

KÜR

KOŞULLARINA GÖRE

BETON

MUKAVEMET ANALİZİ

Dr. Yakup Murat ÇEBİ



KÜR KOŞULLARINA GÖRE BETON MUKAVEMET ANALİZİ¹

Dr. Yakup Murat ÇEBİ

Bitlis Eren Üniversitesi

¹ Yazarın, Prof. Dr. Selim PUL danışmanlığında hazırlanan “*Geleneksel ve Yüksek Dayanımlı Betonlarda Dayanım Gelişiminin Farklı Kür Koşulları Altında İncelenmesi*” isimli yüksek lisans tezinden türetilmiştir.



KÜR KOŞULLARINA GÖRE BETON MUKAVEMET ANALİZİ
Dr. Yakup Murat ÇEBİ

Genel Yayın Yönetmeni: Berkan Balpetek

Kapak ve Sayfa Tasarımı: Duvar DESIGN

Basım Tarihi: Ocak 2025

Yayıncı Sertifika No: 49837

E-ISBN: 978-625-5551-25-2

© Duvar Yayınları

853 Sokak No:13 P.10 Kemeraltı-Konak/İzmir

Tel: 0 232 484 88 68

www.duvar yayinlari.com

duvar kitabevi@gmail.com

ÖNSÖZ

Çalışmamın her aşamasında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım hocam Sayın Prof. Dr. Selim PUL'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iii
-------------	-----

İÇİNDEKİLER.....	iv
------------------	----

ÖZET	vi
------------	----

SEMBOLLER DİZİNİ	vii
------------------------	-----

1. GENEL BİLGİLER	1
-------------------------	---

1.1. Giriş.....	1
-----------------	---

1.2. Geleneksel ve Yüksek Dayanımlı Betonların Tanımı, Tarihsel Gelişimi, Kullanım Alanları, Bileşenleri ve Genel Özellikleri	1
--	---

1.2.1. Betonun Tanımı	1
-----------------------------	---

1.2.2. Tarihsel Gelişim.....	1
------------------------------	---

1.2.3. Kullanım Alanları	2
--------------------------------	---

1.2.4. Bileşenleri	3
--------------------------	---

1.2.5. Genel Özellikleri	5
--------------------------------	---

1.3. Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri	6
--	---

1.3.1. Poisson Oranı	6
----------------------------	---

1.3.2. Büzülme (Rötre)	7
------------------------------	---

1.3.3. Sünme.....	7
-------------------	---

1.3.4. Elastisite Modülü.....	7
-------------------------------	---

1.3.5. Basınç ve Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki	8
---	---

1.3.6. Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkileri	9
--	---

1.3.7. Süneklik.....	10
----------------------	----

1.3.8. Dayanıklılık.....	10
--------------------------	----

1.3.9. Yüksek Dayanımlı Beton-Donatı Aderansı	11
---	----

1.4. Yüksek Dayanımlı Beton Yapı Elemanlarının Davranışı	11
--	----

1.4.1. Eğilme Etkisi Altında Davranış.....	11
--	----

1.4.2. Kesme Etkisi Altında Davranış	12
--	----

1.4.3. Zımbalama Etkisi Altında Davranış	13
--	----

1.5. Betonun Kürü.....	13
------------------------	----

1.6. Betona Uygulanan Kür Yöntemleri	14
--	----

1.6.1. Betonun Islak Durumda Kalabilmesini Sağlayabilmek İçin Uygulanan Kür Yöntemleri.....	14
--	----

1.6.2. Beton Yüzeyini Bir Zar ile Örterek Buharlaşmayı Önleyen Kür Yöntemleri.....	16
1.7. Kürün Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi.....	17
1.8. Yüksek Dayanımlı Beton Elde Etme Yöntemleri.....	72
1.8.1. Metha - Aitcin Yöntemi [54].....	72
1.9. Toralles Carbonari Yöntemi [54].....	73
1.9.1. Aitcin Yöntemi	73
2. SONUÇLAR	74
KAYNAKLAR.....	75

ÖZET

Son 30 yıldan bu yana uygulamada bulunan ve teknolojinin de gelişmesiyle giderek yaygınlaşmakta olan yüksek dayanımlı beton üzerinde birçok araştırma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen, bu betonun özellikleri henüz geleneksel beton kadar aydınlatılamamıştır. Bugün yürürlükte olan betonarme yönetmeliklerinin birçoğu, basınç dayanımı en çok 40 MPa – 50 MPa’a kadar olan betonlar üzerinde gerçekleştirilen çalışma sonuçlarına göre hazırlanmıştır. Bu yönetmeliklerde önerilen bağıntıların, yüksek dayanımlı betonlar için de aynen uygulanabileceğini söylemek bugün için mümkün değildir. Yüksek dayanımlı betonun poisson oranı, rötresi, gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi, basınç dayanımı-çekme dayanımı ilişkisi, kırılma mekanizması ve çatlama durumu gibi konular üzerindeki bilgiler maalesef bugün için yeterli seviyede değildir. Benzer şekilde, geleneksel beton için de halen yeterince aydınlatılamamış bazı noktalar bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların farklı kür koşulları altında dayanım gelişimini incelemektir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma, beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgilerin verildiği bölüm olup, bu bölümde giriş, çalışmanın amacı ve kapsamı tanıtılmakta, betonların özellikleri ve daha önce gerçekleştirilmiş bazı araştırmalar özetlenmektedir. İkinci bölümde, çalışmanın amacına uygun olarak üretilen geleneksel ve yüksek dayanımlı betonlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, bu betonların bileşim hesapları ve farklı kür koşullarına tabi tutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilen merkezi basınç deneyleri üzerinde durulmaktadır. Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular ve irdelemeler sunulmaktadır. Çalışmanın tümünden çıkartılabilecek sonuçlar dördüncü bölümde özetlenmekte ve bu bölümü de beşinci bölüm olan kaynaklar dizini izlemektedir.

Elde edilen sonuçlar, farklı ortamlarda küre tabi tutulmuş yüksek dayanımlı ve geleneksel betonlarda su içinde kür yetersizliklerinden daha çok, kür sıcaklığı farkının dayanım gelişimleri üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

SEMBOLLER DİZİNİ

a	: Kesme açıklığı, regresyon katsayısı
b	: Regresyon katsayısı
BD	: Basınç dayanımı
CC	: Kontrollü kür
CH	: Kalsiyum hidrate
CP	: Kontrol portland çimentosu
CSH	: Kalsiyum silika hidrate
d	: Eleman derinliği
DN	: Agreganın doğal nemi
E	: Katkı maddesi olarak Elazığ pomzası kullanılarak yapılmış beton, görünür aktivasyon enerjisi
ES	: Katkı maddesi olarak Elazığ pomzası ve silis dumanı birlikte kullanılarak yapılmış beton
KB	: Kontrol betonu
KD	: Kopma dayanımı
LC	: Taşıyıcı hafif beton
LOI	: Kızdırma kaybı
M	: Olgunluk indeksi
MK	: Metakaolin
ND	: Normal dayanımlı beton veya geleneksel beton
PÇ	: Portland çimentosu
R	: Evrensel gaz sabiti
S	: Dayanım
SAK	: Süper akışkanlaştırıcı katkı
SD	: Silis dumanı
SDB	: Silis dumanlı beton
SE	: Agreganın kütlece su emmesi
SH	: Silis dumanlı beton
SP	: Süper akışkanlaştırıcı

t	: Zaman
T	: Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı
UC	: Kontrolsüz kür
UÇB	: Uçucu küllü beton
UK	: Uçucu kül
WC	: Su kürü
YÇD	: Yarmada çekme dayanımı
YD	: Yüksek dayanımlı beton
β_i	: Her bir agrega sınıfının kütlece oranı
D_{maks}	: Maksimum tane çapı
Δt	: Beton sıcaklığının $T^{0}C'$ de kaldığı gün
E_c	: Betonun başlangıç elastisite modülü
ϵ_c	: Betonun birim şekil değiştirmesi
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cts}	: Betonun yarmada çekme dayanımı
f_{ct}	: Betonun merkezi çekme dayanımı
f_r	: Kopma modülü
f_s	: Donatının çekme dayanımı
f_y	: Donatının akma dayanımı
γ_a	: Agreganın doymun kuru yüzeyli birim kütlesi
γ_c	: Çimentonun doymun kuru yüzeyli birim kütlesi
ν	: Poisson oranı
ρ_{min}	: Minimum çekme çeliği oranı
s/b	: Su/bağlayıcı
$s/\ç$	: Su/çimento
σ_c	: Beton basınç gerilmesi
t_e	: Referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş
T_0	: Temel alınan sıcaklık
T_r	: Referans sıcaklığı
V_a	: Agrega mutlak hacmi
V_h	: 1 m^3 betondaki hava hacmi
V_w	: 1 m^3 betondaki su hacmi
W_a	: 1 m^3 betondaki agrega kütlesi
W_c	: 1 m^3 betondaki çimento kütlesi

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton ve betonarmenin bulunduğu 19. yüzyılın ikinci yarısından günümüze kadar, her dönemde, üretilen standart beton kalitesinden daha üstün nitelikte beton; malzeme ve günün teknolojisindeki iyileşmelerle elde edilebilmiştir. Diğer bir deyişle, normal dayanımlı beton ile daha yüksek dayanımlı beton daima birlikte var olmuşlardır. Yüksek dayanımlı beton ise, kendinden öncekilerden, nicelik ve nitelik yönünden çok farklıdır [1].

Bugün betonarme hesabını yönlendiren yönetmelik hükümlerinin ve denklemlerinin büyük bir bölümü dayanımı 400 kgf/cm^2 'den az betonla yapılmış eleman deneylerinden elde edilmiş olduğundan, aynı denklem ve hükümlerin yüksek dayanımlı beton için de geçerli olup olmayacağı henüz aydınlığa kavuşmamıştır [2]. Bununla birlikte beton dayanımına etki eden bütün parametrelerin bilinmesi gerekir. Bu parametrelerden biri de betonun bakımı için uygulanan kür koşullarıdır.

Bu çalışmanın amacı; yüksek dayanımlı ve geleneksel betonların dayanım gelişimini farklı kür koşulları altında incelemektir.

1.2. Geleneksel ve Yüksek Dayanımlı Betonların Tanımı, Tarihsel Gelişimi, Kullanım Alanları, Bileşenleri ve Genel Özellikleri

1.2.1. Betonun Tanımı

Çimento, agrega, su ve gerektiğinde bir katkı maddesini harmanlayarak elde edilmiş ve oranları dikkatli ayarlanmış bir karışımı, istenen şekil ve boyutta kalıplar içine boşluksuz olarak yerleştirmek ve uygun bakım koşulları altında sertleştirmek yolu ile elde edilen kompozit malzeme *beton* veya *geleneksel beton* olarak adlandırılmıştır. Kaliteli çimento ve agrega ile süper akışkanlaştırıcı katkı ve silis dumanı gerektiren, su-çimento oranı 0.20,,lere kadar düşürülerek basınç dayanımı 100 N/mm^2 mertebesine çıkarıldığı halde yüksek işlenebilirliğini (20 cm''ye varan çökme değeri) ve pompalanabilirliğini koruyan özel beton türüne *yüksek dayanımlı beton* denmiştir [3].

1.2.2. Tarihsel Gelişim

Günümüzde betonun en yaygın kullanımı, 1850''li yıllarda betonarmenin icadı ile başlamıştır. Çelik çubuklarla donatılmış beton konusunda ilk yayın 1855''te François Coignet tarafından yazılmıştır. Betonarme elemanlar için ilk patent birkaç yıl sonra Joseph Monier tarafından alınmıştır. Avrupa ve Amerika''da betonarmenin gelişmesi bunu hızla izlemiştir. 1900''ü izleyen yıllarda betonarme ile ilgili yönetmelikler, beton karışım hesapları ve ilgili mukavemet ve su

formülleri, ideal granülometri eğrileri, ilk öngerilmeli beton sistemleri ve ilk etkili vibrasyon geliştirilmiş, Türkiye’de de ilk betonarme yapılar inşa edilmiş ve ilk Türk Portland Çimento Standardı yayınlanmıştır. 1950’yi izleyen yıllarda Avrupa ve Amerika’da betonarme yönetmelikleri gelişerek elastik teoriden taşıma gücü metoduna geçilmiş, 1970-80’li ve izleyen yıllarda endüstriyel beton üretiminin ve prefabrikasyonunun dünyada ve ülkemizde geliştiği görülmüştür. Bu kapsamda elektronik dijital ve istatistiksel yöntemleri içeren analizlerde başvurulmaktadır [4-9].

1.2.3. Kullanım Alanları

Yüksek dayanımlı beton tanımı sürekli değişmektedir. 1950’lerde standart silindir (150x300 mm) basınç dayanımı 34 MPa olan beton, yüksek dayanımlı beton olarak kabul edilmekte idi. 1960’larda ABD’de basınç dayanımı 41 MPa ve 52 MPa olan betonlar piyasada kullanılıyordu. Yakın geçmişte ise basınç dayanımı 80 MPa ve 100 MPa arasında değişen betonlar, yerinde dökülmüş betonla yapılan yapılarda ve öngerilmeli beton yapı elemanlarında ticari olarak uygulanmıştır. Ayrıca, çok yüksek dayanımlı agregâ kullanarak, basınç dayanımı 250 MPa’a ulaşan betonlar da üretilebilmiştir. Yüksek dayanımlı beton tanımı üretim yapılan bölgede yaygın olan üretim teknolojisi ile değişebilir. Eğer bölgede kullanılan beton basınç dayanımı 30 MPa ise f_c değeri 50 MPa olan beton o bölgedeki mühendisler tarafından yüksek dayanımlı beton olarak kabul edilebilir. Bunun yanında, eğer bölgede kullanılan betonun basınç dayanımı 50 MPa ise, bu durumda f_c değeri 80 MPa olan beton o bölgede yüksek dayanımlı beton olarak kabul edilebilir [3]. Bu nedenle yüksek dayanımlı betonun tanımı ülkeden ülkeye değişebilmektedir. Çizelge 1’de bazı ülkelerin yönetmeliklerine göre yüksek dayanımlı betonun basınç dayanımı sınırları verilmektedir [5].

