanik özelliklerine etkilerinin karşılaştırılması için ayrıca şahit (OŞ) numuneler de üretilmiştir. Yerdeğiştirmeli serilerde betona çimento ağırlığının %30 (3R) ve %60'ı (6R) oranında yüksek fırın cürufu ikame edilmiştir. Yüksek fırın cürufunun filler malzeme olarak kabul edildiği ilaveli serilerde ise çimento miktarı sabit tutularak yerdeğiştirmeli serideki gibi çimento ağırlığının %30 ve %60'ı oranında yüksek fırın cürufu ilave edilmiştir. Bu seride ince agrega miktarı, %30 ilaveli (3A) serilerde %10 oranında, %60 ilaveli (6A) serilerde %20 oranında azaltılmıştır. Beton üretiminde ilaveli seride su/çimento oranı, yerdeğiştirmeli serilerde su/bağlayıcı oranı 0,55 ile sabit tutulmuştur.

Betonun basınç, yarma ve aderans dayanımlarının belirlenmesi ve bu özelliklerde zamanla meydana gelen değişimlerin tespit edilmesi amacı ile 75 adet basınç, 75 adet yarma, 75 adet çekip çıkarma deneyi için toplam 225 adet 100/200 mm boyutlu silindir beton numune üretilmiştir. Üretimden itibaren 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde basınç ve yarma deneylelerinden önce dinamik elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılmak üzere ultrases deneyi yapılmıştır.

3.1 Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen agregalar, çimento, yüksek fırın cürufu ve süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

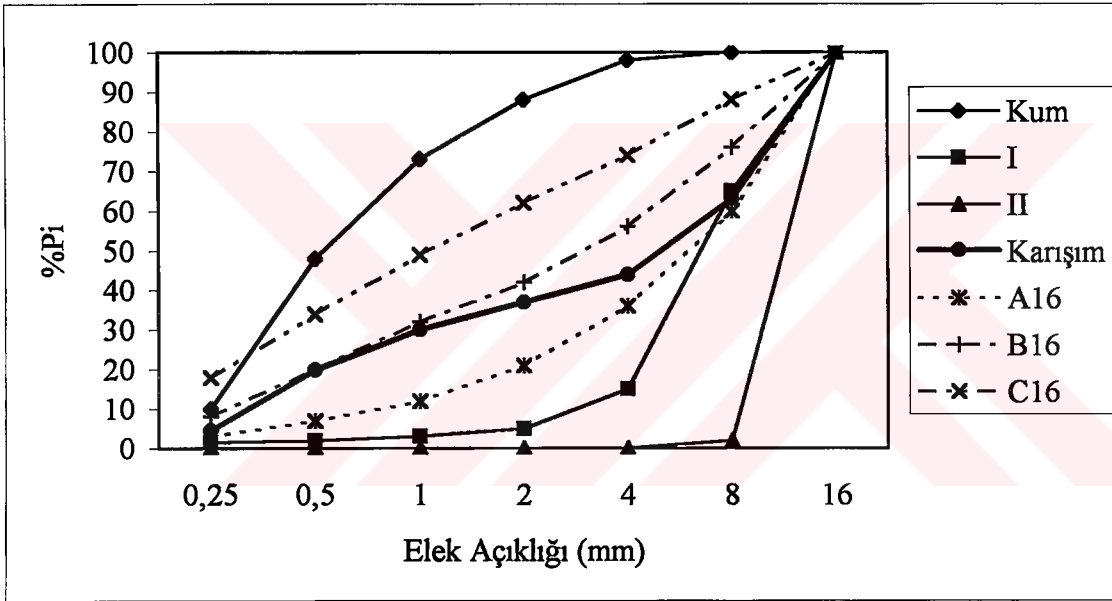
Agregalar

Beton üretiminde, fiziksel özellikleri ve karışım oranları Çizelge 3.1'de verilen Silivri Bölgesinden temin edilen kalker esaslı I ve II no'lu kırmataşlar ile maksimum dane çapı 4 mm olan silis esaslı kum kullanılmıştır. Kullanılan agregaların ve karışım agregasının

granülometri eğrileri ve TS 706'da verilen referans eğrileri Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Agregaların fiziksel özellikleri

	II No'lu Kırmataş	I No'lu Kırmataş	Kum
Birim Ağırlık (kg/dm ³)	1,94	1,79	1,93
Özgül Ağırlık (kg/cm ³)	2,50	2,63	2,50
Doluluk (%)	0,78	0,68	0,77
Karışım Oranı (%)	25	35	40



Şekil 3.1 Agregaların granülometrik eğrileri

Çimento

Beton üretiminde, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de verilen, Akçansa Çimento fabrikasından temin edilen PÇ 42.5 çimentosu kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 Çimentonun ve cürufun kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Özellikler (%)	Portland Çimentosu (PÇ 42,5)		Yüksek Fırın Cürufu
CaO	64,26		35,97
SiO ₂ (Çözülen)	20,71		38,99
Al ₂ O ₃	5,32		11,58
Fe ₂ O ₃	3,33		0,23
MgO	1,17		9,12
SO ₃	2,73		
Cl	0,0253		
Mangan oksit			1,20
Potasyum oksit			0,95
Kükürt			0,72
Titan oksit			0,57
Kızdırma Kaybı	1,42		
Çözülemeyen Kalıntı (max)	0,28		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,11		2,89
Özgül yüzey, Blaine (cm ² /g)	3500		1180
Priz Süresi	Başlangıç	2,10	
Vicat (saat)	Bitiş	3,02	
Minerolojik Bileşimler (%)			
C ₃ S	50,76		
C ₂ S	21,16		
C ₃ A	8,47		
C ₄ AF	10,13		

Çizelge 3.3: Çimento ve cürufun mekanik özellikleri

Ürün	Eğilme Mukavemeti (Mpa)		Basınç Mukavemeti (Mpa)	
	7.gün	28.gün	7.gün	28.gün
Çimento (PÇ 42,5)	7,8	8,63	38,9	48,3
Cüruf	1,05	*	2,5	*

Yüksek Fırın Cürufu

Üretimde kullanılan yüksek fırın cürufu, İskenderun Demir Çelik fabrikalarından temin edilmiştir. Özgül ağırlığı $2,89 \text{ gr/cm}^3$ olan cürufun kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de, mekanik özellikleri ise Çizelge 3.3 de verilmiştir.

Süper Akışkanlaştırıcı

Hazır betonda yerleştirme sorunu dikkate alınarak taze betonun 1 saat sonunda da pompalanabilir nitelikte olması amaçlanmıştır. Bu özelliğin sağlanması amacıyla ile üretimde piyasadan temin edilen süper akışkanlaştırıcı yüksek oranda su azaltıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Sulfone sentetik polimer esaslı bu katkı maddesinin bazı teknik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Katkı maddesinin özellikleri

Tipi	Süperakışkanlaştırıcı, yüksek oranda su azaltıcı ASTM C 494 Tip A ve F
Esası	Sulfone sentetik polimer
Görünüm	Koyu Kahverengi
Katı Madde Oranı	%33
Çözücüsü	Su
Viskozitesi	Düşük
PH	-
Klorür oranı	Yok

Donatı

Aderans dayanımının araştırıldığı çekip-çıkarma deney numunesinin hazırlanmasında, 10 mm çapında doğal sertlikte düz inşaat çeliği kullanılmıştır.

3.2 Numune Üretimi ve Kürü

Betona üretim aşamasında belirli oranda yüksek fırın cürufu katılması durumunda, mekanik

özelliklerde zamanla meydana gelecek değişimlerin araştırılması amacı ile yapılan deneysel çalışmada; numune üretimi esas olarak cüruf katkılı ve katkısız olmak üzere iki ana grupta planlanmıştır. Katkılı grup yerdeğiştirmeli (R) ve ilaveli (A) olmak üzere iki grup, bunlar da katılan cüruf oranına göre seriler oluşturmuştur.

Yerdeğiştirmeli serilerde (R), cüruf puzolan malzeme kabul edilmiş, çimento ağırlığının %30 ve %60'ı oranında yüksek fırın cürufu çimentonun yerine ikame edilmiş, bu seriler, 3R ve 6R olarak adlandırılmıştır. Yüksek fırın cürufunun filler malzeme kabul edildiği ilaveli serilerde (A) ise çimento miktarı sabit tutulmuş, karışıma %30 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu ilave edilmiştir. Bu serilerde ince agrega miktarında, 3A serisinde %10 oranında, 6A serisinde %20 oranında azaltma yapılmıştır.

Beton üretiminde, Çizelge 3.5' da görüldüğü gibi şahitte ve ilaveli serilerde, su/çimento oranı, yerdeğiştirmeli serilerde su/bağlayıcı oranı $w= 0,55$ ile sabit tutulmuştur. Özellikleri yukarıda verilen malzemeler ile üretilen betonda 1 m^3 taze beton için gerekli olan malzeme miktarları Çizelge 3.6'da verilmiştir. Taze betonda, her üretimde, çökme, VeBe süresi ve birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ayrıca taze betonda işlenebilme kaybını araştırmak için üretimden hemen sonra 15., 30., 45., ve 60. dakikalarda olmak üzere beş kez çökme deneyi yapılmış, sonuçları, numune kodlarına göre Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 1 m^3 taze beton için gerekli olan gerçek malzeme miktarları

Seri	Çimento Dozajı (kg)	Curuf (kg)	Su (kg)	Süper Akışkanlaştırıcı (kg)	Kum (Kg)	I Nolu (kg)	II Nolu (kg)
OŞ	378	0	208,4	11,34	735	680	459
3A	368	110,0	203,0	11,04	641	662	447
6A	344	206,4	189,2	10,32	535	615	418
3R	259	111,0	204,3	11,10	719	666	450
6R	155	233,0	213,4	11,64	754	694	471

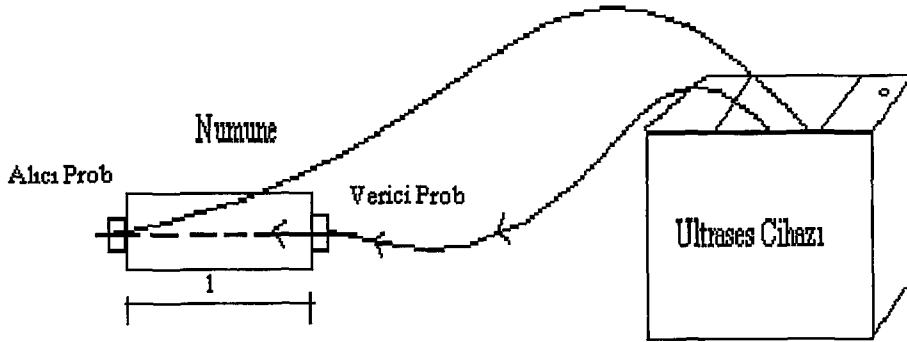
Üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılan tüm numuneler, deney gününe kadar $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun su içinde saklanmıştır. Numuneler deneyden önce kür havuzundan alınmış, yüzeyi nemli bezle kurulandıktan sonra deneye tabii tutulmuştur. Çekip çıkarma deneyi için hazırlanan toplam 75 adet numunenin merkezine üretim aşamasında, 10 mm çapında 200 mm uzunluğunda 1 adet donatı yerleştirilmiştir.

3.3 Kontrol Deneyleri

Çalışmada, deney programına göre 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde toplam 225 adet 100/200 mm boyutlu silindirik beton numunede basınç, yarma ve çekip çıkarma gibi mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Basınç ve yarma deneylerinden önce dinamik elastisite modülünün belirlenmesinde kullanılmak üzere ultrases aleti ile ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Deneyler ve kullanılan aletler aşağıda uygulama sırasına göre açıklanmıştır.

Ultrases geçiş süresinin ölçülmesi

Beton numunelerde, ASTM C 597- BS1881' e uygun modeldeki 0.1 μ s duyarlıklı ultrases aleti ile 200 mm boyundaki numunede t, μ s ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde mala yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile, numunelerin alt ve üst yüzeylerine, vazelin sürülmüş, 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan verici ve alıcı transduserler Şekil 3.2'de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için, bu iki okumanın ortalaması alınarak $V=l/t$ bağıntısından ses geçiş hızı (v, km/s) hesaplanmıştır.

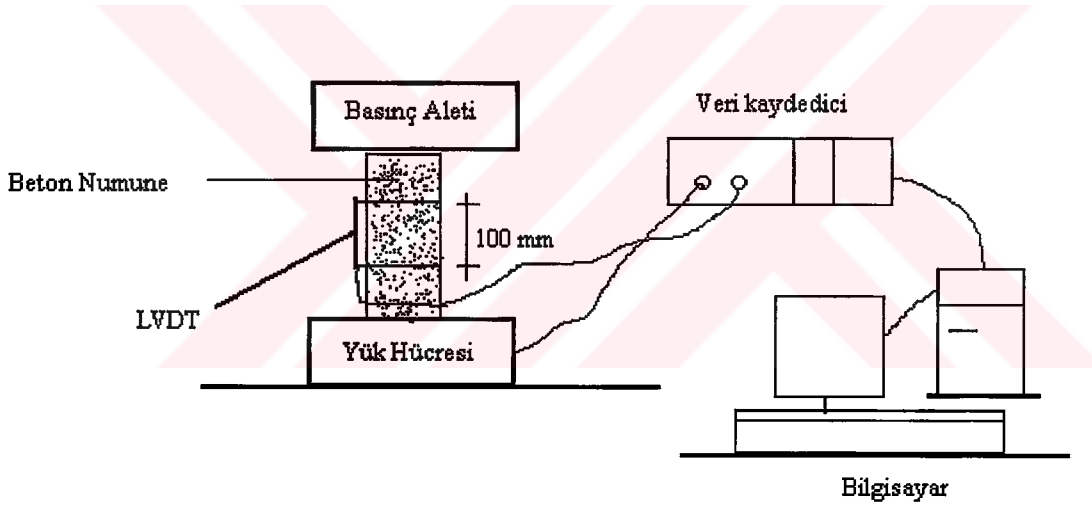


Şekil 3.2 Ultrases deney düzeneği

Basınç Deneyi

Betonun basınç etkisi altındaki şekil değiştirmesini araştırmak ve elastiklik modülünü belirlemek amacı ile Şekil 3.3'te görülen deney düzeneği ile yük (P, kN) ve boy değişimi ($\Delta l, mm$) ölçülmüş ve kaydedilmiştir. 2,4 kN/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilen deneyde yük, 500kN kapasiteli yük hücresi, boy değişimi ise maksimum ölçüm kapasitesi 2,5 mm olan transdüser ile 100 mm lik aralıkta ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Betonun dayanımına göre değişen sayıda olmak üzere bir numunede ortalama 290 okuma yapılmıştır. Kırma yükünün yaklaşık yarısında kayıt durdurulmuş, numune kırma yüküne kadar yüklenmiştir. Bu değerlerden gerilme ($\sigma, N/mm^2$) ve şekil değiştirme ($\epsilon = \Delta l/l, mm/mm$) hesaplanmış, gerilmenin yaklaşık 1/3'lük bölgesi lineer kabul edilerek, eğrinin eğiminden statik elastisite modülü

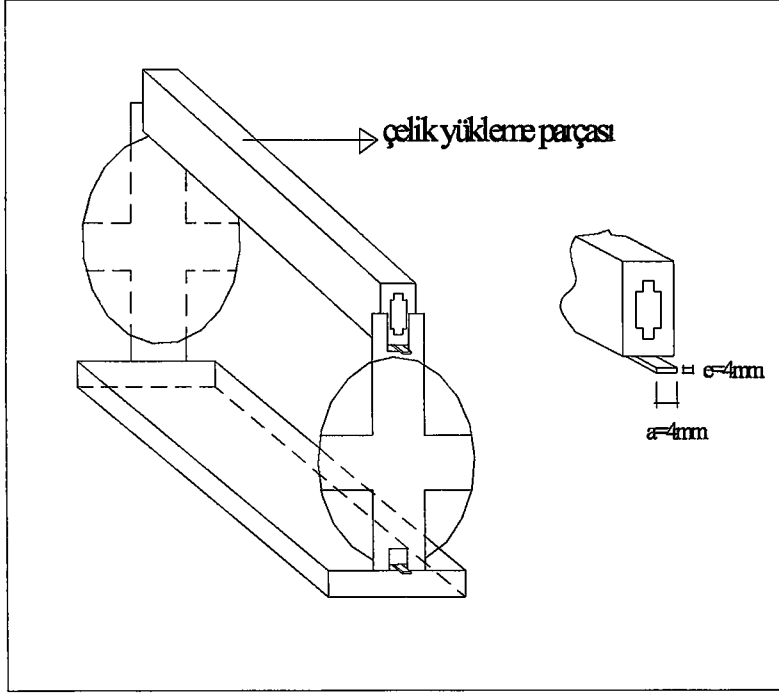
hesaplanmış, ortalama değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Kırma yükünden basınç dayanımı ($f_{cc}, N/mm^2$) belirlenmiş, ortalama değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



Şekil 3.3 Yük hücresi ve transducer kullanılarak yapılan basınç deney düzeneği

Yarma deneyi

Yarma deneyi, 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde Şekil 3.4'te görüldüğü gibi BS 1881: Part 117'ye uygun olarak geliştirilen yarma düzeneği kullanılarak toplam 75 adet 100/200 mm boyutlu silindir numunede 3000 kN kapasiteli üniversal basınç aletinde 0.8 kN/s lik sabit yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Yarma dayanımı (f_{cs}), 3 numunedeki deney sonucunun ortalaması alınarak 3.1 bağıntısı ile hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 3.4 Yarma deneyi düzeneği

$$f_{cs} = \frac{2.P_{cs}}{\pi.l.\phi_c} \quad (3.1)$$

P_{cs} : Maksimum yük (N)

l : Numune boyu (mm)

ϕ_c : Beton numunenin çapı (mm)

Çekip çıkarma deneyi

Donatı-beton arayüzündeki aderans dayanımının belirlenmesi amacı ile, 100/200 mm boyutlarındaki beton silindir numunenin tam ortasına, 10 mm çapında 200 mm uzunluğunda çelik çubuklar yerleştirilerek, toplam 75 adet betonarme numune üretilmiştir. Bu numuneler de deney gününe kadar kirece doymun suda 20 ± 2 °C sabit sıcaklıkta bekletilmiş ve kür havuzundan çıkartıldıktan sonra yüzeyindeki fazla su alınarak deneye tabi tutulmuştur. Deney, 20 kg duyarlıklı, 7 ton kapasiteli universal çekme aletinde, Şekil 3.4'te gösterilen