Diğer betonlar yanında yüksek dayanımlı betonlar da betonarme ve öngerilmeli beton yüksek yapılar, köprüler, viyadükler, nükleer santraller, yollar, uçak pistleri, tüneller, özel temeller, açık deniz platformları, arıtma tesisleri ve prefabrike yapılar gibi özel mühendislik yapılarında kullanılmaktadır.

Çizelge1. Bazı yönetmeliklere göre yüksek dayanımlı beton dayanım sınırları [5].

Yönetmelik	En küçük basınç dayanımı (MPa)	En büyük basınç dayanımı (MPa)	Numune tipi
TS 500	50	-	Silindir Ø=150mm, h=300 mm
ACI 318-89 ve CAN-A23.3 M84	62-69	100	Silindir Ø=150mm, h=300 mm
CEB-FIP (MC90)	60	80	Silindir Ø=150mm, h=300 mm
DIN 1045	55	115	Küp a=150 mm
BS 8110	60	110	Küp a=150 mm
NS 3473	65	105	Küp a=150 mm
Rak-MK4	60	100	Küp a=150 mm

1.2.4. Bileşenleri

Günümüz yapılarında çokça kullanılan yüksek mukavemetli betonların üretimi için üç yaklaşım bulunmaktadır:

Betonun tüm malzemelerini büyük titizlikle seçmek ve sıkı bir kalite kontrol programı uygulayarak, başarısızlığı engellemek,

Uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanarak işlenebilirliği arttırmak, boşluk sistemini iyileştirmek ve hidrasyon ısını azaltmak,

Karışım dizaynında s/ç oranını pratikte becerilecek sıkılamayı zorlamayacak en düşük seviyeye indirmek ve bu amaç için akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanmaktır.

Bu yaklaşımlar eskiden beri bilinmekle beraber son yıllardaki teknolojik gelişmelerle ortaya çıkan süper akışkanlaştırıcı kimyasallar bu işlemleri çok kolaylaştırmıştır [6].

1.2.4.1. Çimento

Çimento olarak tam bir kalite programı uygulayan bir üretici firmanın çimentosunu tercih etmek, kimyasal ve fiziksel özellikleri açısından geçmişinin düzgünlüğüne önem vermek ve kullanım aşamasında da çimentonun kontrollerini düzenli ve uygun bir şekilde yapmak gerekmektedir. Geleneksel beton için çimento dozajını 300-350 kg/m³ arasında tutmak, yüksek dayanımlı beton için ise 400-500 kg/m³ arasında tutmak gerekmektedir [7].

1.2.4.2. Agrega

Agregaların kalitesi yüksek dayanımlı betonu direkt olarak etkilediği için çimento kalitesi kadar önemlidir. Agregaların standartlarda konmuş kriterlere uymasının yeterli olmayabileceği vurgulanarak yüksek dayanımlı betonda şu amaçlara yönelik özellik aranması tavsiye edilmektedir:

- Mümkün olan en düşük s/ç oranı,
- Yeterli yerleştirme kolaylığı,
- Hamur ile aderans gerilmelerini alacak yeterli yüzey alanıdır.

Agregada silt ve kil kirliliği olmamalı, maksimum dane çapı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmadığında 10-16 mm, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanıldığında 25 mm alınmalı, iyi bir aderans için kırmataş agregası kullanılmalı, şekli bozuk daneler %5'i geçmemeli, düşük s/ç oranlı karışımlarda bir miktar su emen agregası seçilmeli, kaba agregası mekanik özellikleri yeterli düzeyde olmalı, ince agregası olarak düşük s/ç oranları için kaba kum, yüksek dozda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılacaksa ince bir kum kullanılmalıdır. Kalker kırmataş agregalarının, doğal agregalara kıyasla aynı ortamlarda %30-35 daha yüksek beton basınç dayanımları verdiği, süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılan fakat silis dumanı kullanılmayan bu betonlarda en düşük s/ç oranının 0.36 ve en yüksek basınç dayanımının 83 N/ mm² olduğu görülmüştür. Doğal agregalı betonlarda ise en düşük s/ç oranı 0.32 düzeyine kadar inebildiği halde iyi aderans sağlanmadığından en yüksek basınç dayanımı 57 N/ mm² mertebesinde kalmıştır. Kalker kırmataşın çok iyi aderans sağladığı, ayrıca numunelerde gözlenen agregası kırılma oranının %89'lara çıkması, doğal agregalı betonlarda ise %44'lerde kalması ile gerçekleşmiştir [3].

1.2.4.3. Su

Yüksek dayanımlı betonlarda geleneksel betonlarda olduğu gibi, beton karma suyu olarak içme suyunun kullanılması en doğru tercih olmakla birlikte daha önce denenmiş ve iyi sonuçlar alınmış suların kullanılmasında bir sakınca bulunmamaktadır. Daha önce betonarme yapılarda kullanılmamış suların pH değerleri, içinde bulunan sülfat ve diğer tuzlar ile yabancı maddeler açısından analizden geçirilmesi uygun olmaktadır. Karma suyunu asit reaksiyonu göstermeyen (pH >7), içerisinde agresif karbonik asit, mangan bileşikleri, amonyum tuzları, serbest klor, madeni yağlar, organik maddeler ve endüstri atıkları bulunmayan sulardan seçmek gerekmektedir. Litresinde en çok, çözünmüş halde 15 gr ve yüzer halde 2 gr madeni tuz, yine litresinde en çok 2 gr SO₃ bulunmalıdır. Deniz suyunun dayanımı düşürücü etki yapmasından dolayı, özellikle yüksek dayanımlı betonların üretiminde kullanılmaması gerekmektedir [7].

1.2.4.4. Mineral Katkı Maddeleri

Sertleşmiş betonda ilk yaşlarda basınç mukavemetleri daha düşük olurken, 3 ay veya daha ileri yaşlarda daha yüksek olmaktadır; silis dumanı kullanılması halinde ilk yaşlardaki beton mukavemetleri de yüksek olarak kontrol betonunkini geçmektedir ve uçucu kül ve/veya silis dumanı ile çok yüksek beton basınç mukavemetleri elde etmek mümkündür. Puzolan ve Portland çimentosu karışımının su ile reaksiyonunda açığa çıkan kireç sulu ortamda puzolandaki silis ile birleşerek çimentonun hidratasyon ürünlerine benzer CSH ürünleri oluşturmaktadır. Bağlayıcı hamurdaki serbest kireç miktarı gittikçe azalmaktadır. Daha az kalsit kristallerinin bulunması ve büyük boşluklu CH fazı yerine, küçük boşluklu CSH fazı oluşması betondaki kılcal boşluk miktarını azaltarak kimyasal etkilere karşı kalıcılığı arttırmaktadır. Böylece hamur-agrega geçiş bölgesi özellikleri iyileşerek basınç dayanımı artmaktadır.

C sınıfı (kireç içeren) uçucu küller veya silis dumanı katılmış betonların hem ilk yaşlardaki, hem de 28 veya 56. günlerdeki mukavemetleri kontrol betonlarınkinden yüksektir. Bu nedenle ABD, Avrupa ve Avustralya'daki yüksek dayanımlı beton uygulamalarının hemen hepsinde yüksek aktiviteli C sınıfı uçucu küller, silis dumanı veya her ikisi birlikte süper akışkanlaştırıcı katkı ile beraber uygulanmaktadır ve 0.25-0.35 gibi çok düşük s/ç oranlarında iyi işlenebilirlik göstermektedir. Ayrıca ince öğütülmüş yüksek fırın cürufu da yüksek dayanımlı betonun yapımında kullanılan mineral katkı maddesidir [3].

1.2.4.5. Süper Akışkanlaştırıcılar

Süper akışkanlaştırıcılar yoğun melamin formaldehit sülfonatlar, yoğun naftalin formaldehit sülfonatlar, dönüştürülmüş ligno sülfonatlar ve bunlara çökme kaybını önleyici sülfonik grup ve karboksil grubu karıştırılarak üretilenler olmak üzere 4 gruptur. Bu katkı maddeleri betondaki suda eridiklerinde, çimento tanecikleri tarafından absorbe edilerek onların yüzeylerinde ince bir film oluşturur ve film dışı doğru negatif yüklü olarak tanelerin birbirini itmesine yani dispersiyona yol açıp kolay kaymalarına ve betonda işlenebilme özelliğinin artmasına neden olur. Bu katkılar suyun yüzey gerilimini normal akışkanlaştırıcılar kadar fazla düşürmedikleri için de aşırı miktarda hava sürüklemeyi ve onlara kıyasla daha yüksek oranlarda kullanılabilirler [3].

1.2.5. Genel Özellikleri

Genellikle 28 günlük basınç dayanımı 40 N/mm^2 'den daha büyük olan betonlar yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanır. Beton dayanımı genel olarak çimento hamuru boşluk yapısına, agreganın özelliğine ve agreg-açimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine bağlıdır. Çimento hamuru ve geçiş özellikleri betondaki

su/çimento oranı ile yakından ilgilidir. Bu oran düşürülerek daha az boşluklu beton üretilir. Aynı zamanda maksimum agrega tane çapı küçültülerek geçiş bölgesi özellikleri iyileştirilebilir. Ancak bu iki yaklaşımın beton dayanımı üzerindeki iyileştirici etkisinin belirli bir üst sınırı vardır. Bu sınırın üstüne çıkmak için beton yapısında var olan ve betonun zayıf yanı olarak görülen kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) kristallerinin oluşmasını önlemek gerekir. Bu kristaller hekzagonal yapıda olup kolayca kırılma özelliği gösterirler.

Beton işlenebilirliğini kötüleştirmeden çimento hamuru ve geçiş bölgesinde boşluk miktarını azaltmak için çimento dozajını arttırmanın yanında, su azaltıcı katkı kullanımı birlikte düşünülebilir. Çimento dozajı 600 kg/m^3 'ün üzerine çıkabilmektedir. Ligno sülfonat, naftalin, melamin ya da polimer esaslı olan bu katkıları kullanılarak s/ç oranı 0.30 'ın altına inebilir. Burada önemli bir nokta, bu kadar düşük s/ç oranlarındaki küçük değişimlerin beton dayanımını önemli ölçüde değiştirdiği gerçektir.

Yüksek dayanımlı beton eldesi için Ca(OH)_2 kristallerinin oluşumunu önlemek amacıyla puzolan kullanılır. Puzolanların Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek çimento içindeki diğer hidrate elemanlara benzer yeni elemanlar oluşturdukları bilinmektedir. Bu yeni elemanlar çimento hamuru ve geçiş bölgesinde kolay kırılmayan sağlam elemanlardan oluşan homojen bir ortam oluşturmakta, aynı zamanda küçük boşlukları doldurma özelliği göstermektedir. Puzolan olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı kullanılabilir. Silis dumanında, SiO_2 oranı çok yüksek değerlerde bulunabilir ($\%90$ 'ın üzerine çıkabilir) ve inceliği çimento inceliğinin $50-60$ katına ulaşabilir. Puzolan kullanımının bir başka olumlu yanı çimento hidratasyon ısını düşürmesi, böylece ısı çatlak oluşumunun önlenmesidir [8].

1.3. Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri

1.3.1. Poisson Oranı

Yüksek dayanımlı betonun elastik yüklemeler altındaki poisson oranı, düşük dayanımlı betonun poisson oranı ile mukayese edilebilir. Bu oran gerilme düzeyine göre $0,18$ ile $0,24$ arasında değişir [9]. Fakat elastik olmayan yüklemeler altında yüksek dayanımlı betonda daha az mikro çatlaklar oluşması nedeniyle yanal deformasyonlar, normal dayanımlı beton yani geleneksel betona oranla daha azdır. Poisson oranının hesaplanması için Ahmad [10] poisson oranı için $\nu=6,855(f_c)^{0,77}$ (MPa) denkleminin kullanılmasını önermiştir. Bunun yanı sıra, basınç dayanımı 21 MPa ile 76 MPa arasında olan betonların deney sonuçlarına göre, çakıl veya kireçtaşından mamül betonların, basınç dayanımları dikkate alınmaksızın, poisson oranları $0,2$ olarak alınabilir [2,11].

1.3.2. Büzülme (Rötre)

Yüksek dayanımlı betonun büzülme özelliği hakkında birçok kaynak vardır. Aitcin basınç dayanımları 64 MPa, 90 MPa ve 100 MPa olan üç yüksek dayanımlı beton grubunda başlangıçtaki büzülme oranının, yüksek dayanımlı beton için rölatif olarak daha fazla olduğunu gözlemiştir. 91 gün sonunda Aitcin üç beton grubunun büzülmelerinde pratik olarak büyük bir fark görememiştir. Fakat iki çok yüksek dayanımlı beton grubunda, büzülmenin ilkinde nazaran daha erken oluştuğunu göstermiştir. Kesin bir ortak sonuca ulaşamamalarına rağmen, bazı araştırmacılar akışkanlaştırıcıların hidrolik büzülmeyi arttırdığını rapor etmişlerdir. Büzülme düşük dayanımlı betonlarda (27 MPa'a kadar), orta (41 MPa'a kadar) ve yüksek dayanımlı betonlara (62 MPa'a kadar) nazaran daha da fazladır [2,11].

1.3.3. Sünme

Beton basınç dayanımı ve sünme katsayısı arasındaki ilişki için yapılan çalışmalar aynı yaştaki betonlarda maksimum öz sünmenin yüksek dayanımlı beton için, geleneksel betona göre daha az olduğunu göstermiştir. Yapılan deneyler yüksek dayanımlı betonun sünme değerinin, geleneksel betonun sünme değerinden %25-50 oranından daha az olduğunu göstermiştir. Benzer kuruma koşullarında ve benzer rölatif gerilmelerde, aşırı yüklemeler dahil olmak üzere, sünme deformasyonu, sünme katsayısı ve öz sünme yüksek dayanımlı beton için daha düşüktür. Ayrıca betonun sünme davranışı betona uygulanan kür rejimine de bağlıdır. Düşük s/ç oranı ve yükleme zamanındaki yüksek hidrasyon derecesi, sünme potansiyelini düşüren etkenlerdir [2,11].