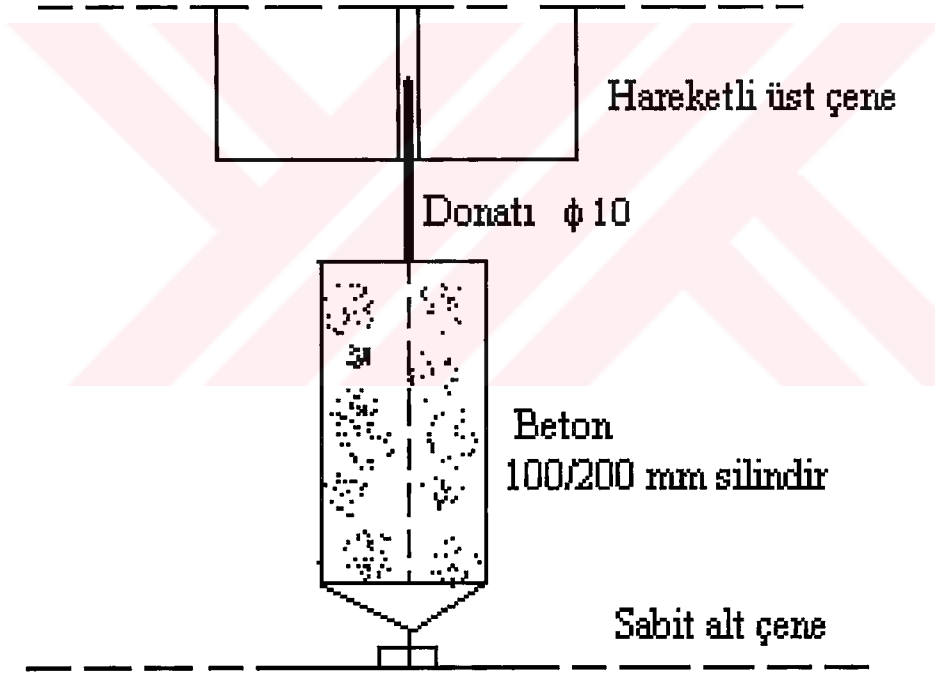
çekip çıkarma deney düzeneği kullanılarak 1.5-3.5 kgf/cm².s hızda gerçekleştirilmiştir. Aderans dayanımı (f_{scb}), bağıntısı ile hesaplanmış, ortalama değeri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

$$f_{scb} = \frac{2.F_{csb}}{\pi.lb.\phi} \quad (3.2)$$

F_{csb} : Maksimum aderans kuvveti (N)

lb: Aderans boyu (200 mm)

ϕ : Donatı çapı (10 mm)



Şekil 3.5 Çekip çıkarma deney düzeneği

4 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ve İRDELENMESİ

Çimento ve beton üretiminde yaygın olarak kullanılan yüksek fırın cürufunun betonun basınç, elastiklik modülü, yarma dayanımı ve aderans dayanımı gibi mekanik özelliklerine etkilerinin araştırılması amacı ile yapılan deneysel çalışmada, cüruf betona üretim aşamasında, çimento ağırlığının %30 ve %60 oranlarında yer değiştirmeli (3R ve 6R) ve ilaveli (3A ve 6A) olmak üzere katılmıştır. İlaveli serilerde ince agregadan, 3A grubunda %10, 6A grubunda %20 oranında azaltma yapılmıştır. Bu serilerde ve cüruf katılmayan, şahit olarak adlandırılan toplam 5 seride üretim sırasında yapılan deneyler ile taze betonun özellikleri 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde yapılan deneyler ile de sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır. Bu özellikler aşağıda sırası ile değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

4.1 Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

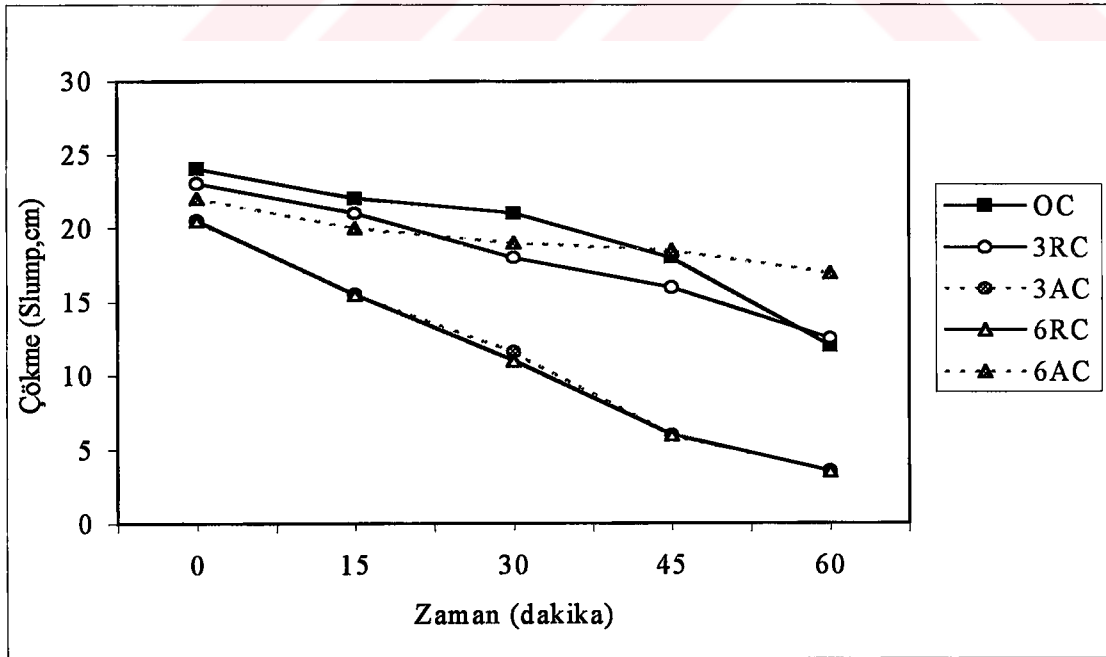
Deneysel çalışmada şahit, %30 cüruf ilaveli 3A, %60 ilaveli 6A, %30 cüruf çimento ile yerdeğiştirmeli (ikameli) 3R ve %60 ikameli 6R olmak üzere 5 farklı seri beton üretilmiştir. Karışım oranları ön deneyler ile belirlenen bu serilerin her üretiminde her serinin birim ağırlık, vebe süresi ve Abrahams Konisi ile çökme deneyi yapılmıştır. Hazır beton endüstrisinde nakliye ve pompalamada ve işlenebilmenin önemi dikkate alınarak çökme deneyi, başlangıçta, 15., 30., 45. ve 60. dakikalarda tekrarlanmış, işlenebilme kaybı araştırılmış, sonuçlar Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Yapılan birim ağırlık deneylerinden 3A ve 6A ilaveli serilerinin birim ağırlığı, şahite göre artış gösterirken, 3R ve 6R ikameli serilerinde azalma gözlenmiştir. İlaveli serilerde görülen bu değişim, cürufun özgül ağırlığının yerini aldığı kumun özgül ağırlığından fazla olması ve taze betonun işlenebilmesinin yüksek olmasına bağlanabilir.

Çizelge 4.1 Taze beton özellikleri

Seri	Ve Be Süresi (sn)	Birim Ağırlık (kg/m^3)	Çökme (cm)					60. Dakikada Çökme Kaybı %
			Ölçümlerin Yapıldığı Süreler (dak)					
			0.	15.	30.	45.	60.	
OŞ	2	2317,2	24	22	21	18	12	50
3A	1	2323,4	20,5	15,5	11,5	6	3,5	82,9
6A	0	2339,7	22	20	19	18,5	17	22,7
3R	0	2288	23	21	18	16	12,5	45,6
6R	0	2283	20,5	15,5	11	6	3,5	82,9

Çizelge 4.1’de verilen deney sonuçlarından şahit ve 3R gruplarının ancak yerleştirilebilir nitelikte olduğu, 6A serisinin ise 60. dakikada dahi pompalanabilir özellikte olduğu görülmüştür. Çizelge 3.6 ve Şekil 4.1’den, betona ince agregadan %27 azaltma yapılmak sureti ile çimento ağırlığının %60’ı oranında katılan cürufun taze betonun işlenebilmesini arttırdığı görülmüştür.



Şekil 4.1 Çökme miktarının zamanla değişimi

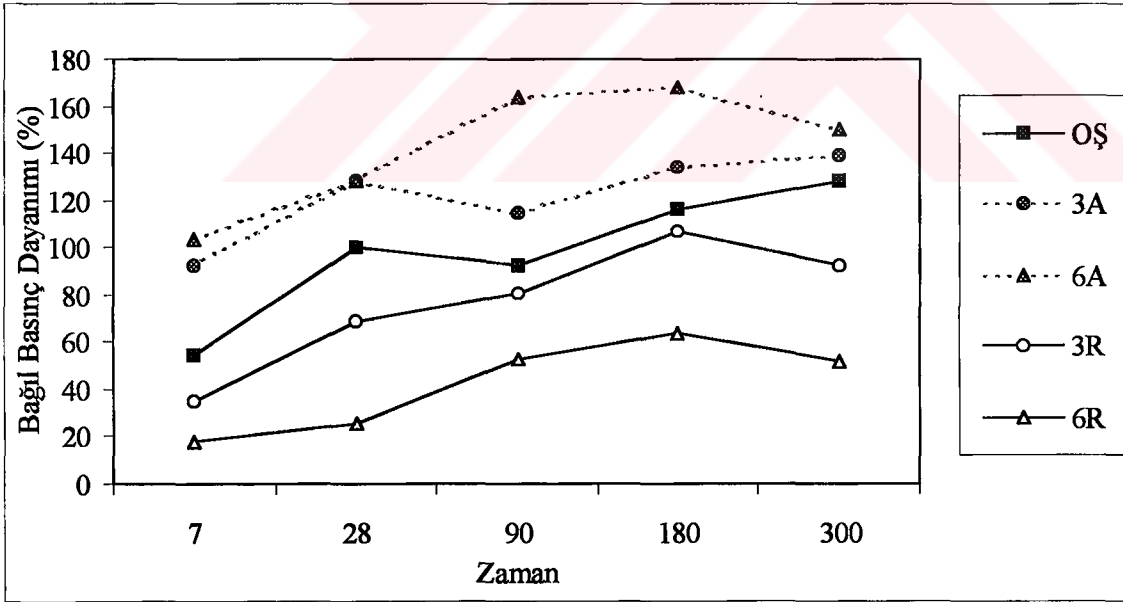
Çökme deneyi sonuçlarına göre 60. dakikada şahitte %50, 3R'de %45,6, 3A ve 6R'de %83'e varan kayıp olduğu, bu iki grupta 30 dakikadan sonra yerleştirmenin mümkün olmadığı, 60. dakikada %23'lük işlenebilirlik kaybına uğrayan 6A grubunda ise betonun halen pompalanabilir nitelikte olduğu görülmektedir.

4.2 Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Sertleşmiş beton numunelerde üretim sonrası 7., 28., 90., 180. ve 300. günlerde yapılan basınç, yarma ve çekip çıkarma deneylerinden alınan sonuçlar ile ilgili değerlendirme ve irdeleme aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Basınç dayanımı

Betonun basınç dayanımı, Çizelge 4.2, Şekil 4.2 ve Ek1'de görüldüğü gibi bütün gruplarda zamanla artış göstermiştir. Şahit grubun basınç dayanımında, 7. günden başlayarak 300. güne kadar 90. gündeki azalma dışında artış görülmektedir ve 300. gündeki basınç dayanımı 28. gündekinden %28,6 daha fazladır.



Şekil 4.2 Bağlı basınç dayanımı-zaman ilişkisi

Cüruf ilaveli 3A ve 6A gruplarının basınç dayanımı başlangıçtan 300. güne kadar şahitten büyük, 3R ve 6R olarak adlandırılan ikameli serilerin basınç dayanımı, şahitin basınç

dayanımından daha küçük değerdedir. İlaveli serilerin (3A ve 6A) basınç dayanımı, şahit grubun 28. gündeki dayanımına 7. günde ulaşırken ikameli serilerin (3R ve 6R) 300. gün sonunda dahi bu değere ulaşamamıştır. Örneğin 3R grubunun 180. gündeki basınç dayanımı, şahitinkine yaklaşmış olmasına rağmen aynı yaştaki şahit ve ilaveli serilerle kıyaslandığında yine de düşük kalmaktadır. 6R serisinin basınç dayanımı başlangıçtan itibaren en düşük değerdedir. Şahit ve 3A grupları hariç, 28. günden 90. güne geçerken basınç dayanımları kendi içlerinde artış göstermiş, artış daha sonraki günlerde de devam etmiştir. 3R, 6R ve 6A gruplarının basınç dayanımında 180. günden başlayarak 300. günde bir miktar düşüş olmuştur. Bu değer, 6A grubunda yaklaşık %10, 3R'de %13, 6R'de %19 oranındadır.

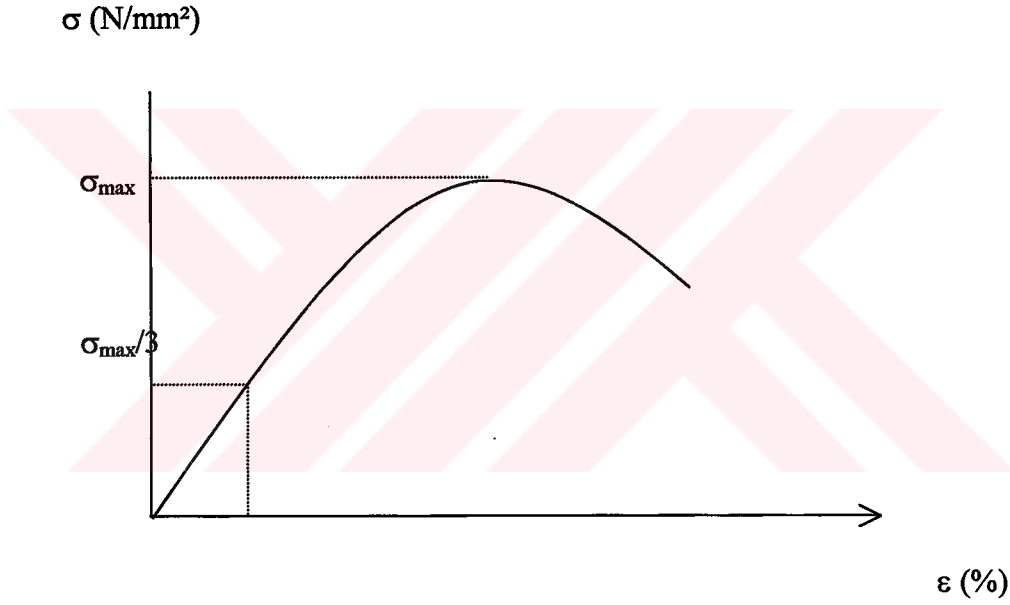
Çizelge 4.2 Ortalama basınç dayanımları

Seri \ Gün	Basınç Dayanımı (f_{cc} , N/mm ²)				
	7	28	90	180	300
OŞ	15,1	28,0	26,0	32,5	36,0
3A	26,0	36,0	32,0	37,6	39,0
6A	29,0	36,0	46,0	47,0	42,0
3R	9,8	19,3	22,7	30,0	26,0
6R	4,9	7,2	14,8	17,9	14,4

7. günden başlayarak 300. gün dahil en yüksek dayanımlar 6A grubunda elde edilmiştir. Bu grubun 7. ve 28. gündeki basınç dayanımları Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi sırasıyla 29 N/mm² ve 36 N/mm² 'dir ve şahitinkinden 7. günde %92, 28. günde %28 daha fazladır, bu grubun basınç dayanımı, 180. günde 47 N/mm² değerine ulaşmıştır. Şahitin aynı yaştaki basınç dayanımı ise 32,5 N/mm² dir ve 6A grubundan yaklaşık %45 daha azdır. Çimento hamurundaki toplam porozite, hidrasyon süresindeki artışla azalmakta ve basınç dayanımı zamanla artmaktadır (Dongxue vd., 1997). Sadece 28. gün değerlendirilmiş olsa bile Çizelge 3.6'daki gerçek malzeme miktarlarının hesabına bakıldığında, 6A grubunda çimentodan yaklaşık %10, kumda yaklaşık %27 lik azaltma yapılmış olmasına rağmen dayanımda %28,6 oranında artış olmuştur. Bu artış, 1 m³ betona katılan 206 kg lık cüruf ile sağlanmaktadır. Bir başka deyişle, ince malzeme yerine kullanılan cüruf sayesinde, dayanımda artış, maliyette ekonomi sağlanmıştır.

4.2.2 Elastisite modülü

Karışım oranları farklı 5 serinin elastiklik elastisite, deney sonuçlarından yararlanılarak hesaplanmış, sonuçlar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Statik elastisite modülü E_s ’nin belirlenmesi için 5 grupta basınç etkisi altında ölçülen yük ve boy değişimlerinden şekilde verildiği gibi gerilme-şekil değiştirme ilişkisi belirlenmiştir. Maksimum gerilmenin yaklaşık 0,33’lük bölgesi linear kabul edilmiş, bu bölgede minimum kareler yöntemi ile 4.1 bağıntısından yararlanılmıştır. Statik elastisite modülü E_s , ayrıca teorik olarak TS 500’de verilen 4.2 bağıntısından yararlanılarak da hesaplanmış, ortalama değerleri çizelgede verilmiştir.