1.3.4. Elastisite Modülü

Yüksek dayanımlı betonun elastisite modülünün bugün yönetmeliklerde verilen denklemlerle sağlıklı bir biçimde hesaplanamayacağı birçok araştırmacı tarafından kanıtlanmıştır. E_c , gerçek değerinden büyük çıkmaktadır. Bu konuda yüksek dayanımlı betonu da içeren yeni denklemler önerilmiştir. Bu denklemler çizelge 2'de gösterilmiştir [2,11].

Çizelge 2. Yüksek dayanımlı betonun elastisite modülü için bazı denklemler [11].

ACI 318-89	$E_c = 0.043 \rho^{1.5} \sqrt{f_c}$
FIP/CEB	$E_c = 10^4 (f_{ck}+8)^{1/3}$
ACI Committee 363	$E_c = 3320\sqrt{f_c} + 6900$
Ahmad et. al.	$E_c = (1/29510)\rho^{2.5}(\sqrt{f_c})^{65}$
Norwegian Code	$E_c = 9500(f_{cc})^{0.3}(\rho/2400)$
Shah et. al.	$E_c = (1/28)\rho^{1.5}\sqrt{f_c}$

1.3.5. Basınç ve Çekme Dayanımı Arasındaki İlişki

Betonun hemen hemen tüm mühendislik özellikleri tek eksenli basınç dayanımı cinsinden ifade edilmiştir. Beton numunesinin ölçülen basınç dayanımı; kür koşullarına, betonun deney zamanındaki yaşına, yüklenme hızına, geometrisine, ebadına ve numunenin peklilik derecesine bağlıdır.

Beton, basınca karşı oldukça dirençli fakat çekmeye karşı çok zayıf (basınç dayanımının 1/20'si ile 1/10'u kadar) olan bir malzeme olduğu bilinmektedir. Bundan dolayı beton elemanların taşıyabilecekleri eğilme yükleri hesaplanırken, betonun çekme dayanımı hesaba katılmaz. Fakat betonun deformasyon hesapları için ve çekme çeliğinin ani bir eleman çatlamasında kopmasını önlemek için kullanılacak olan minimum boyuna çekme donatısının hesaplarında, betonun çekme direncini bilmek çok önemlidir. Betonun çekme direnci; direkt çekme testi, split silindir testi ve kopma modülü deneyi ile bulunabilir. Kür koşulları yüksek dayanımlı beton elemanları çekme dayanımlarında, geleneksel betona göre daha önemli bir etki gösterir.

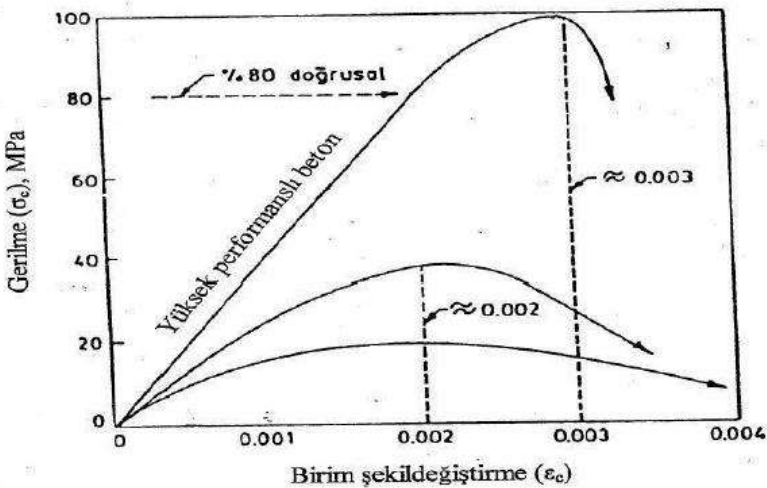
Yüksek dayanımlı betonların çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkinin geleneksel betondan farklı olduğu anlaşılmaktadır. Bu konuda da ek araştırmalar gerekmele birlikte, bugün yönetmeliklerde verilen denklemlerin geçerli olduğu kabul edilebilir. Çizelge 3'te bazı araştırmacı ve yönetmeliklere göre, yüksek dayanımlı betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki verilmiştir [2,11].

Çizelge 3. Yüksek dayanımlı betonun çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki [5].

Bağıntıyı öneren	Bağıntı
ACI 363	$f_{cts} = 0.59\sqrt{f_c}$
TS 500	$f_{cts} = 0.53\sqrt{f_c}$
CEB-FIP	$f_{ct} = 0.6 + 0.06f_c$
Carrasquillo ve diğerleri	$f_{cts} = 0.54\sqrt{f_c}$
Thornfeldt	$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{0.6}$
Yerlici ve Ersoy	$f_{cts} = 0.36f_{ck}^{0.62}$
Arıoğlu ve Köylüoğlu	$f_{ct} = 0.573f_c^{0.700}$
Arıoğlu ve Köylüoğlu	$f_{ct} = 0.321(f_c)^{0.661}$

1.3.6. Gerilme-Birim Şekil Değiştirme İlişkileri

Yüksek dayanımlı beton ile ilgili çalışmalar, beton dayanımı yükseldikçe betonun gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisini belirleyen σ - ϵ eğrisinin önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Geleneksel beton ile yüksek dayanımlı beton gerilme-birim deformasyon eğrileri arasındaki fark Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların σ - ϵ eğrileri [2].

Şekilden görüldüğü gibi, yüksek dayanımlı betonun geleneksel betondan 3 önemli farkı vardır:

1. Geleneksel betonda maksimum gerilmeye (dayanım) yaklaşık 0.002 gibi bir birim deformasyonda ulaşılırken, bu değer yüksek dayanımlı betonda 0.003'e yaklaşmaktadır.
2. Yüksek dayanımlı betonun σ - ϵ eğrisi yaklaşık dayanımın %80'ine kadar doğrusal kalmaktadır. Bu noktaya kadar gözlenen davranış oldukça elastiktir. Yüksek dayanımlı betonun bu noktaya kadar doğrusal elastik kalmasının nedeni, mikro çatlakların geleneksel betona oranla çok daha az olmasıdır.
3. Yüksek dayanımlı betonda ulaşılan en büyük birim kısalma geleneksel betona oranla çok daha küçüktür. Başka bir deyişle yüksek dayanımlı betonun deformasyon kapasitesi daha azdır [2].

1.3.7. Süneklik

Yüksek dayanımlı betonun geleneksel betona oranla çok daha gevrek bir davranış gösterdiği Şekil 1'den görülebilir. Gevrek davranış istenen bir davranış biçimi değildir. Özellikle deprem etkisi altındaki elemanlarda kullanılan malzemenin gevrek bir davranış sergilemesi, tersinen ve tekrarlanan yükler altında çok önemli olan süneklik ve enerji tüketimini olumsuz yönde etkiler. Bilindiği gibi, sünekliği arttırmanın en etkili yolu sargı donatısı kullanmaktır. Yüksek dayanımlı betonda sargı donatısının etkisini incelemek üzere bazı deneysel araştırmalar yapılmıştır. Basit eğilme uygulanarak yapılan kiriş deneylerinde ve yapılan bazı analitik çalışmalarda sargı donatısı ile sünekliğin etkili olarak arttırılabileceği kanıtlanmıştır. Kirişler için bilinen yöntemlerle belirlenen moment-eğrilik ilişkisinin için de oldukça geçerli olduğu deneylerle anlaşılmıştır [2].

1.3.8. Dayanıklılık

Silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkılı betonlarda (yüksek dayanımlı beton) boşluksuz çok yoğun bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Bu sayede çok yüksek basınç dayanımlarına ve doğal kimyasallara karşı yeterli dayanıklılığa sahip betonlar üretilebilmektedir. Yoğun mikro yapı zararlı kimyasalların betona sızmasına fiziksel açıdan engel olmakta, puzolanik etkinlik sayesinde ortamdan Ca(OH)_2 çekilmesi ile de zararlı kimyasal reaksiyonlar önlenmektedir. Bu yüksek dayanımlı betonların reolojik özellikleri de üstün nitelikte olmaktadır. Tisitotropik karakter yani akışkan olmasına karşın çok kohezif olması, su altı dökümlerinde de malzemenin sürüklenip ayrışma eğilimine engel olur [12].

1.3.9. Yüksek Dayanımlı Beton-Donatı Aderansı

Son 20 yıl içinde yüksek dayanımlı beton-donatı aderansı konusunda gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmalar aşağıda verilmektedir.

Rosenberg ve Gaidis biri silis dumanlı, diğeri silis dumansız iki sınıf yüksek dayanımlı beton üzerinde gerçekleştirdikleri bir dizi çekip-çıkarma deneylerinden, basınç dayanımında %50 artışın aderans dayanımında %40'a varan artış meydana getirebileceğini gözlemlemişlerdir.

Maton [13], Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyleri'nde yüksek dayanımlı betonlarda erişilen en büyük kaymaya karşılık elde edilen yüklerin geleneksel betonlara göre daha büyük olduğunu gözlemlemiş ve kalın donatıların aderansının ince donatılardan düşük olduğunu savunmuştur. De Larrard ve Malier'in araştırmasında bu durumun ancak bünyesel büzülme ile açıklanabileceği iddia edilmektedir [14].

Larrard [15], geleneksel ve yüksek dayanımlı betonlarla ürettiği bir doğrultuda çalışan döşeme plaklarının donatılarını en büyük gerilme değerine kadar çalıştırarak, çatlak genişliklerinin yüksek dayanımlı beton döşeme plaklarda daha düşük olduğunu gözlemiştir.

Burada eksenel çekip-çıkarma deneyinde donatıya dik doğrultuda kesme kuvvetlerinin bulunmaması, mesnetin uyguladığı yerel basınç gerilmelerinin, beton örtü kalınlığının çok büyük olması ve betonda çekme çatlaklarının oluşmamasının bu deneyin başlıca sakıncalarını teşkil etmesine karşılık Standart Belçika Mafsallı Kiriş Deneyleri'nin bu tür sakıncalarının bulunmadığı belirtilmelidir [16].

1.4. Yüksek Dayanımlı Beton Yapı Elemanlarının Davranışı

1.4.1. Eğilme Etkisi Altında Davranış

Yüksek dayanımlı beton yapı elemanlarının eğilme etkisi altındaki davranışlarının genelde kullanılan eğilme formülleriyle anlatılabilirliği hakkında bazı şüpheler vardır. Bu, temelde yüksek dayanımlı beton ve geleneksel betonun gerilme-deformasyon özelliklerinin farklılığından kaynaklanır. Araştırmacılar ACI 318-89 [17]'un önerdiği dikdörtgen basınç bloğunun yüksek dayanımlı betona uygunluğu konusuna özel ilgi göstermişlerdir.

Kare kesitli, az donatılı kirişlerin eğilme etkisindeki maksimum mukavemetleri genelde çekme donatısının özelliklerine bağlıdır. Bundan dolayı, değişik ve geliştirilmiş basınç bloklarının eğilme mukavemetinin hesaplanmasında oldukça az bir etkisi vardır. σ -özelliklerinin farklılığından ötürü betondaki kuvvet bileşkesinin yeri ve büyüklüğünün farklılığına rağmen ACI 318-89'un önerdiği dikdörtgen basınç bloğu yüksek dayanımlı beton için yaygın şekilde kullanılmaktadır.

ACI 318-89 geleneksel beton elemanlarda minimum çekme donatısı oranını $\sigma_{min}=1.4/f_y$ (MPa) olarak vermektedir. Yüksek dayanımlı beton kirişlerde ise elemanın, çekme çeliğinin kopmasından dolayı taşıma kapasitesine ulaşmadan gevrek bir şekilde kırılmaması için daha fazla çekme çeliğine ihtiyaç vardır. Minimum çekme çeliği oranı; çatlamış kesitin $f_s=2f_y /3$ kadarlık bir çelik gerilmesiyle taşıyacağı momentin aynı kesiti çatlatmak için gerekli olan momente eşit olması gerektiği düşüncesiyle hesaplanır. Bu hesapta betonun taşıyacağı maksimum çekme gerilmesi, kopma modülüne (f_r) dayanılarak bulunur. Betonun basınç dayanımı arttıkça bununla orantılı olarak kopma modülü de artmaktadır. Dolayısıyla bahsedilen hesap yönteminde beton basınç dayanımının etkisi, minimum çekme çeliği oranı hesabına aksettirilmelidir. Buna dayanarak $\rho_{min}=(0.225\sqrt{f_c})/f_y$ (MPa) formülü önerilmektedir. Yanı sıra Nilson [18] daha büyük bir oranın gerektiğini söylemiş ve $\rho_{min}=(0.250\sqrt{f_c})/f_y$ (MPa) formülünü vermiştir [11].

1.4.2. Kesme Etkisi Altında Davranış

Beton basınç mukavemetinin elemanların kesme mukavemetleri üzerindeki etkisi; elemanın kesme açıklığının, elemanın derinliğine oranı azaldıkça daha önemli olur. Kısa kirişlerde, kesme açıklığının eleman derinliğine oranının (a/d) 1.5 olduğu ve $20 \text{ MPa} \leq f_c \leq$

103 MPa beton kullanıldığı durumlarda ACI Yapı Kodu derin kirişler için hesap denklemlerinin gerçek kesme mukavemetinden çok daha düşük değerler verdiği açıklanmıştır. Bununla beraber maksimum kesme mukavemetinin artan çekme donatısı miktarıyla arttığı da gözlenmiştir.

Basınç mukavemetinin $f_c=54 \text{ MPa}$ 'dan $f_c=78 \text{ MPa}$ 'a değişmesiyle elemanın kesme mukavemetinde belirgin bir artış; buna karşılık basınç mukavemetinin $f_c=98 \text{ MPa}$ 'a yükselmesiyle de belirgin bir düşüş rapor edilmiştir. Bu geleneksel beton ve yüksek dayanımlı betonun kırılma şekillerinin farklılığından kaynaklanıyor olabilir. Geleneksel betonda kırılma, çimento şerbetinden olurken, yüksek dayanımlı betonda çimento şerbetinin çok güçlü olması dolayısıyla kırılma yüzeyi agreganın içinden geçmektedir.

Norveç Yapı Kodu [9]'nda kesme mukavemeti hesaplarında kullanılabilecek maksimum beton basınç dayanımı $f_c=74 \text{ MPa}$ ile sınırlandırılmıştır. Bu limit ACI 318-89 Yapı Kodu [40]'nda ise $f_c=69 \text{ MPa}$ olarak verilmektedir. FIP/CEB raporunda da normal ağırlıklı betondan yapılmış elemanlarda beton basınç dayanımının $f_c=80 \text{ MPa}$,dan büyük değerlere çıkmasının kesme mukavemetinin düşmesine sebep olabileceği söylenmektedir [11].

1.4.3. Zımbalama Etkisi Altında Davranış

Betonarme elemanlarda zımbalama etkisiyle ilgili çalışmalar beton basınç dayanımının 20 MPa ile 40 MPa arasında değiştiği bölgede yapılmıştır. Yüksek dayanımlı beton elemanlar için güvenilir ampirik formüllerin oluşturulmasına yarayacak yeterli sayıda test bulunmamaktadır. Artan beton basınç dayanımıyla ters orantılı olarak test sonuçlarının hesap edilen değerlere oranı azalmaktadır. Kirişlerdeki kesme değerlerine dayanarak Norveç Yapı Kodu yüksek dayanımlı beton elemanlardaki zımbalama mukavemetinin $f_c=74$ MPa'dan sonra artmayacağı limitini koymuştur [11].

1.5. Betonun Kürü

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşan hidratasyon ürünleri (çimento jelleri), çimento hamurunun bağlayıcılığını sağlamakta, çimento hamurundaki kapiler boşluk oranını azaltmaktadır. Çimento hamurunun ve betonun kazanacağı dayanımın hızı ve miktarı, hidratasyonun ne ölçüde gerçekleşmiş olduğuna bağlıdır.

Hidratasyon olayının gerçekleşebilmesi ve normal hızda devam edebilmesi için, betondaki çimento hamurunun içerisinde yer alan kapiler boşluklarda yeterli miktarda suyun bulunması ve beton sıcaklığının çok düşük derecelerde olmaması gerekmektedir. O nedenle, yerine yerleştirme, sıkıştırma ve yüzey düzeltme işlemi tamamlanmış olan taze betona uygulanacak bir sonraki işlem, betonun içerisindeki çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların oluşumunu engelleyebilecek veya yavaşlatacak koşullara karşı önlem almak olmaktadır. Bu amaçla, yerine yerleştirilecek olan taze betonun sıcaklığının çok düşük olmamasına dikkat edilmekte, hidratasyon için yeterli miktarda su bulundurulabilmesi için de, beton yüzeyi ıslak tutulmakta ve buharlaşmanın azaltılmasına çalışılmaktadır.

Çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların büyük bir bölümü, normal olarak, betonun ilk günlerinde yer almaktadır. O nedenle, betonun içerisinde yeterli miktarda suyun ve sıcaklığın bulunması, özellikle, betonun ilk günleri için büyük önem taşımaktadır. Betonun, özellikle ilk günlerinde, yeterince hidratasyon yapabilmesini sağlayabilmek üzere, betonun içerisinde yeterli miktarda suyun ve sıcaklığın bulundurulması ve bu ortamın korunması işlemi, betonun kürü olarak anılmaktadır [19].

1.6. Betona Uygulanan Kür Yöntemleri

Betonun içerisinde hidrasyon için yeterli miktarda su ve sıcaklık için bulundurulabilmesi amacıyla değişik kür yöntemleri geliştirilmiştir.

Genellikle uygulanmakta olan kür yöntemlerini iki ana grup altında sıralayabilmek mümkündür:

- Betonun ıslak durumda kalabilmesini sağlayabilmek için uygulanan kür yöntemleri
- Beton yüzeyini ince bir zar ile örterek, buharlaşmayı önlemek amacıyla uygulanan yöntemlerdir.

Kür için hangi yöntemin kullanılması gerektiği, kür suyunun ve kür için kullanılan diğer malzemelerin bulunabilirliğine ve o nedenle, kür yönteminin ekonomik olmasına bağlıdır.

Su kullanarak uygulanan kür yöntemlerinde; suyun temiz olmasına, betonla zararlı kimyasal reaksiyonlara girecek veya beton yüzeyinde lekelenmeler oluşturacak miktarda zararlı maddeler içermemesine dikkat edilmelidir [19].

1.6.1. Betonun Islak Durumda Kalabilmesini Sağlayabilmek İçin Uygulanan Kür Yöntemleri

Betonun ıslak durumda kalabilmesini sağlayabilmek için uygulanan yöntemlerden bazıları şunlardır:

1. Beton yüzeyinin tamamen su altında kalmasını sağlayacak yöntemler (gölgelendirme yöntemiyle kür),
2. Beton yüzeyine su serpiştirilerek uygulanan kür yöntemi ve
3. Beton yüzeyine bez, talaş, saman gibi malzemelerin serilmesi ve bu malzemelerin ıslak duruma getirilmeleri sağlanarak, beton yüzeyinin ıslak durumda kalabilmesi için uygulanan yöntemlerdir [19].

1.6.1.1. Beton Yüzeyinin Tamamen Su Altında Kalmasını Sağlayacak Yöntemler (Gölgelendirme Yöntemiyle Kür İşlemi)

Betonun tamamen su içerisinde kür edilmesi, betona uygulanan kür yöntemleri arasında en mükemmel sonucu veren yöntem durumundadır. Betonun tamamen su içerisinde kür edilebilmesi yöntemi, beton numunelerini veya bazı ön döküm beton elemanlarını su ile dolu bir havuz içerisine yerleştirmek suretiyle gerçekleştirilebilmektedir. Ancak, yapıdaki betonun tamamen su içerisinde bulundurulabilmesi elbette mümkün değildir.

Yüzeyi yatay olan yol, köprü, düz çatı veya döşeme betonlarının üst yüzeylerinin tamamen su altında bırakılabilmesi için, beton yüzeyinde geçici olarak sığ bir havuz oluşturulmaktadır. Bu amaçla betonun üst yüzeyinin kenar

kısımlarına 5-10 cm yükseklikte toprak, kum veya uygun bir malzemenin yığılmasıyla alçak duvarlar yapılmakta ve beton yüzeyinde oluşturulan havuz su ile doldurulmaktadır.

Beton yüzeyinde geçici bir havuz oluşturulmasıyla betonun kür edilmesi yöntemi, zaman alıcı ve fazla iş gücü gerektiren bir uygulamadır. O bakımdan, bu uygulamanın pratikliği ve ekonomikliği tartışılabilir durumdadır [19].

1.6.1.2. Beton Yüzeyine Su Serpiştirilerek Uygulanan Kür Yöntemi

Betonun kür edilmesinde çok başarılı sonuçlar veren yöntemlerden birisi, beton yüzeyinin sulandığı yöntemdir. Sulama işlemi, adeta çim sular gibi gerçekleştirilebilmektedir.

Beton yüzeyini sularken, suyun beton yüzeyini bozacak kadar yüksek bir basınçla veya beton yüzeyini aşındıracak tarzda uygulanmamasına dikkat edilmelidir.

Sulama işlemi kesintisiz olarak olduğu gibi, belirli zaman aralıklarıyla da uygulanabilmektedir. Ancak, beton yüzeyinin kesintisiz olarak sulanması, betonda daha iyi sonuçlar vermektedir. Beton yüzeyi kür uygulandığı sürece kuru durumda bırakılmamalıdır.

Su serpiştirme yoluyla betonun kür edilmesi yöntemini, sadece yatay yüzeylere değil, yatay olmayan yüzeylere de uygulayabilmek mümkündür. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, sulama işlerinde çok fazla miktarda suyun kullanılması ve o nedenle ekonomiyi etkilemesi olarak belirtilebilmektedir [19].

1.6.1.3. Beton Yüzeyine Serilen Islak Malzemelerle Beton Yüzeyinin Islak Tutulması

Kür yöntemleri arasında en popüler olanı, beton yüzeyine su emebilen çuval bezi veya pamuklu kumaşların serilmesi ve bu bezlerin ıslatılmasıyla, beton yüzeyinin ıslak tutulmasını sağlayan yöntemdir.

Serilen bezin kalınlığı ne kadar çok olur ise, ıslak durumda kalabilme süresi de daha uzun olabilmektedir. O nedenle, çuval bezi gibi malzemeler, bazen iki veya üç kat oluşturacak şekilde serilmektedir. Pamuklu kumaşların su emebilme ve su tutma kapasiteleri diğer bezlere oranla daha yüksektir. Kür işlemi süresince, beton yüzeyine serilen bez kuru tutulmamalı, zaman zaman sulanarak, ıslaklığı korunmalıdır.

Beton yüzeyine bazen odun talaşı veya saman gibi maddeler de serilip ıslatılmakta ve beton yüzeyi ıslak tutulabilmektedir. Beton yüzeyine serilen bu tür malzemelerin kalınlığı 10-15 cm kadardır [19].

1.6.2. Beton Yüzeyini Bir Zar ile Örterek Buharlaşmayı Önleyen Kür Yöntemleri

Betonun içerisindeki buharlaşmayı önlemek amacıyla beton yüzeyinde bir zar oluşturmak üzere uygulanan kür yöntemleri şunlardır:

1. Beton yüzeyinin plastik malzemeden veya su geçirmeyen kağıttan yapılmış örtülerle kaplanarak buharlaşmasının azaltılmasını sağlayan yöntemler ve
2. Beton yüzeyine bitümlü veya parafin esaslı sıvı kimyasal malzemelerin sürülmesiyle buharlaşmanın azaltılmasını sağlayan yöntemlerdir [19].

1.6.2.1. Beton Yüzeyinin Plastik Malzemeden veya Su Geçirmeyen Kağıttan Yapılmış Örtülerle Kaplanması

Beton yüzeyinin minimum 0.10 mm kalınlıktaki plastik bir örtü veya iki katlı bir kraft kağıdı ile örtülerek kür edilmesi yöntemi oldukça rağbet gören bir yöntemdir. Bunun nedeni, bu tür malzemelerin kolayca uygulanabilir olmasına ve yöntemin uygulanmasında fazla işçilik gerekmemesine dayanmaktadır.

Beton yüzeyine örtülecek plastik malzemeler, değişik renklerde olabilmektedir. Siyah renkteki plastikler nispeten daha ucuz olmakla birlikte, güneş ışınlarını daha çok emebilmektedir. Beyaz renkteki plastikler ise, güneş ışınlarını yansıtmaktadırlar.

Beton yüzeyinin görünüşünün çok önemli olduğu durumlarda, kür için, plastik malzemelerin kullanılması tercih edilmemektedir. Zira, bu tür örtüler beton yüzeyinde, hafif de olsa, bir renk farkına neden olabilmektedir.

Plastik örtüler, beton yerleştirildikten hemen sonra (beton yüzeyi ıslak iken) mümkün olan en kısa zaman içerisinde serilmektedir. Uygulama işleminde, plastik örtü kırıksız olarak yerleştirilmelidir. Aksi takdirde, beton yüzeyinde renk farkı oluşmaktadır.

Beton yüzeyine yerleştirilen ince örtünün konumunu koruyabilmek amacıyla, örtünün üstüne, kenarlarda belirli noktalara, kumdan veya topraktan ağırlıklar konulmaktadır. Döşemelerin ve diğer yatay yüzeyli betonların üstüne serilen örtüler, bu betonların kenarlarından aşağıya doğru (beton kalınlığının en az iki misli uzunlukta) sarkıtılmaktadır [19].

1.6.2.2. Beton Yüzeyine Sıvı Kimyasal Maddeler Uygulanması Yöntemi

Betondaki suyun buharlaşmasını önlemek amacıyla sıkça kullanılan yöntemlerden birisi de, beton yüzeyinin sıvı durumdaki parafin esaslı kimyasal maddelerle, reçinelerle veya bitümlü malzemelerle kaplanmasıdır.

Kür için kullanılan kimyasal maddeler mümkün olduğu kadar üniform

kalınlık oluşturacak şekilde (0.20-0.25 litre/m² ölçüsünde) uygulanmaktadır. Uygulama elle veya püskürtücü aletler yardımıyla yapılmaktadır.

Kimyasal kür maddelerini uygulamaya başlamak için, beton yerleştirildikten sonra bir süre beklemek gerekmektedir. Bekleme süresi, betondaki terlemenin sona erebileceği süre kadar (yaklaşık olarak beton yüzeyindeki parlaklığın sona erdeği süre kadar) uzunluktadır. Betondaki terleme devam ederken beton yüzeyindeki gözeneklerin kapatılması durumunda, betonun üst kısımları zayıf ve gözenekli olmaktadır. Öte yandan, kimyasal kür maddelerinin uygulanmasına başlamak için beklenen süre çok uzun olduğu ve beton kuruduğu takdirde, beton yüzeyine uygulanan maddelerin bir miktarının beton tarafından emilme durumu ortaya çıkmaktadır [19].