Şekil 4.3 Gerilme-şekil değiştirmenin şematik gösterimi

$$E_s = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (4.1)$$

$$E_s = 14000 + 3250\sqrt{f_{cc}} \quad (4.2)$$

Dinamik elastisite modülü (E_d , kN/mm²), deney ile belirlenen ultrases geçiş hızından yararlanılarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmış, ortalama değeri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Bu bağıntıda V , km/sn olarak ses geçiş hızını, β , kg/dm³ olarak betonun birim ağırlığını, g , m/sn² olarak yerçekimi ivmesini ifade etmektedir.

$$E_d = \frac{10}{g} x v^2 x \beta \quad (4.3)$$

Her üç şekilde hesaplanan elastisite modülü değerleri bütün serilerde zamanla artış göstermektedir. Statik elastisite modülündeki artış, 3A ve 6A gruplarında kararlı iken, ikameli serilerden 3R grubunda 300. günde, 6R grubunda ise 90. günden 180. güne geçerken bir azalma görülmektedir. Statik elastisite modülünün en düşük değeri, ikameli serilerde 6R grubunun 7. gününde görülürken, en yüksek değer, 3A grubunun 300. gününde görülmüştür.

Çizelge 4.3 σ - ϵ Deney sonuçlarından belirlenen statik elastisite modülleri

Seri	Statik Elastiklik Modülü (E_s , kN/mm ²)				
	7	28	90	180	300
OŞ	25,6	28,5	28,1	37,6	38,1
3A	22,4	23,9	32,3	35,1	38,4
6A	23,0	27,5	31,3	35,5	36,1
3R	17,3	19,0	22,7	29,1	23,1
6R	14,6	20,8	23,4	16,4	25,8

Çizelge 4.4 TS 500'e göre basınç dayanımından hesaplanan statik elastisite modülleri

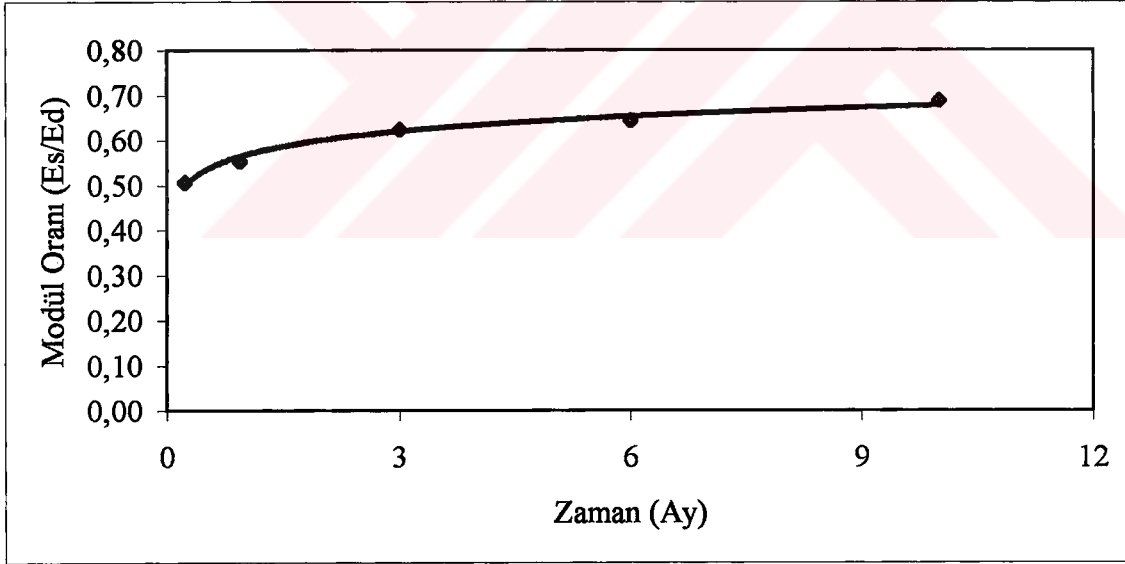
Seri / Gün	Statik Elastiklik Modülü (E_s , kN/mm ²)				
	7	28	90	180	300
OŞ	26,6	31,2	30,6	32,5	33,5
3A	30,6	33,5	32,4	33,9	34,3
6A	31,5	33,5	36,0	36,3	35,0
3R	24,2	28,3	29,5	31,8	30,6
6R	21,2	22,7	26,5	27,8	26,3

Çizelge 4.5 Dinamik elastisite modülleri

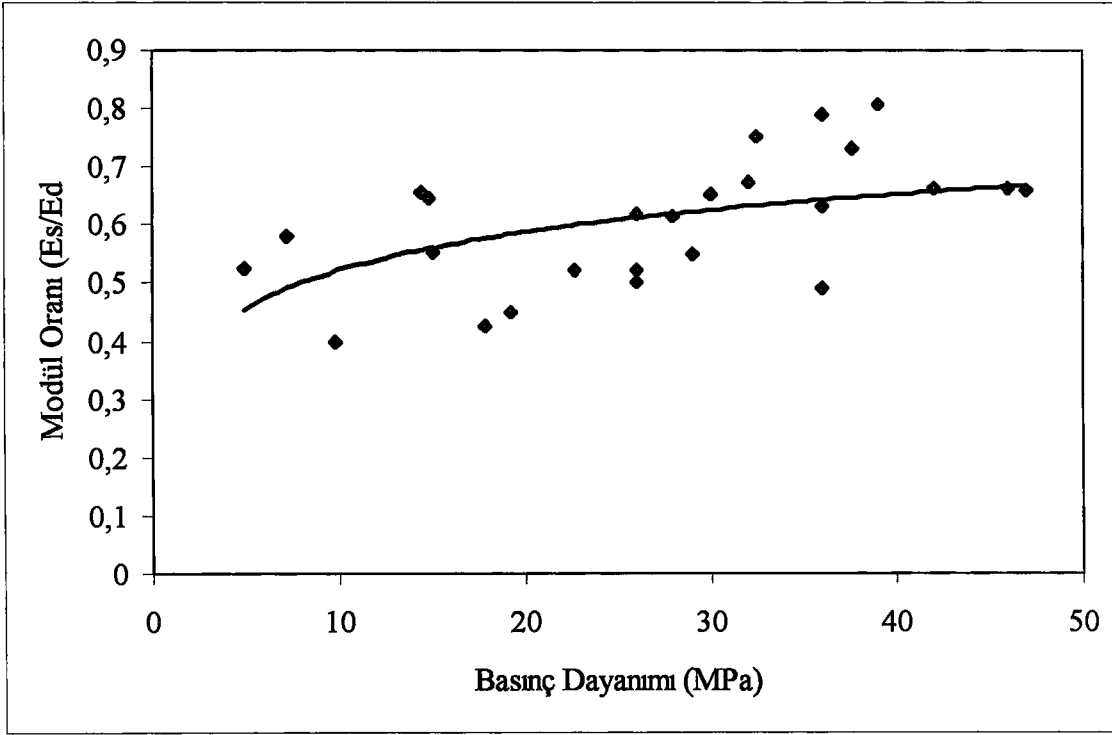
Seri / Gün	Dinamik Elastiklik Modülü (E_d , kN/mm ²)				
	7	28	90	180	300
OŞ	46,3	46,3	45,4	49,9	48,2
3A	44,6	48,8	47,9	48,1	47,6
6A	42,0	43,6	47,3	53,9	54,4
3R	43,3	42,3	43,5	44,7	44,3
6R	27,7	35,8	36,2	38,5	39,3

Beton kompozit bir malzeme olduğundan tek bir elastisite modülünün belirlenmesi mümkün değildir. O nedenle, statik elastiklik modülü, dinamik elastiklik modülü gibi modüller tanımlanır. Dinamik elastisite modülü sünmeden bağımsız olduğu için, yaklaşık başlangıç teğetine yani tanjant modülüne eşittir ve bu nedenle deneyden elde edilen sekant (statik) elastiklik modülünden daha yüksektir (Neville, 1987). Sekant modülünü belirlemek için standart bir metot yoktur ancak bazı laboratuvarlarda 3-14 Mpa arasındaki gerilmelerde, bazılarında ise en büyük dayanımın %15-25-33 ve 50'sine karşılık gelen gerilmelerde ölçülmektedir. Çünkü sekant modülü, gerilmedeki artışla azalmaktadır. Modülün belirlendiği dayanım her zaman belirtilmelidir. Sekant modülü, deneysel gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden belirlendiği için statik modül olarak adlandırılır (Neville,1987). Bu çalışmadan alınan sonuçlar da bu görüşü doğrulamaktadır. Aynı serilerde belirlenen ve Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5'de verilen elastisite modülleri birbirinden farklıdır. Bunların karşılaştırılması için statik