1.7. Kürün Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi

Atış ve diğ. [20] silis dumanlı betonun kuru ve ıslak kür koşullarındaki basınç dayanımını incelemişlerdir. Su-çimento oranları 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 olan, 350, 400 ve 450 kg/m³ dozajlarında portland çimentolu beton ve %10, %15, %20 oranlarında çimento ile yer değiştirmiş silis dumanı kullanılarak 48 adet beton üretilmiştir. İşlenebilirliği sabit tutmak için de değişik miktarlarda hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Taze betondan üretilen 3 küp numune kalıptan çıkarıldıktan bir gün sonra 20± 2 °C,,de %65 bağlı nem oranında (kuru kür), diğer üç küp numune ise 20± 2°C,,de %100 bağlı nem oranında (yaş kür) basınç dayanımı deneyine kadar 28 gün boyunca kür edilmişlerdir. Basınç dayanımları portland çimentolu beton ile silis dumanlı beton arasında ve silis dumanlı betonların kendi arasında karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarından kuru küre tabi tutulan silis dumanlı betonun, portland çimentolu betona göre daha çok etkilendiği anlaşılmaktadır. Kuru küre tabi tutulan silis dumanlı beton, yaş küre tabi tutulan silis dumanlı betona göre ortalama %13 oranında daha düşük dayanım göstermiştir. Su-çimento oranındaki artma, betonu kuru kür koşullarında daha hassas hale getirmiştir. Silis dumanlı betonun, silis oranının artması sonucu kuru kür koşullarından daha çok etkilenmesine sebep olmuştur. Ayrıca portlandlı ve silis dumanlı betonlarda ıslak ve kür koşullarında, basınç dayanımı bakımından lineer bir ilişki saptanmıştır. Basınç dayanımı sonuçları yüzde olarak Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Atış ve diğ. [20] çalışmasında basınç dayanımı oranları ve basınç dayanımları arasındaki farklar

Karışım	Kuru Kür/İslak Kür (%)					Farklılık(%)			
	S/Ç →	0.3	0.4	0.5	0.6	0.3	0.4	0.5	0.6
CP-350-00		98.8	95.5	99.2	94.9	1.2	4.5	0.8	5.1
SH-350-10		88.3	87.9	89.2	84.5	11.7	12.1	10.8	15.5
SH-350-15		90.9	96.1	86.2	88.7	9.1	3.9	13.8	11.3
SH-350-20		83.2	96.5	84.5	85.4	16.8	3.5	15.5	14.6
CP-400-00		99.7	93.6	94.0	89.7	0.3	6.4	6.0	10.3
SH-400-10		90.1	81.8	80.9	74.8	9.9	18.2	19.1	25.2
SH-400-15		89.0	87.1	82.2	75.8	11.0	12.9	17.8	24.2
SH-400-20		84.5	85.9	76.7	82.9	15.5	14.1	23.3	17.1
CP-450-00		98.9	90.4	83.7	82.5	1.1	9.6	16.3	17.5
SH-450-10		89.6	89.5	72.2	80.0	10.4	10.5	27.8	20.0
SH-450-15		96.2	87.3	82.5	76.1	3.8	12.7	17.5	23.9

Jianyong ve Pei [21] betonun basınç dayanımını incelemek için dört çeşit beton üretmişlerdir. Birincisine kontrol betonu veya beton A denmiştir. Diğer üç çeşit beton çimento ile %25 oranında yüksek fırın cürufu ve silis dumanı yer değiştirilerek yapılmıştır. İkinci tip beton çimento ile %15 oranında silis dumanı ve %10 oranında yüksek fırın cürufu yer değiştirilerek yapılmıştır ve beton B olarak adlandırılmıştır. Üçüncü tip beton çimento ile %10 oranında silis dumanı ve %15 oranında yüksek fırın cürufu yer değiştirilerek üretilmiştir ve beton C olarak adlandırılmıştır. Dördüncü tip beton ise çimento ile %5 oranında silis dumanı ve %20 oranında yüksek fırın cürufu yer değiştirilerek üretilmiştir ve buna beton D denmiştir.

Çimento olarak portland çimentosu-52.5, katkı maddesi olarak yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmıştır. Kaba agregası olarak maksimum tane çapı 30 mm olan çakıl, ince agregası olarak silika kumu kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı olarak kuru naftalin tozu ve ayrıca su indirgeyici katkı maddesi kullanılmıştır.

Basınç dayanımı için 10x10x10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Üç günün sonunda beton A; beton B, beton C ve beton D'ye göre basınç dayanımı yüksek çıkmıştır. Buna göre üç günden fazla kürün katkılı beton için ne kadar gerekli olduğu ortaya çıkmıştır. Yedi günden sonraki kür durumunda dört tip beton da yaklaşık eşit basınç dayanımına ulaşmıştır. 28 günlük ve 50 günlük kür

koşullarında yüksek fırın cürufu ve silis dumanının reaktivitesi hızlı bir şekilde arttığından beton B, beton C ve beton D; beton A'ya göre daha yüksek basınç dayanımına ulaşmıştır. Beton B ve beton C de beton D, ye göre daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Bunun nedeni de silis dumanının oranıdır. Elli günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre 84.1 MPa ile beton B birinci, 82.4 MPa ile beton C ikinci, 77.5 MPa ile beton D üçüncü ve 73.2 MPa ile beton A veya kontrol betonu sonuncu olmuştur. Çizelge 5'te betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve kopma dayanımları verilmiştir.

Bu sonuçlara göre çimento ile %10-%15 oranlarında yer değiştirilen yüksek fırın cürufu ve silis dumanının betonun çökme miktarını değiştirmeden, betonu yüksek basınç dayanımına ulaştırdığı gözlenmiştir.

Çizelge 5. Jianyong ve Pei [21]'nin çalışmasında basınç, yarmada çekme ve kopma dayanımları (MPa)

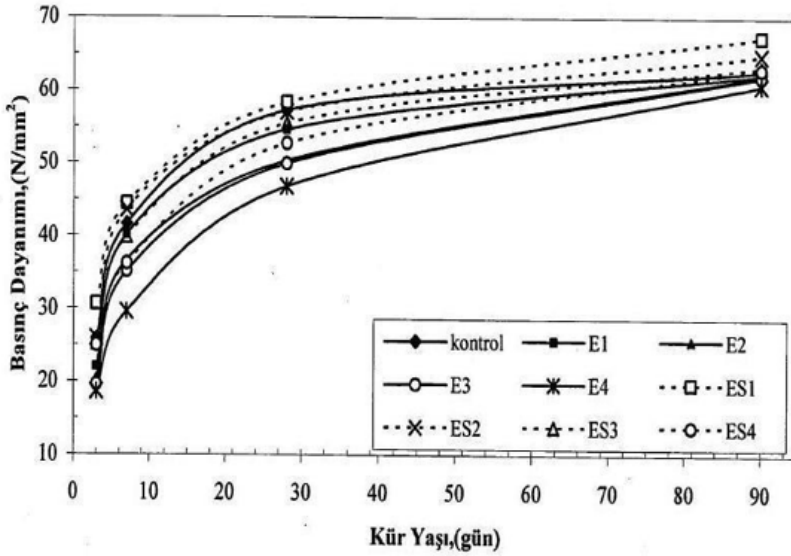
Kür Yaşı	Beton A	Beton B	Beton C	Beton D
3 Gün	43.1	36.1	34.8	34.5
7 Gün	51.5	52.6	50.5	48.2
28 Gün	64.5	77.7	75.1	68.7
50 Gün	73.2	84.1	82.4	77.5

Beton	A	B	C	D
3 Günlük YÇD	4.11	3.34	3.42	3.25
YÇD/BD	0.095	0.093	0.098	0.094
7 Günlük YÇD	4.29	4.14	4.16	4.10
YÇD/BD	0.083	0.080	0.092	0.085
28 Günlük YÇD	4.84	6.18	6.09	5.32
YÇD/BD	0.075	0.080	0.081	0.077
50 Günlük YÇD	5.13	6.49	6.28	5.81
YÇD/BD	0.070	0.077	0.076	0.075

Beton	A	B	C	D
3 Günlük KD	6.61	7.14	6.52	5.87
KD/BD	0.153	0.198	0.187	0.170
7 Günlük KD	7.38	9.32	8.40	7.64
KD/BD	0.143	0.181	0.166	0.159
28 Günlük KD	8.40	11.44	10.56	9.28
KD/BD	0.130	0.147	0.141	0.135
50 Günlük KD	9.20	11.68	11.16	10.40
KD/BD	0.126	0.139	0.135	0.134

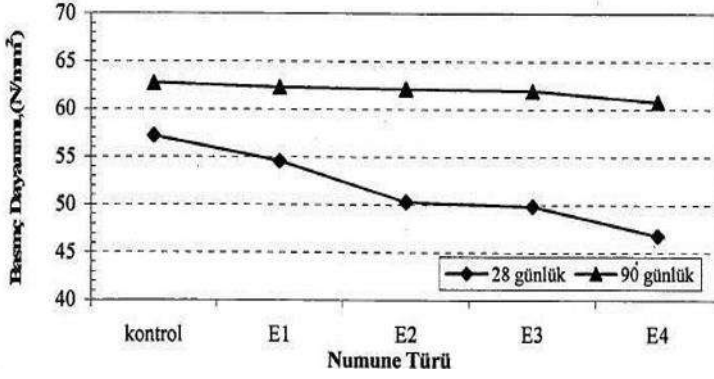
Yazıcıoğlu ve Demirel [22]'in yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda; betona çimento ile yer değiştirerek belirli oranlarda doğal puzolan özelliğine sahip öğütülmüş Elazığ yöresine ait pomzanın ilave edilmesinin dayanımı düşürdüğü görülmüştür. Fakat bu düşme, kür yaşı ile ters orantılı bir seyir izlemektedir. Kür yaşı arttıkça pomzanın puzolanik aktivite göstermesi ile düşüşteki fark büyük ölçüde kapanmaktadır.

Özellikle erken yaşlarda, çimento azaltılarak pomza katılması ile meydana gelen dayanım düşmesi, beton dayanımına erken yaşlarda çok daha fazla katkı sağlayan silis dumanının kullanılmasıyla engellenmiştir. Şekil 2'de kür yaşına göre tüm serilerin beton basınç dayanımları, Şekil 3'te basınç dayanımının kür yaşıyla değişimi ve Şekil 4'te silis dumanının basınç dayanımına yaptığı katkı gösterilmiştir.

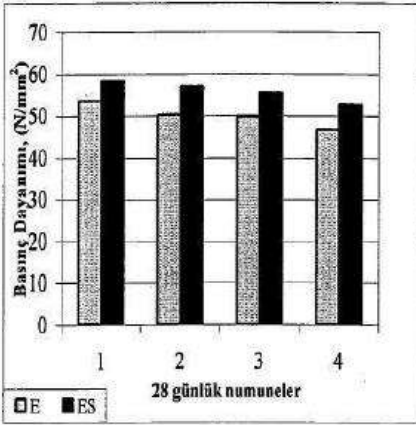


(E: Katkı maddesi olarak Elazığ pomzası kullanılarak yapılmış beton, ES: Katkı maddesi olarak Elazığ pomzası ve silis dumanı birlikte kullanılarak yapılmış beton)

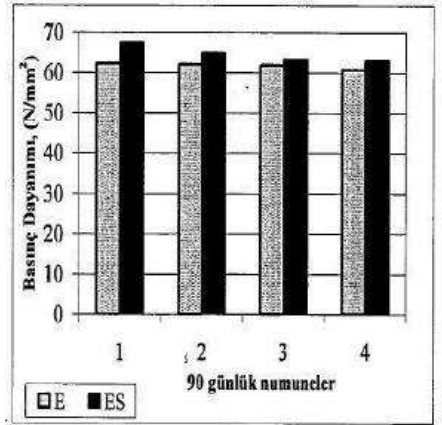
Şekil 2. Yazıcıoğlu ve Demirel[22]'in çalışmasında kür yaşına göre tüm serilerin beton basınç dayanımları



Şekil 3. Yazıcıoğlu ve Demirel [22]’in çalışmasında basınç dayanımının kür yaşıyla değişimi



(a)



(b)

Şekil 4. Yazıcıoğlu ve Demirel [22]’in çalışmasında silis dumanının basınç dayanımına yaptığı katkı

Yazıcıoğlu ve Bozkurt [23]'un çalışmasında ultrasonik test sonuçları incelendiğinde beton serilerinin sesüstü dalga geçiş hızlarından nasıl bir dayanım özelliği sergileyeceği konusunda genel bir yargıya varılabilir. Farklı mineral katkılarıyla oluşturulan betonların (kb, sdb, ukb) p dalga hızları kullanılan katkının niteliğine göre değişiklik göstermiştir. 90 günlük kür süresi boyunca p dalga hızı testinde en iyi neticeyi sdb numuneleri vermiştir. Silis dumanı katkısının nitelik ve aktivasyonunun uçucu külden yüksek olması dolayısıyla p dalga hızları daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca sd parçacık boyutu, çimento parçacık boyutundan çok daha küçük olduğu için agrega çimento ara yüzeyinde puzolanik aktiviteden daha önemli dolgu etkisi gerçekleştirerek daha yoğun bir agrega-bağlayıcı arayüzeyi oluşturmuştur. Ukb numunelerinin p dalga hızının daha düşük çıkmasının nedeni de buna benzer bir etkendir. Uk aktivasyonunun zayıf olması ve ortalama parçacık boyutunun bağlayıcı ve sd'den daha kaba olmasından dolayı erken yaşlarda beklenen etkiyi sergilememiştir. 90 günlük yaş ile birlikte uk, hidrataasyon reaksiyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireçle reaksiyona girerek puzolanik aktivite ve filler etkisi göstermiştir (kb: kontrol betonu, sdb: silis dumanlı beton, ukb: uçucu küllü beton).

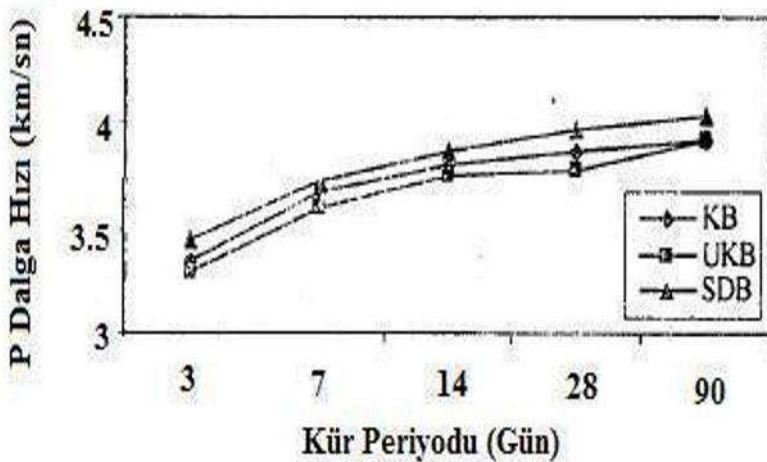
Betonun içerisinde geçen p dalgasının hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak, p dalgasının hızı ile betonun yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, p dalgasının betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça p dalga hızı daha düşük olmaktadır. Bu durum sd parçacıklarının, betonu doldurma kapasitesinin yüksek olması ile açıklanabilir. Böylece sdb serisinin daha iyi mekanik özellikler sergileyeceği görülür. Kb serisi bağlayıcı içeriği bakımından 28 günlük küre kadar ukb serisinden daha zengin olduğu için, ukb serisinden daha iyi sonuç vermiştir. 90 günlük süresi sonrasında ise ukb serisi sonuçları kb serisine yaklaşmıştır.

28 günlük su kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı sdb numunelerinde ve bunu takiben kb numunelerinde gözlenirken; en düşük basınç dayanımı sonuçları ukb numunelerinde gözlenmiştir. Silis dumanı ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanım artışı oranı, kontrol betonuna göre yaklaşık olarak %7,5'tir. Beton serilerinin 90 günlük kür süresi sonrasında en yüksek basınç dayanımlarını sdb serisi vermiştir. Kb ve ukb serileri ise birbirine yakın dayanım sonuçları vermiştir. 90 gün kür edilmiş kb ve ukb serilerinin basınç dayanım artışı oranı 28 gün kür edilmiş serilere göre sırasıyla %12,4 ve %31,7'dir. Pomza agregası ve mineral katkılarla LC 25/28 sınıfında beton dayanımları elde edilmiştir.

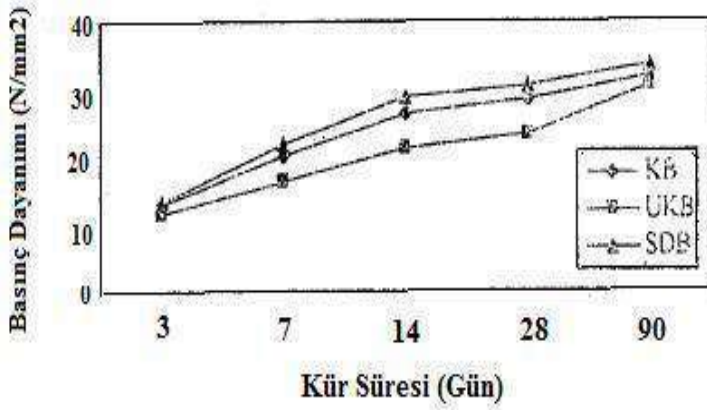
Diğer taraftan bu katkıların beton karışımında kullanılmasıyla çevre kirliliğinin azalmasına da katkıda bulunacağı açıktır. Bu sınıfta üretilecek olan taşıyıcı hafif betonlar deprem dayanımı açısından uygun sınırlar içinde olmakla birlikte hafiflik avantajıyla da depremin yıkıcı etkilerine karşı faydalı olacaktır.

Kırılma erken yaşlarda agrega-bağlayıcı ara yüzeyinde oluşurken, sonraki yaşlarında ise kaba agregalarda oluştuğu sonucu ortaya çıkmaktadır. 28 günlük yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda en iyi dayanımı sdb serisi gösterirken en kötü dayanımı ise ukb serisi vermiştir. Ancak ukb serisi 90 günlük kür süresi sonrasında kb serisinden daha iyi yarmada çekme dayanımı gelişimi göstermiştir.

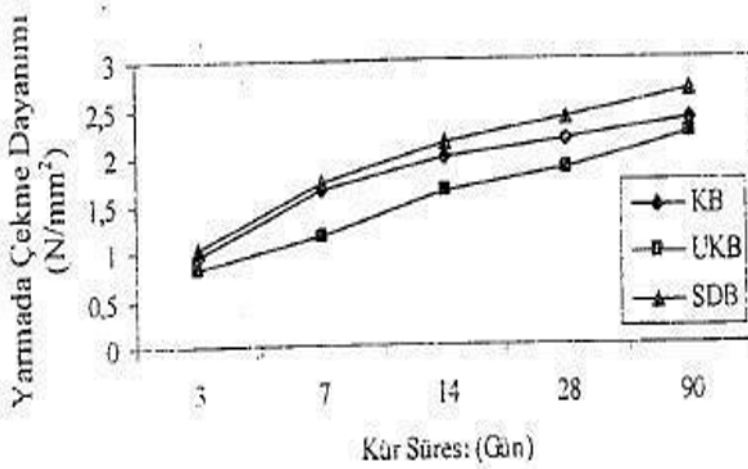
Katkı tipine bakılmaksızın basınç dayanımı arttıkça yarmada çekme dayanımı da artmıştır. Fakat yarmada çekme dayanımındaki artış oranı basınç dayanımına göre daha az olmuştur. Bu durum basınç ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişkinin lineer olmadığını gösterir. Kullanılan katkı tipleri göz önüne alınarak sonuçlar incelendiğinde erken yaşlarda kb ve sdb serilerinin eğrileri birbirine çok yakın özellikler göstermiştir. 20 N/mm² basınç dayanımından sonra ise eğriler arasındaki fark giderek artmıştır. Ukb serisi ise erken yaşlarda kb serisinden daha düşük özellikler gösterirken, 25 N/mm² basınç dayanımı değerinden sonra kb serisi ile benzer özellikler sergilemiştir. Şekil 5'te hafif agregalı beton serilerinin zamana bağlı P dalga hızı değişim grafiği, Şekil 6'da hafif agregalı betonların kür süresine bağlı basınç dayanımı değişimi grafiği, Şekil 7'de hafif agregalı betonların kür süresine bağlı yarmada çekme dayanımı değişimi grafiği ve Şekil 8'de beton serilerinin basınç ve yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması gösterilmiştir.



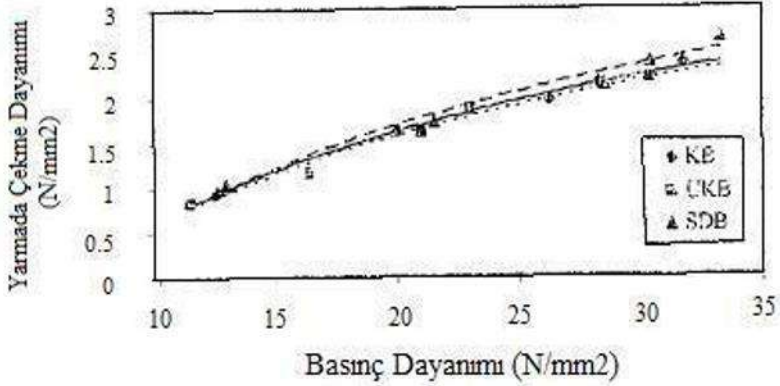
Şekil 5. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [23]'ün çalışmasında hafif agregalı beton serilerinin zamana bağlı P dalga hızı değişimi



Şekil 6. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [23]'ün çalışmasında hafif agregalı betonların kür süresine bağlı basınç dayanımı değişimi



Şekil 7. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [23]'ün çalışmasında hafif agregalı betonların kür süresine bağlı yarmada çekme dayanımı değişimi



Şekil 8. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [23]'ün çalışmasında beton serilerinin basınç ve yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması

Yılmaz [24]'ün yaptığı “çeşitli çimentolarla üretilen harçlar için olgunluk fonksiyonlarının geçerliliğinin araştırılması” çalışmasında katkılı çimentolar, 3 farklı puzolanın %5, %20, %40 oranında yer değiştirmesiyle elde edilmiştir. TS 24 (TS EN 196-

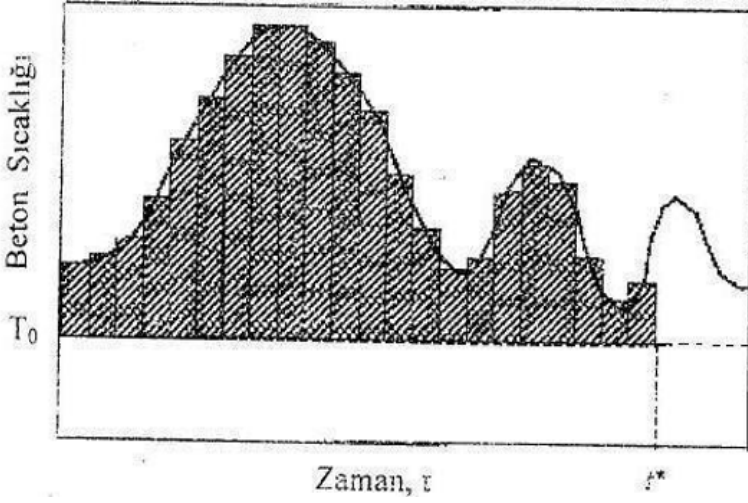
1) [25]'e göre üretilen harç numunelerinin 5, 20 ve 40 °C'de bakımı yapıldıktan sonra 2, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı değerleri bulunmuştur ve bu değerlerle olgunluk arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Yerleştirilmiş betonun sıcaklık geçmişi zamanla birlikte sürekli ölçülerek olgunluk hesaplanır. Olgunluk-dayanım ilişkisinin bilinmesi yapının yerinde dayanımını tahmin etmek için önemlidir.

İlk olgunluk fonksiyonu, farklı yüksek sıcaklıklarda bakımı yapılan betonun dayanım gelişimi üzerindeki zaman ve sıcaklığın etkisi göz önüne alınarak Nurse-Saul [26] tarafından önerilmiştir.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Burada; M: olgunluk indeksi (°C-gün veya °C-saat), T: Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°C), T_0 : temel alınan sıcaklık (°C) , Δt : beton sıcaklığının T °C'de kaldığı süre (gün veya saat), t: zaman (gün veya saat) olarak ifade edilir. Betonun maruz kaldığı sıcaklık değişimi ve sıcaklık-zaman faktörü şematik olarak Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9. Yılmaz [24]’ın çalışmasında betonun maruz kaldığı sıcaklık değişimi ve eşitlik 1’e göre hesaplanan sıcaklık-zaman faktörü

1977 yılında Freiesleben, Hansen ve Pedersen [27] betonun kaydedilen sıcaklık değişimini kullanarak yeni bir olgunluk indeksi önermiştir. Bu fonksiyon, Arrhenius denklemini temel alan kimyasal reaksiyonların hızına sıcaklığın etkisini tanımlamak için kullanılmıştır. Bu yeni fonksiyon, betonun „eşdeğer yaştan“ hesaplanmasına dayanmaktadır.

$$t_s = \sum_0^t (e^{E/R(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})}) \Delta t \quad (2)$$

Burada; t_s : Referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş, T : Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$), E : Görünür aktivasyon enerjisi (J/mol), R : Evrensel gaz sabiti ($8.314 \text{ J/mol} \cdot ^{\circ}\text{K}$), T_r : Referans sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$) olarak ifade edilir.

Olgunluk-dayanım arasında birçok fonksiyon önerilmiştir. Bunlardan en popüler olanı 1956 yılında Plowman [28] tarafından önerilen yarı logaritmik bir fonksiyondur.

$$S = a + b \times \log M \quad (3)$$

Burada; S : Dayanım, M : Olgunluk indeksi, a, b : Regresyon katsayıları olarak ifade edilmektedir. Kullanımı oldukça basit olan bu denklemde herhangi bir sınır dayanım değeri yoktur.

Bu araştırmada, deneysel çalışmalar ASTM C 1074 [29] ve TS 24 (TS EN 196-1)’e göre yapılmıştır. Çalışmada, tek tip portland çimentosu (PÇ 42,5) ve

katkılı çimento üretimi için tras, kalker ve uçucu kül kullanılmıştır. Belirtilen katkıların ağırlıkça %5, %20,

%40 oranında portland çimentosu ile değiştirilmesi ile 9 adet katkılı çimento oluşturulmuştur. Böylece, toplam 10 adet çimento numunesi üzerinde olgunluk dayanım ilişkileri incelenmiştir. TS 24,,e göre üretilen harç numuneleri 5 °C, 20 °C, 40 °C’de bakımı yapılmış ve 2, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları bulunmuştur. Eşitlik 1 ve eşitlik 2 kullanılarak bulunan olgunluk değerleri ile dayanım değerleri arasındaki ilişki ele alınmış ve uygunluğu araştırılmıştır.

Dayanım-olgunluk arasındaki ilişkilere bakıldığında, literatürde belirtildiği gibi düşük sıcaklıkta bakımı yapılmış betonların dayanımları düşük olgunluk değerleri için yüksek sıcaklıktaki bakım yapılmışlara göre düşük, yüksek olgunluk değerleri için daha yüksek dayanıma sahip oldukları %20 ve %40 Soma B uçucu kül katkılı çimento ve %20 tras katkılı çimentolarda görülmektedir. %40 tras katkılı çimento, yüksek bakım sıcaklıkları için yüksek, düşük bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi göstermektedir. PÇ 42,5 ve diğer katkılı çimentolarda düşük bakım sıcaklıkları için yüksek, yüksek bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi görülmektedir.

Eşdeğer yaş fonksiyonu Nurse-Saul fonksiyonu ile benzer davranışlar göstermektedir. Eşdeğer yaş fonksiyonu için hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri istenilen düzeydedir.

Güneyisi, Özturan ve Gesoğlu,,nun [30] yaptığı çalışmada TS EN 197-1 [31] standardına göre üretilen benzer kodlu portland kompoze çimentoları (CEM II/B-M) 2 farklı üreticiden temin edilmiştir. Bu çimentolar kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımı ve hızlandırılmış klorür geçirimsizliği gibi performans özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. 0,45 ve 0,65 s/ç oranlarında üretilen betonlar 3 değişik kür koşulunda saklanmıştır. Birinci kür koşulunda numuneler deney zamanına kadar kontrolsüz küre (sürekli havada) maruz bırakılmışlar; ikinci kür koşulunda numuneler deney zamanına kadar kontrollü kürde (ilk 7 gün suda ve daha sonra deney zamanına kadar 20±2 °C sıcaklığa ve %50±5 bağıl neme sahip kür odasında) saklanmışlardır; üçüncü kür koşulunda ise numuneler deney zamanına kadar 20±2 °C sıcaklığa sahip su havuzlarında bekletilmiştir (standart kür ortamı). Deneyler 28, 90 ve 180 günlük kür süreleri sonunda gerçekleştirilmiştir.