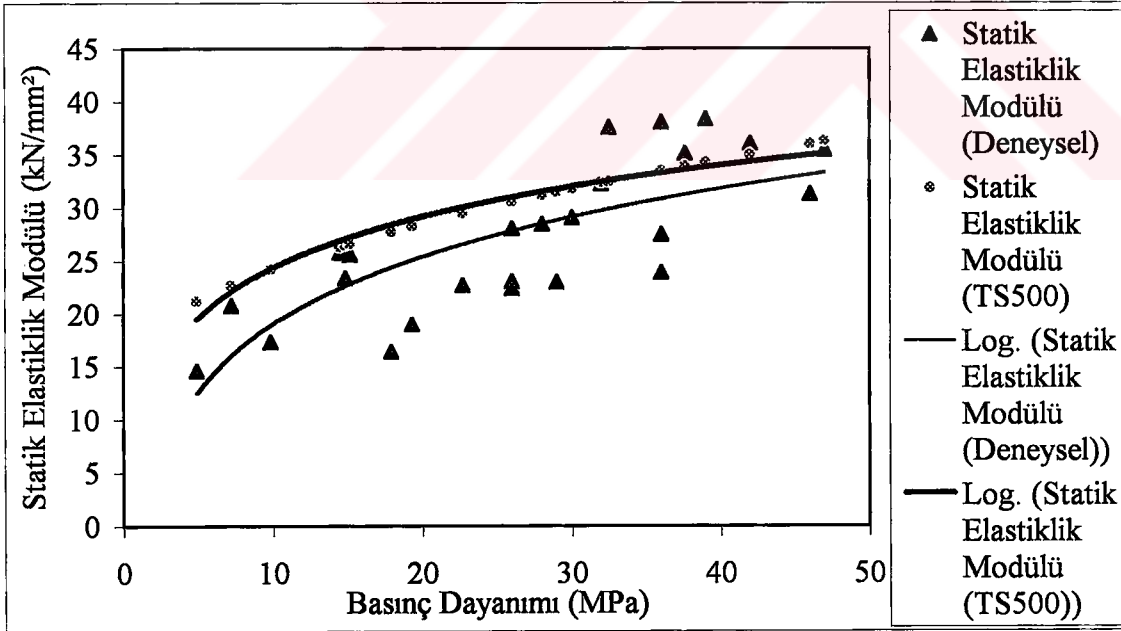
modülün dinamik elastisite modülüne oranının (E_s/E_d), zamanla ve basınç dayanımı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 4.4'e bakıldığında E_s/E_d oranının başlangıçta yaklaşık 0,50 olduğu, 10 ayda (300. gün) 0,70 'e ulaştığı, değişimin birinci ayda hızlı, daha sonra yavaş olduğu görülmektedir. Neville'in, Philleo'dan (1955) aldığı çalışmada, modül oranı 0,3 ile 0,8 arasında olan ve 12. aya kadar değişimi incelenen çalışmada da benzer durum görülmektedir. Betonun basınç dayanımı ile elastisite modülü birbiri ile ilişkilidir, birindeki artış, diğerine de aynı yönde yansımaktadır (Francis vd, 1991). Bu çalışmadaki deney sonuçlarından, modül oranlarının basınç dayanımı ile değişiminin incelendiği Şekil 4.5' de de benzer davranış görülmektedir. Basınç dayanımı arttıkça modül oranı artmakta ancak eğrinin eğimi azalmaktadır. Şekil 4.6'da, statik elastisite modülünün, basınç dayanımı ile değişimi görülmekte, statik elastisite modülü, basınç dayanımı ile artmaktadır. Basınç etkisindeki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden belirlenen statik elastisite modülü ile, basınç dayanımından (TS500) teorik olarak hesaplanan statik elastisite modülünün basınç dayanımına bağlı değişimi benzer karakterdedir ancak teorik modüller daha büyük değerdedir.



Şekil 4.4 Modül oranı-zaman ilişkisi



Şekil 4.5 Modül oranı-basınç dayanımı ilişkisi



Şekil 4.6 Statik elastisite modülleri ve basınç dayanımı ilişkisi

4.2.3 Yarma dayanımı

Yarma dayanımı (f_{cs} , N/mm²), silindir numunelerde 7., 28., 90., 180., ve 300. günlerde yapılan yarma deneyi sonucunda 3.1 bağıntısından hesaplanmış, ortalama değerler Çizelge 4.7'de verilmiştir. Bağıntıda kırma kuvveti P_k , kN, numune çapı D , mm, numunenin boyu L , mm'dir.

Yarma dayanımları bütün serilerde zamanla artış göstermektedir. Şekil 4.6'de görüldüğü gibi Şahit gruba kıyasla ilaveli serilerin yarma dayanımları yüksek, ikameli serilerinki ise düşüktür. İlaveli serilerden 3A grubunda hemen hemen lineer bir artış görülürken, 6A grubundaki artış kararlı değildir. Şahit grubun 28. gününe kıyasla 3A grubunun 300. gündeki artışı %45,6 iken bu oran 6A grubunda %28 değerinde kalmıştır. Ayrıca 3A grubunun 7. gündeki yarma dayanımı, yaklaşık şahit grubun 28. gündeki dayanımına eşittir. İkameli serilerden 3R grubunun yarma dayanımı 300. gün sonunda ancak şahit grubun 28. gündeki yarma dayanımına ulaşabilmiştir. 6R grubunun dayanımı ise 300. günde bile bu değer altında kalmıştır.

Çizelge 4.6 Ortalama yarma dayanımları

Seri	Yarma Dayanımı (f_{cs} , N/mm ²)					
	Gün	7	28	90	180	300
OŞ		1,6	2,5	2,3	2,7	3,0
3A		2,4	2,7	2,8	3,3	3,6
6A		2,1	2,5	2,7	2,5	3,2
3R		1,3	2,1	1,9	1,9	2,4
6R		0,6	0,9	1,3	1,6	1,5

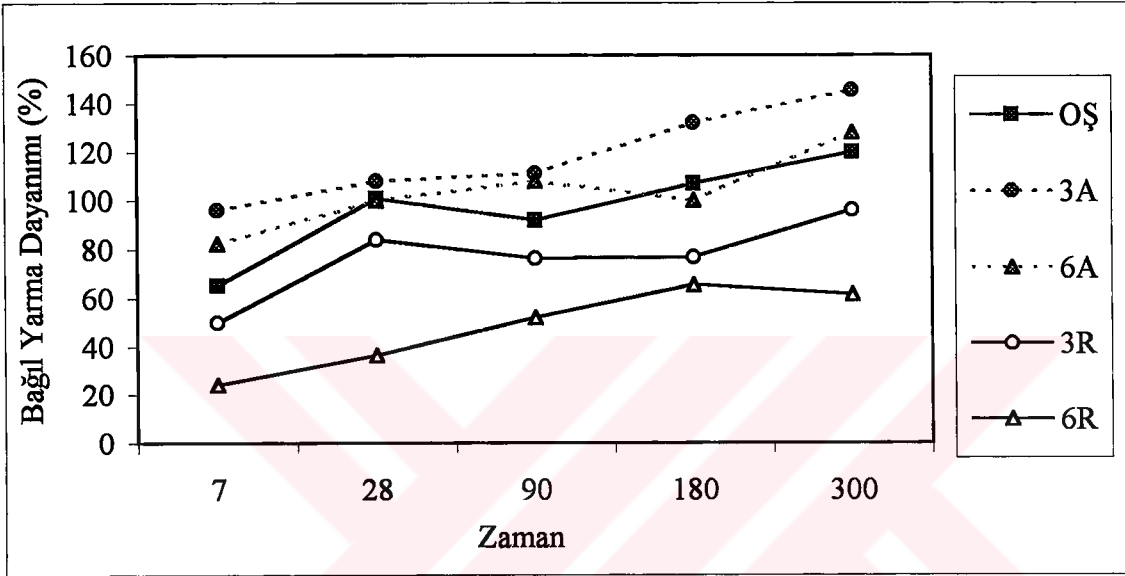
Yarma dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin araştırıldığı, Şekil 4.8'de yarma dayanımının basınç dayanımına bağlı olarak arttığı, yapılan istatistiksel araştırmada basınç dayanımı ile yarma dayanımı arasında (4.4) bağıntısında verilen ilişki bulunduğu, bunun da (4.5) Yerlici ve Ersoy (1995) ve (4.6) Arıoğlu (1996) bağıntılarında verilen değerlere yaklaştığı görülmüştür. Xincheng ve arkadaşları (1995) tarafından yapılan deneysel çalışmada basınç dayanımı 25,6 ve 120,5 Mpa arasında olan betonlarda, basınç dayanımı arttıkça yarma dayanımı da yavaşça artmaktadır. Çekme dayanımının basınç dayanımına oranı azalmakta ve

bu da cürüflü betonların daha gevrek malzeme olduğunu göstermektedir. Dayanım arttıkça, gevreklik de o kadar büyük olmaktadır.