İki farklı üreticiden temin edilen çimentoların birine C1, diğerine ise C2 denilmiştir. C1 çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımları kür koşuluna, s/ç oranına ve beton yaşına bağlı olarak 27 MPa ile 55 MPa arasında değişirken, C2 çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımları 19 MPa ile 48 MPa arasında değişmektedir. Kür koşullarının iyileşmesi, s/ç oranının düşmesi ve kür süresindeki uzama her iki çimento ile üretilen betonların basınç dayanımlarının

önemli düzeyde artmasına neden olmuştur. Basınç dayanımındaki bu artış oranları, C1 çimentosu ile üretilen yüksek s/ç oranındaki betonlar için kontrolsüz küre ve 28. güne oranla kürün iyileşmesi ve beton yaşının artmasıyla yaklaşık 1,30 kata, düşük s/ç oranındaki betonlar için ise yaklaşık 1,26 kata varmaktadır. Bu oranlar C2 çimentosu ile üretilen betonlar için ise sırasıyla 1,57 ve 1,27 değerlerini almıştır. Ayrıca C1 çimentosu ile üretilen betonların basınç dayanımları bütün koşullarda C2 ile üretilen betonların sahip oldukları basınç dayanımı değerlerinden daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

Betonların klorür geçirimsizlik değerleri C1 çimentoları için 706 ile 9345 coulomb arasında değişirken, C2 çimentolu betonlar için 1383 ile 9773 coulomb arasında değişmekte olduğu tespit edilmiştir. Bunlara karşılık gelen geçirimsizlik düzeyleri ise C1 ve

C2 çimentoları kullanılarak üretilen betonlar için sırasıyla „Çok düşük“ ile „Yüksek“ ̈Orta“ ile „Yüksek“ olduğu görülmektedir. Kür koşullarının iyileşmesi, s/ç oranının düşmesi ve kür süresindeki uzamanın her iki çimento ile üretilen betonların klorür geçirimsizliğini önemli ölçüde düşürdüğü, ancak bu iyileşmenin basınç dayanımındaki iyileştirme oranlarından daha anlamlı düzeyde olduğu görülmüştür. Basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi, bütün koşullarda C1 çimentolu betonlar C2 çimentolu betonlara kıyasla daha düşük klorür geçirimsizlik değerlerine sahiptirler.

C1 çimentolu betonların basınç dayanımları C2 çimentolu betonlarınkine göre kür koşuluna bağlı olarak yaklaşık 1,1 ile 1,5 kata kadar daha yüksek değerlere sahip olmuşlardır. Benzer şekilde hızlandırılmış klorür geçirimsizlik özellikleri karşılaştırıldığında, C1 çimentolu betonlar C2 çimentolu betonlara kıyasla kür koşullarına bağlı olarak yaklaşık 1,0 ile 2,4 kata kadar daha düşük geçirimsizlik değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, standart kür koşulları altında aradaki performans farkının özellikle klorür geçirimsizliği açısından daha da açıldığı görülmektedir. Bu performans farkının oluşmasına, çimentoların hemen her yönden tamamen benzer iken, bileşim özelliklerindeki farklılıklarının, yani C1 „de yüksek fırın cürufu ve C2“de ise kalker katkı maddesi katılmasının neden olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 6“da AASHTO T 277 [32] (veya ASTM C1202)“ye göre betonların klorür geçirimsizliğinin niteliksel olarak sınıflandırılması, Çizelge 7“de betonların basınç dayanımları, Çizelge 8“de betonların klorür geçirimsizlik değerleri ve karşılık gelen klorür geçirimsizlik düzeyleri, Şekil 10“da C1 ve C2 çimentoları ile üretilen ve kontrolsüz küre tabi tutulan betonların basınç dayanımlarının zamanla değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 6. AASHTO T 277 [32] (veya ASTM C1202)“ye göre betonların klorür geçirirnililiğinin niteliksel olarak sınıflandırılması

Geçen elektrik miktarı (coulombs)	Klorür geçirirnililik düzeyi	Beton tipi
>4000	Yüksek	Yüksek s/ç oranı (>0.6)-Portland çimentolu beton
2000-4000	Orta	Orta s/ç oranı (0.4-0.5)-Portland çimentolu beton
1000-2000	Düşük	Düşük s/ç oranı (<0.4)-Portland çimentolu beton
100-1000	Çok Düşük	Lateks modifiyeli, boşlukları doldurulmuş beton
<100	İhmal edilebilir	Polimer emdirilmiş beton, polimer betonu

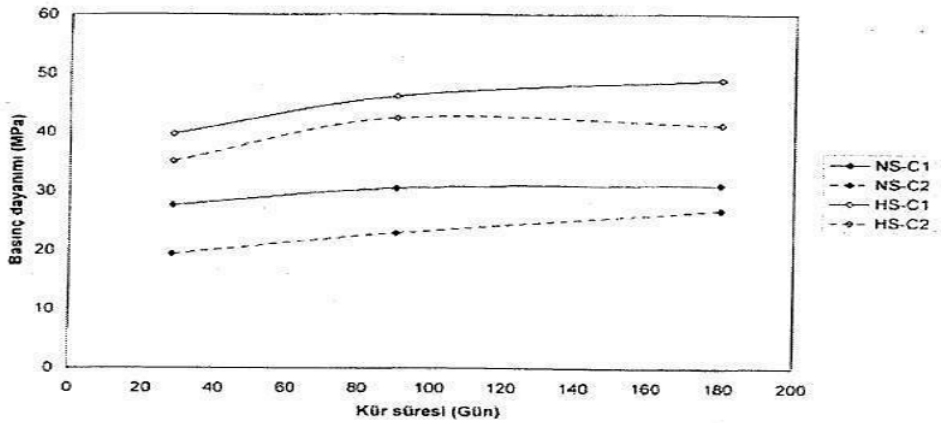
Çizelge 7. Güneyisi, Özturan ve Gesoğlu [30]“nun çalışmasında betonların basınç dayanımları

Beton kodu	Kür koşulu	Basınç dayanımı (MPa)		
		28 gün	90 gün	180 gün
NS-C1	UC	27.6	30.5	31.1
HS-C1	UC	39.7	46.1	48.9
NS-C1	CC	28.7	33.4	37.2
HS-C1	CC	43.9	52.7	55.1
NS-C1	WC	31.6	36.4	40.0
HS-C1	WC	47.9	52.3	54.8
NS-C2	UC	19.4	22.9	26.8
HS-C2	UC	35.1	42.4	41.2
NS-C2	CC	22.0	25.5	30.5
HS-C2	CC	40.3	44.0	51.3
NS-C2	WC	21.1	31.0	33.2
HS-C2	WC	44.8	47.0	47.6

(NS: Normal dayanımlı beton, HS: Yüksek dayanımlı beton, UC: Kontrolsüz kür, CC: Kontrollü kür, WC: Su kürü)

Çizelge 8. Güneyisi, Özturan ve Gesoğlu [30]’nın çalışmasında betonların klorür geçirimlilik değerleri ve karşılık gelen klorür geçirimlilik düzeyleri

Beton kodu	Kür koşulu	Toplam geçen yük			Klorür geçirimlilik düzeyi		
		28 gün	90 gün	180 gün	28 gün	90 gün	180 gün
NS-C1	UC	9345	7878	7716	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HS-C1	UC	5806	4862	4553	Yüksek	Yüksek	Yüksek
NS-C1	CC	8523	7648	6763	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HS-C1	CC	3820	2786	2616	Orta	Orta	Orta
NS-C1	WC	2215	1396	1128	Orta	Düşük	Düşük
HS-C1	WC	1943	1513	706	Düşük	Düşük	Çok Düşük
NS-C2	UC	9772	9698	9384	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HS-C2	UC	8354	7433	5500	Yüksek	Yüksek	Yüksek
NS-C2	CC	7703	7289	7040	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HS-C2	CC	5780	4044	3767	Yüksek	Yüksek	Orta
NS-C2	WC	4792	3320	2136	Yüksek	Orta	Orta
HS-C2	WC	3223	2971	1383	Orta	Orta	Düşük



Şekil 10. Güneyisi, Özturan ve Gesoğlu [30]’nın çalışmasında kontrolsüz küre tabi tutulan betonların basınç dayanımlarının zamanla değişimi

Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş [33]’ın yaptığı çalışma kapsamında metakaolin miktarının ve uygulanan kür koşullarının betonun basınç dayanımı ve elektriksel direnç özellikleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, metakaolin çimento ile %5, 10, 15 ve 20 oranlarında yer değiştirilerek

beton üretiminde kullanılmıştır. İki farklı su/bağlayıcı oranı (0.30 ve 0.50) seçilerek 10 farklı beton karışımı tasarlanmıştır. Üretilen betonlar su kürü, ıslak çuval kürü, plastik örtü kürü ve hava kürü olmak üzere 4 farklı kür koşuluna tabi tutulmuşlardır. Her bir karışımdan alınan küp numuneler üzerinde 28.gün sonunda basınç dayanımı ve elektriksel direnç deneyleri yapılmıştır.

Bu çalışma kapsamında kullanımı son yıllarda yaygınlaşmakta olan metakaolin çimento ile değişik oranlarda yer değiştirilerek beton üretiminde kullanılmıştır. Bilindiği üzere metakaolin doğal olarak bulunan kaolinin saflaştırılma işleminden sonra 600-800 °C.,de pişirilmesi sonrasında elde edilmektedir. Beyaz renge sahip olan metakaolinin inceliği ise 80000-120000 cm²/g arasında olup beton üzerindeki etkileri bakımından silis dumanına benzetilmektedir. Ancak, silis dumanı endüstriyel bir yan ürün iken metakaolin işlenmiş bir katkı maddesini temsil etmektedir.

Düşük s/b oranlı ve su kürü uygulanan kontrol betonunun basınç dayanımı 74 MPa iken betona değişik oranlarda metakaolinin katılması ile basınç dayanımı 86 MPa seviyesine kadar ulaşmıştır. Benzer şekilde, yüksek s/b oranına sahip ve su kürü uygulanmış kontrol betonunun basınç dayanımı metakaolin kullanılmasıyla 49 MPa „dan 61 MPa değerine ulaşmıştır. Kullanılan metakaolin miktarı %20 mertebesine ulaştığında su kürü uygulanmış düşük ve yüksek s/b oranlı betonun basınç dayanımı sırasıyla %16 ve %26 artış göstermiştir.

Her iki beton tipi için de hava kürü en düşük basınç dayanımlarını vermiştir. Hava kürü uygulanmış yalın betonlarda basınç dayanımı su içinde tutulan numunelere göre yaklaşık %18 daha az iken bu oran metakaolin katkılı betonlarda %33 seviyesine kadar düşmüştür. Burada anlaşıldığı üzere metakaolin katkılı betonlar hava kürünün olumsuz etkisine daha fazla duyarlıdır. Buna karşılık, ıslak çuval kürü ve plastik örtü kürü, su kürüne daha yakın sonuçlar vermiştir. Özellikle ıslak çuval kürü uygulanmış betonların basınç dayanımları %10 sınır değeri içerisinde kalmıştır.

Metakaolin miktarının artması ve s/b oranının düşmesi ile betonun elektriksel direnci önemli oranda artmıştır. Basınç dayanımı sonuçlarında görüldüğü gibi, betona su kürü uygulanması sonucunda en yüksek elektriksel direnç değerleri elde edilmiştir. Su kürü uygulanmış yalın betonların elektriksel dirençleri 11-16 kohm-cm arasında iken metakaolin içeren betonların direnç değerleri metakaolin miktarına bağlı olarak 13-18 kohm –cm arasındadır. Ayrıca, metakaolinin elektriksel direnç üzerindeki etkisi s/b oranına göre değişmektedir. Düşük ve yüksek s/b oranlı betonlarda metakaolin kullanılması ile sırasıyla yaklaşık %13 ve %41 artış tespit edilmiştir. En yüksek elektriksel direnç değerleri metakaolinin %15 veya %20 oranında kullanılması ile elde edilmiştir.

Su kürüne oranla sırasıyla ıslak çuval kürü, plastik örtü kürü ve hava kürü daha düşük elektriksel direnç değerleri vermiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde betona hava kürü uygulanması en olumsuz elektriksel direnç değerlerinin elde edilmesine neden olmuştur. Genel olarak %60 daha düşük direnç değerlerine ulaşılmıştır. Buna karşın, ıslak çuval kürü %15 ve plastik örtü kürü %30 daha düşük sonuçlar vermiştir. Ayrıca, yalın betona kıyasla metakaolin katkıli betonlar uygulanan kür koşulundan daha çok etkilenmektedir. Çizelge 9’da metakaolin ve çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri, Çizelge 10’da agregaların özellikleri, Çizelge 11’de beton karışım oranları, Şekil 11’de kontrol ve metakaolin katkıli betonların basınç dayanımı değişimleri ve Şekil 12’de kontrol ve metakaolin katkıli betonların elektriksel direnç değişimleri gösterilmiştir.