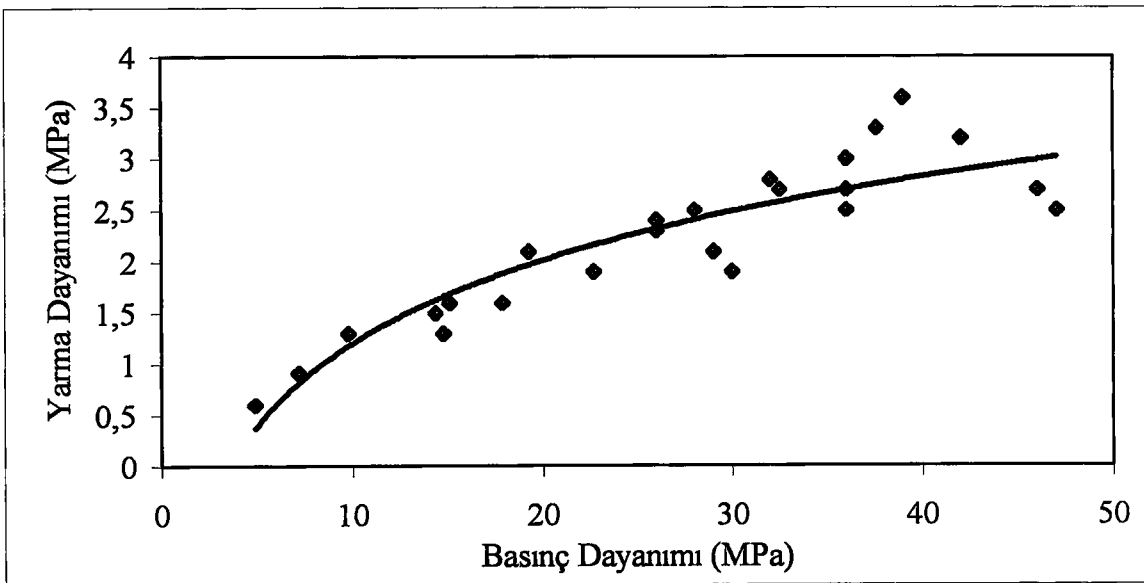
$$f_{cs} = 0,234 f_{cc}^{0,6874} \quad (4.4)$$

$$f_{cs} = 0,36 f_{cc}^{0,62} \quad (4.5)$$

$$f_{cs} = 0,321 f_{cc}^{0,661} \quad (4.6)$$



Şekil 4.7 Bağlı yarma dayanımı-zaman ilişkisi



Şekil 4.8 Yarma dayanımı-basınç dayanımı ilişkisi

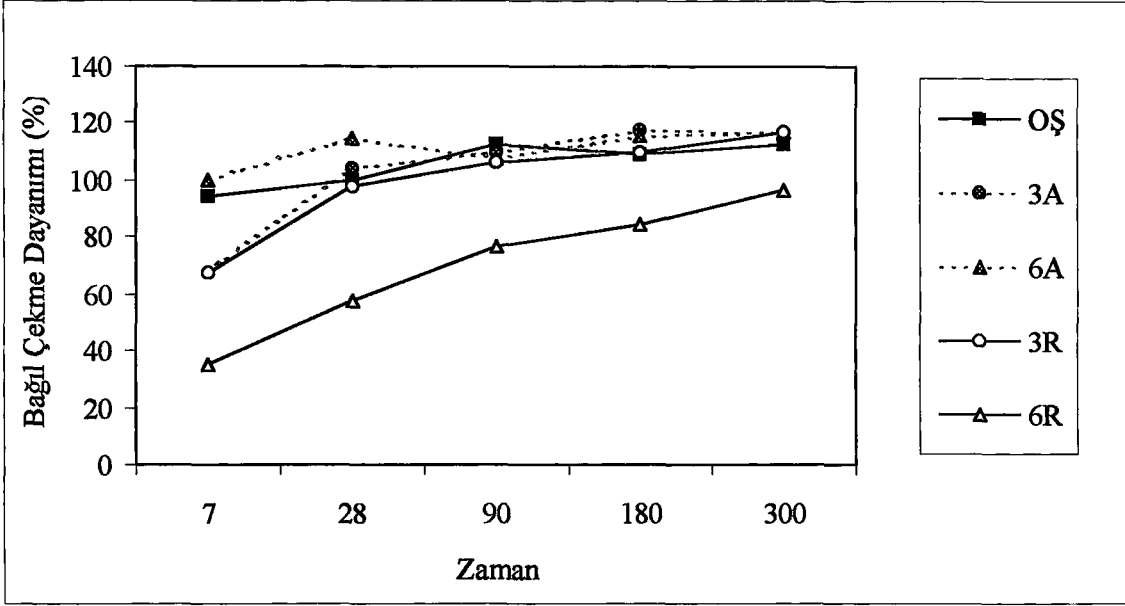
4.2.4 Çekip çıkarma dayanımı

Silindir numunenin merkezine yerleştirilen $\phi 10$ 'luk donatının aderansını belirlemek için yapılan çekip-çıkarma (pull-out) deneylerinden elde edilen dayanımları Çizelge 4.7'de ve Şekil 4.9'da görüldüğü gibi zamanla artmıştır. Şahit grubun 28. günde ulaştığı aderans dayanımına 6A grubu 7. günde ulaşmış ve 90. gün hariç artış eğilimini sürdürmüştür. Şahit ve 3R grubu hariç, diğer grupların aderansı 28. günden itibaren yaklaşık aynı değerlerdedir ve zamana bağlı değişimleri benzerdir. Şahit grubun aderansında önemli değişim olmamış, 300. gündeki artış %17'dir. 3R grubunun aderans dayanımı ise diğer gruplardan düşük olmasına rağmen 7. günden başlayarak zamanla lineer artış göstermiş, bu artış 300. günde 8,7 Mpa ile 7. güne göre 2,7 kat fazla olmuştur. 300. gün sonunda 6R ve şahit gruplar hariç bütün seriler %17 lik bir artış göstermişlerdir. Yüksek fırın cürufu, her iki seride de aderansı arttırmıştır.

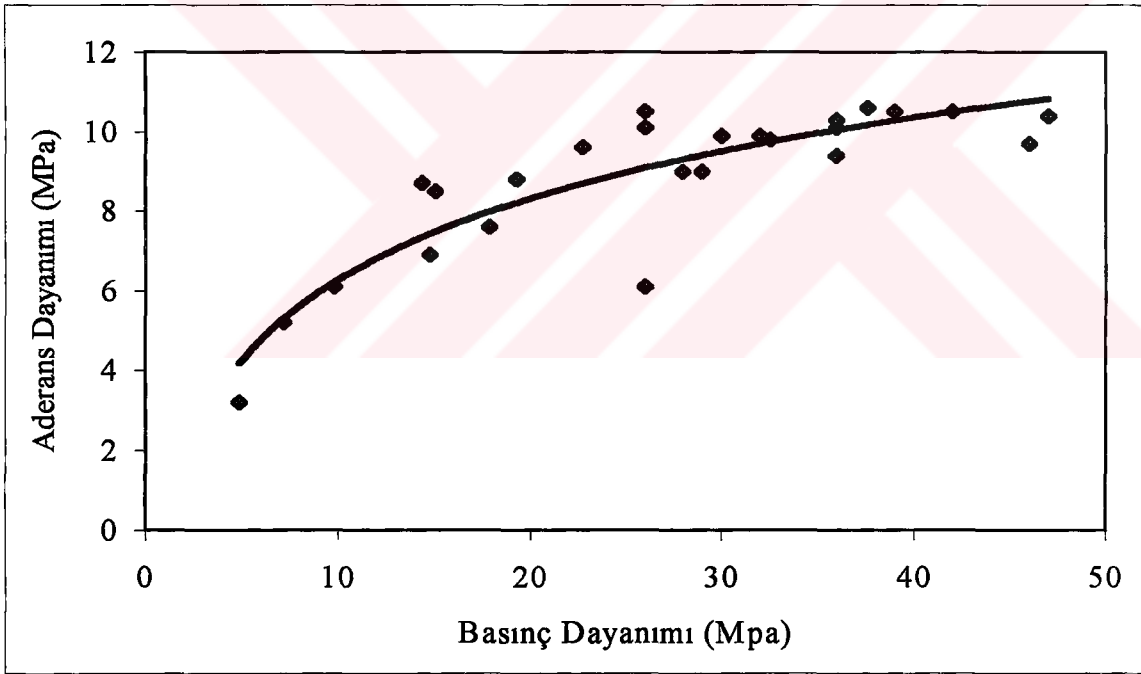
Çizelge 4.7 Çekip çıkarma deneyi sonuçları

Seri / Gün	Çekip Çıkarma Dayanımı (fcsb, N/mm ²)				
	7	28	90	180	300
OŞ	8,5	9,0	10,1	9,8	10,1
3A	6,1	9,4	9,9	10,6	10,5
6A	9,0	10,3	9,7	10,4	10,5
3R	6,1	8,8	9,6	9,9	10,5
6R	3,2	5,2	6,9	7,6	8,7

Serilerden bağımsız olarak aderans dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin arasında yapılan incelemede Şekil 4.10'da da görüldüğü gibi aderans dayanımı da diğer özelliklerde olduğu gibi basınç dayanımı ile artmaktadır. Bu artış, düşük dayanımlarda daha fazla, yüksek dayanımlarda daha azdır ve yarma ile basınç arasındaki ilişkiye benzerdir.



Şekil 4.9 Bağlı çekme dayanımı-zaman ilişkisi



Şekil 4.10 Aderans dayanımı-basınç dayanımı ilişkisi

5 SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Betona üretim aşamasında çimento ağırlığının %0 (şahit), %30 (3A, 3R) ve %60 (6A, 6R) oranında yüksek fırın cürufunun ilaveli (3A, 6A) ve ikameli (3R, 6R) olarak katılması durumunda betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin araştırıldığı bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. Şahit, ilaveli ve ikameli olmak üzere gruplandırılan 5 seri basınç dayanımı bakımından karşılaştırıldığında;
 - Basınç dayanımı, tüm serilerde ilk günlerde daha hızlı olmak üzere zamanla artış göstermiştir.
 - Cürufun çimento ile ikame edildiği serilerde basınç dayanımı, şahitten az, ilave edildiği serilerde şahitten yüksek değerler vermiştir.
 - Basınç dayanımı ikameli serilerde cüruf oranı ile azalmış, ilaveli serilerde cüruf oranı ile artmıştır. Beton üretiminde kullanılan cürufun puzolan özelliğinden çok mikrofiller özelliği etkili olmuş, ince agregadan yapılan azaltma ve dayanımda sağlanan artış nedeni ile ekonomi sağlanmıştır.
2. Bu seriler, deney sonuçlarından ve teorik olarak belirlenen statik ve dinamik elastisite modülleri bakımından karşılaştırıldığında,
 - Elastisite modülü, basınç dayanımına benzer şekilde zamanla artış göstermiştir.
 - Cürufun çimentoya ikame edildiği serilerin elastisite modülü şahitten az, ilaveli serilerdeki ise şahite yakın değerler vermiştir.
 - Serilerden bağımsız olarak değerlendirilmek üzere deneylerden elde edilen statik elastisite modülünün, dinamik elastisite modülüne oranı (E_s/E_d), ilk günlerde hızlı olmak üzere zamanla artış göstermiştir.
 - Statik elastisite modülünün, dinamik elastisite modülüne oranı basınç dayanımı ile artmaktadır. Bu orandaki artış, dayanım arttıkça azalmaktadır.
 - Statik elastisite modülünün gerilme-şekil değiştirme ilişkisinden belirlenen değeri,

basınç dayanımından hesaplanan teorik değerinden düşüktür, basınç dayanımı arttıkça aradaki fark azalmaktadır.

3. Yarma dayanımı tüm gruplarda basınç dayanımına benzer şekilde zamanla artmış, ilaveli serilerinki şahitten yüksek, ikameli serilerinki ise daha düşük değer vermiştir. Yarma dayanımı serilerden bağımsız olarak basınç dayanımı ile artmıştır. Artış oranı, düşük dayanımlarda daha yüksektir.
4. Aderans dayanımı, basınç dayanımı ile artmaktadır. Bu artış, düşük dayanımlarda daha fazla, yüksek dayanımlarda daha azdır. Aderans dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, yarma ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiye benzerdir. Ancak aderans dayanımında cürufun etkisi belirgin değildir.
5. Beton üretiminde, ince agregadan ağırlığının %20'si oranında azaltma yapılarak çimento ağırlığının %60'ı oranında cüruf katılması ile üretilen 6A ilaveli serisinde taze beton üretiminden 1 saat sonra pompalanabilir beton özelliğini korumuştur. Bu özellik işlenebilme kaybının önemli problem olduğu hazır beton teknolojisi için önemli bir kazanımdır.
6. Betonda mikrofiller özelliği gösteren bu cürufun inceliği artırılarak puzolan özelliği arttırılabilir.

KAYNAKLAR

- Akman, S., (1992), Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- Akman, S., (1990), Yapı Malzemeleri, İTÜ Matbaası, İstanbul.
- Arioğlu, E., (1996), "Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki", Teknik Dergi, 7 (1) pp 1153-1157.
- ASTM C-597-71, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.
- Bagel, L., (1998), "Strength and Pore Structure of Ternary Blended Cement Mortars Containing Blast Furnace Slag and Silica Fume" Cement and Concrete Research, 28 (7) pp 1011-1020.
- Blanks, R. F., Kennedy, H. L., (1955), " The Technology of Cement and Concrete" Vol. 1. USA.
- Bonen, D., (1993), "A Microstructural Study of the Effect Produced by Magnesium Sulfate on plain and Silica Fume Bearing Portland Cement Mortars", Cement and Concrete Research, 23 (3) pp 541-553.
- Biricik, H., (1995), Buğday Sapı Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs, İstanbul.
- Carrasquillo, R. L. , Nilson, A.H. ve Slate, F. O., "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short Term Loads" ACI Journal, Proceedings V.78, No.3 May-June 1981, pp. 171-178.
- Dongxue, L., Xinhua, F., Xuequan, W., Minhshu, T., (1997) "Durability Study of Steel Slag Cement", Cement and Concrete Research, 27 (7) pp 983-987.
- Ersoy, U., (1987), Betonarme, Cilt 1., Evrim Basım Yayım Dağıtım.
- Francis, A. O., Burdette, G., Deatherage, J. H., (1991), "Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Relations at Early Ages" Technical Paper, ACI Materials Journal, January-February 1991
- Iravani, S., (1996), "Mechanical Properties of High Strength of High-Performance Concrete", ACI Material Journal, 93(5) pp: 416-426.
- Karakoç, C., (1985), Aderansta Mekanik Etkileşim Olayı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- Mehta, P. K. Ve Gjorv, O. D., (1982), "Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica Fume", Cement oncrete Research, 12 pp 587-585.
- Mazlum, F., (1989), Prinç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Aralık, İstanbul.
- Nakamoto, J., Togawa, K., (1995), " A Study of Strength Development and Carbonation of Concrete Incorporating High Volume BFS", V. CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Milwaukee, USA, SP 153-59,121.

Neville, A. M., (1990), Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York.

Postacıoğlu, B.,(1986), Beton, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Postacıoğlu, B.,(1987), Beton, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.

Pauw, A., “ Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density,” ACI Journal, proceedings V.57, No. 6, 1960, pp. 679-687.

Ürünler Katalođu, (1998), İskenderun Demir-Çelik Fabrikaları Yayınları.

Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Özbek, E., Altay, B., (2000) “ ÖYFC İnceliğinin Beton Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi”, Çimento ve Beton Dünyası, Yıl 4, Sayı 24, TÇMB Yayın Organı, 19.

Taşdemir, M.A., Taşdemir, C., Özbek, E., Altay, B., (2000) “ ÖYFC İnceliğinin Beton Özelliklerine ve Mikroyapısına Etkisi”, Çimento ve Beton Dünyası, Yıl 4, Sayı 24, TÇMB Yayın Organı, 21.

Taşdemir, M.A., Akyüz, ., (1999) “ Betonun Durabilitesi Üzerine Genel Bir Değerlendirme” THBB Dergisi, Yıl 6, Sayı 32, 37.

TS 500, (1985), Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları.

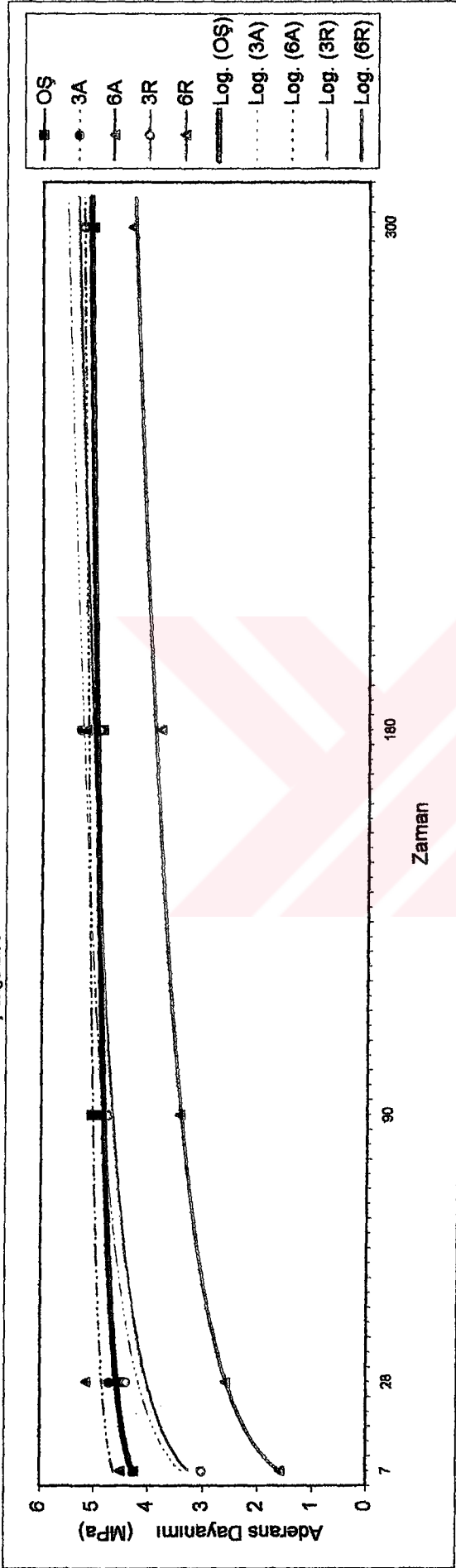
TS 707, (1980), Beton Agregalarından Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi.

TS 3530, (1980), Beton Agregalarının Tane Büyüklüđu Dağılımının Tayini (Granülometrik Birleşim Tayini).

Torii, K., Kawamura, M., (1992), “Pore Structure and Chloride Permeability of Concretes Containing Fly Ash, Blast Furnace Slag, and Silica Fume”, Fourth CANMET/ACI, International Conference on Fly ash, Blast Furnace Slag, Silica Fume and Natural Pozzolans in Concrete, Vol 1, 1992, SP132-9,pp 135-150.

Yerlici, V. ve Ersoy, U., (1995), “ Betonun Çekme ve Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki”, TMMOB İnşaat Odası, Teknik Dergi, 6 (4), pp1059-1062.

Çizelge Ekt 3



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	16.09.1973	
Doğum yeri	Uşak	
Lise	1989-1991	İçel-Mersin Anadolu Lisesi
Lisans	1992-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1998-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Müh. Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1998-Devam ediyor YTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Anabilim
Dalı Araştırma Görevlisi.