Çizelge 9. Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş [33]’ın çalışmasında kullanılan metakaolin ve çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Analiz	Portland çimentosu	Metakaolin
CaO (%)	62.58	0.78
SiO ₂ (%)	20.25	52.68
Al ₂ O ₃ (%)	5.31	36.34
Fe ₂ O ₃ (%)	4.04	2.14
MgO (%)	2.82	0.16
SO ₃ (%)	2.73	-
K ₂ O (%)	0.92	0.62
Na ₂ O (%)	0.22	0.26
Kızdırma kaybı	3.02	0.98
Özgül ağırlık	3.15	2.5
Özgül yüzey (cm ² /g)	3260	120000

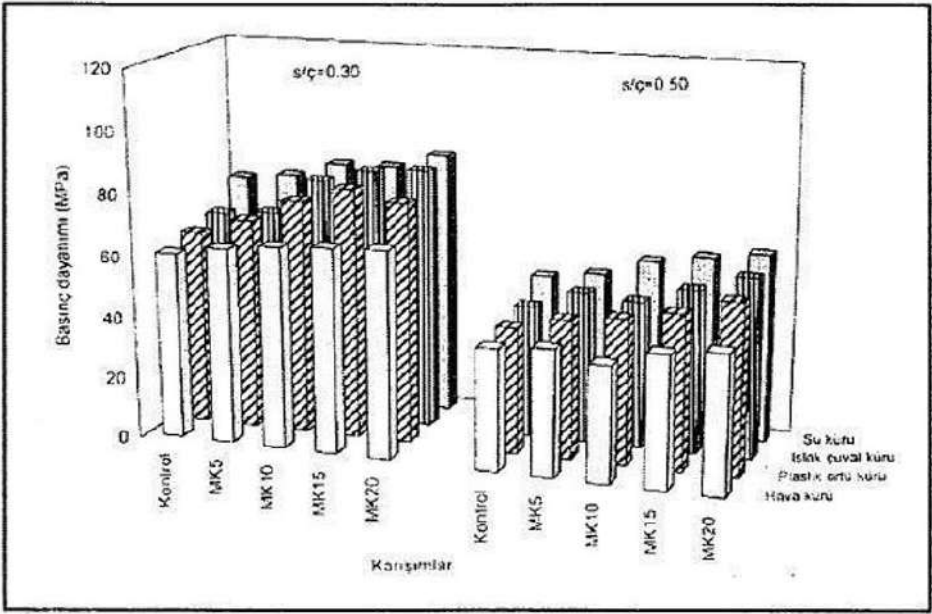
Çizelge 10. Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş[33]'ın çalışmasında kullanılan agregaların özellikleri

Elek açıklığı (mm)	İnce agrega		İri agrega	
	Doğal kum	Kırma kum	No I	No II
16.0	100	100	100	100
8.0	100	100	31.5	1.9
4.0	86.6	95.4	1.0	1.1
2.0	56.7	63.3	0.5	1.0
1.0	37.7	39.1	0.5	0.9
0.50	25.7	28.4	0.5	0.9
0.25	6.7	16.4	0.4	0.8
İncelik modülü	2.87	2.57	5.66	5.93
Özgül ağırlık	2.66	2.45	2.72	2.7

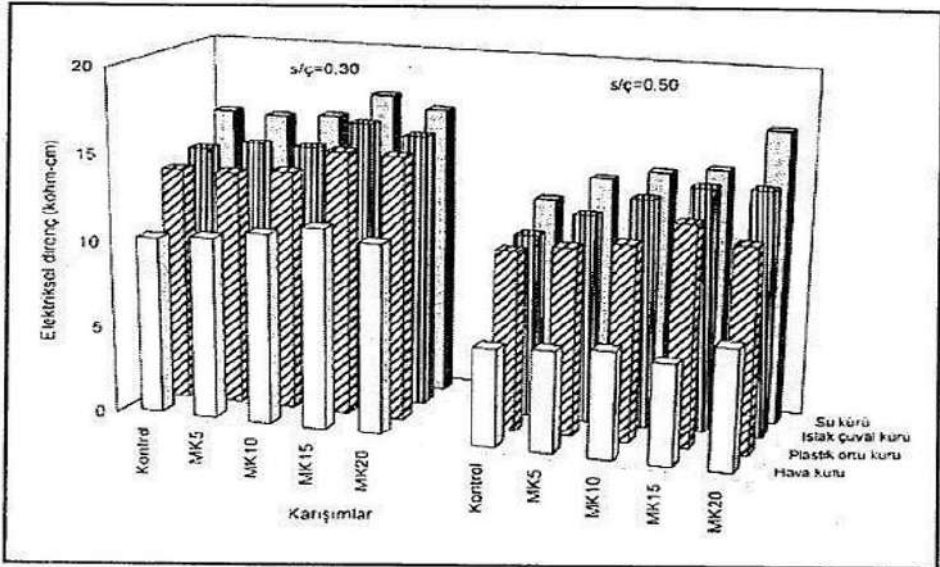
Çizelge 11. Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş [33]'ın çalışmasında beton karışım oranları

	s/ç oranı	MK (%)	Çimento (kg/m ³)	MK (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	İnce agrega		İri agrega		SP (kg/m ³)
						Doğal kum (kg/m ³)	Kırma kum (kg/m ³)	No I (kg/m ³)	No II (kg/m ³)	
Kontrol	0.30	0	500	0	150	714	712	710	708	12.5
MK5	0.30	5	475	25	150	230	229	229	228	13.1
MK10	0.30	10	450	50	150	602	600	599	597	16.2
MK15	0.30	15	425	75	150	238	237	237	236	17.6
MK20	0.30	20	400	100	150	714	712	710	708	19.5
Kontrol	0.50	0	400	0	200	700	699	697	696	6.0
MK5	0.50	5	380	20	200	226	225	225	224	6.5
MK10	0.50	10	360	40	200	591	589	588	587	7.5
MK15	0.50	15	340	60	200	233	233	233	232	8.8
MK20	0.50	20	320	80	200	700	699	697	696	10.1

(MK: Metakaolin, SP: Süper akışkanlaştırıcı)



Şekil 11. Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş [33]'ın çalışmasında kontrol ve metakaolin katkılı betonların basınç dayanımı değişimleri



Şekil 12. Gesoğlu, Güneyisi ve Mermerdaş [33]'ın çalışmasında kontrol ve metakaolin katkılı betonların elektriksel direnç değişimleri

Mazloom, Ramezianpour ve Brooks [34] değişik oranlarda silis dumanı kullanarak betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Araştırmada su-çimento oranı 0.35 ve çimento miktarı 500 kg/m³-sabit tutulmuştur. Silis dumanı %0, %6, %10, %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiş ve betonun mekanik özelliklerinden basınç dayanımı, elastisite modülü, rötre ve sünmesi araştırılmıştır.

90 günden sonra silis dumanı içeren beton karışımların basınç dayanımının artmadığı gözlenmiştir. Normal portland betonunun 7 günlük basınç dayanımı 46 MPa iken %15 çimento ile yer değiştirilmiş silis dumanı katkılı betonun 7 günlük basınç dayanımı 53 MPa değerindedir. Normal portland betonunun 28 günlük basınç dayanımı 58 MPa iken

%15 çimento ile yer değiştirilmiş silis dumanı katkılı betonun 28 günlük basınç dayanımı 70 MPa"dır. Basınç dayanımı, silis dumanı oranının artmasıyla arttığı gözlenmiştir.

Elastisite modülü-basınç dayanımı ilişkisi ACI metodundakinin benzeridir. Normal portland betonunun 7 günlük elastisite modülü değeri 28.8 GPa iken %15 çimento ile yer değiştirilmiş silis dumanı katkılı betonun 7 günlük elastisite modülü değeri 31.5 GPa"dır. Normal portland betonunun 28 günlük elastisite modülü değeri 34.4 GPa iken %15 çimento ile yer değiştirilmiş silis dumanı katkılı betonun 28 günlük elastisite modülü değeri 38.1 GPa değerindedir. Elastisite modülü değerinin, silis dumanının oranının artmasıyla arttığı gözlenmiştir.

Silis dumanı toplam rötreyi etkilememiştir. Bununla birlikte silis dumanı oranının yükselmesiyle otojen rötre artarken, kuruma rötresi azalmıştır.

Toplam sünme, silis dumanı oranı arttıkça düşmüştür. Sünme ve rötre arasında bir ilişki bulunamamıştır. Ayrıca numune tipinin ve atmosferdeki bağıl nemin sünme üzerinde etkisi olmamıştır.

Shannag [35] değişik kombinasyonlarda doğal puzolan ve silis dumanı kullanarak 69-110 MPa arasında yüksek işlenebilirlikte ve yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretmiştir. Bu betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü özelliklerini incelemiştir.

Basınç dayanımı testleri sonucunda, 7 günlük kür sonunda bile dayanımların 57 ile 72 MPa arasında olduğu ortaya çıkmıştır. 28 günlük kür sonunda basınç dayanımının 64-85 MPa arasında olduğu gözlenmiştir. 56 günlük kür sonunda ise 68 ile 90 MPa arasında olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre doğal puzolan ve silis dumanı kombinasyonu ile oluşturulan betonun basınç dayanımı, yalnız doğal puzolan veya yalnız silis dumanıyla yapılan betona göre çok daha yüksek çıkmıştır.

Doğal puzolan ve silis dumanı kombinasyonlu betonların 28 günlük yarmada çekme dayanımları, basınç dayanımlarının %6.5'i mertebesindedir. 7 günlük yarmada çekme değerleri 3.80 MPa'dan 5.10 MPa'a kadar yükselmiştir. 14 günlük yarmada çekme değerleri 4.45 MPa'dan 5.75 MPa'a yükselmiştir.

Elastisite modülü değerleri ise %15 oranında sadece doğal puzolanlı betonlar için 38.5 GPa mertebesinde iken, bu değer %15 oranında doğal puzolanlı ve %5 oranında silis dumanlı betonlar için 43.8 GPa, % 15 oranında doğal puzolanlı ve %10 oranında silis dumanlı betonlar için 42.3 GPa, % 15 oranında doğal puzolanlı ve %15 oranında silis dumanlı betonlar için 38.6 GPa değerindedir.

Nassif, Najm ve Suksawang [36]'ın puzolanik maddelerin ve kür metotlarının yüksek performanslı betonlar üzerine yaptığı çalışmada, yüksek performanslı betona silis dumanı ilave oranının artırılması durumunda elastisite modülündeki artış oranının, betonun ilerleyen yaşlarında düştüğü gözlenmiştir. Bunun nedeni de silis dumanlı betonun yüksek hidratasyonudur.

Erken yaşlarda silis dumanlı beton, geleneksel betona göre yüksek dayanım göstermiştir. Ama ilerleyen yaşlarda bu artış aşamalı olarak düşmüştür. Bundan dolayıdır ki elastisite modülü de erken yaşlarda yüksek artış göstermiş, sonraları bu artış aşamalı olarak düşmüştür.

Yüksek performanslı betona uçucu kül ilavesi elastisite modülünü geleneksel betona göre daha çok arttırmıştır. Diğer taraftan silis dumanı ilave edilen uçucu küllü betonlarda elastisite modülündeki değişim oranı düşmüştür.

Elastisite modülündeki artış oranı basınç dayanımından düşüktür. Yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak yapılmış yüksek performanslı betonun elastisite modülü beton yaşıyla birlikte artmıştır. Ancak bu artış 28 günlük betonların artış oranından düşüktür. Ayrıca yüksek performanslı betona uçucu kül ilavesi ilerleyen beton yaşlarında elastisite modülünün artış oranında düşmeye neden olmuştur.

Felekoğlu ve Türkel [37]'in yaptığı çalışmada farklı boyutlarda küp ve silindir formdaki örneklerin basınç dayanımı değerleri iki farklı dayanım sınıfı için incelenmiş ve bu boyutlar arasında geçiş katsayıları önerilmiştir.

İki farklı dayanım sınıfında (normal dayanım-nd, yüksek dayanım-yd) beton tasarımları hazırlanmıştır. Hem nd hem de yd sınıfına giren karışımlardan 7. ve 28. günde dokuzarlı gruplar halinde basınç dayanımı deneyine tabi tutulmak üzere dört farklı türde (150 ve 200 mm ayrıtlı küp, 100x200mm ve 150x300mm silindir) toplam 144 örnek alınmıştır. Bu örneklerle kırım günlerine kadar standart kür uygulanmıştır.

Yapılan deneylerde genellikle elde edilen basınç dayanımı değeri, numune boyutunun büyümesi ile artmıştır. Literatüre ters olan bu davranışın „çeper etkisi“ sebebiyle oluştuğu düşünülmektedir. Kullanılan en büyük tane çapının 25 mm olması özellikle 100x200mm silindir örneklerde çeper etkisini ön plana çıkarmakta ve düşük kompaziteye sahip örnekler üretilmektedir. Bu durum aynı zamanda standartların önerdiği en büyük agrega çapına uygun kalıp seçiminin önemini de ortaya koymaktadır.

Deneylerde, silindir numuneler daima küp numunelere kıyasla düşük dayanım vermiştir. Ancak bu çalışmada saptanan silindir dayanımı-küp dayanımı ilişkileri Türk standartlarında verilen ilişkilerden sapma göstermektedir.

Farklı şekil ve boyutlar arasındaki geçiş katsayılarının beton dayanım sınıfına göre değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Standart küpten standart silindire geçiş katsayısı normal dayanım sınıfına giren betonlar için 0.75, yüksek dayanım sınıfına giren betonlarda ise 0.90 değerini almaktadır. 100 mm çaplı silindirden standart silindire geçiş katsayısı normal dayanım sınıfına giren betonlar için 1.02, yüksek dayanım sınıfına giren betonlarda ise 1.16 değerini almaktadır. 200 mm ayrıtlı küpten standart silindire geçiş katsayısı normal dayanım sınıfına giren betonlar için 0.75, yüksek dayanım sınıfına giren betonlarda ise 0.85 değerini almaktadır. Çizelge 12’de farklı araştırmacılara göre silindir ve küp örneklerin dayanımı arasındaki ilişkiler verilmektedir.

Çizelge 12. Farklı araştırmacılara göre silindir ve küp örneklerin dayanımı arasındaki ilişkiler [37].

Araştırmacı	İlişki	Açıklama
Peterson	$\frac{f_{s,150 \times 300}}{f_{k,150}} = 0,85 - 0,21 \times \frac{f_{k,150}}{1000}$	150 mm ayrıtlı küp (kgf/cm ²)
L'hermite	$\frac{f_{s,150 \times 300}}{f_{k,200}} = 0,76 + 0,2 \log \frac{f_{k,200}}{200}$	200 mm ayrıtlı küp (kgf/cm ²)
Poijarvi&Syrjala	$\frac{f_{s,150 \times 300}}{f_{k,200}} = 0,85 - \frac{12}{f_{k,200}}$	200 mm ayrıtlı küp (kgf/cm ²)
Vourinen	$\frac{f_{s,150 \times 300}}{f_{k,200}} = \frac{50}{77,5 - \sqrt{f_{k,200}}}$	200 mm ayrıtlı küp (kgf/cm ²)

$f_{s,150 \times 300}$: 150x300 mm silindir; $f_{k,150}$: 150 mm ayrıtlı küp ; $f_{k,200}$ 200 mm ayrıtlı küp

Çizelge 13’’te küp formundaki örnekler için basınç dayanımı değerleri ve istatistiksel veriler, Çizelge 14’’te silindir formundaki örnekler için basınç dayanımı değerleri ve istatistiksel veriler, Çizelge 15’’te farklı örnekler için standart örneklere geçiş katsayıları, Şekil 13’’te küp örnekler için basınç dayanımı ve standart sapma değerleri ve Şekil 14’’te silindir örnekleri için basınç dayanımı ve standart sapma değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 13. Felekoğlu ve Türkel [37]’in çalışmasında küp formundaki örnekler için basınç dayanımı değerleri ve istatistiksel veriler

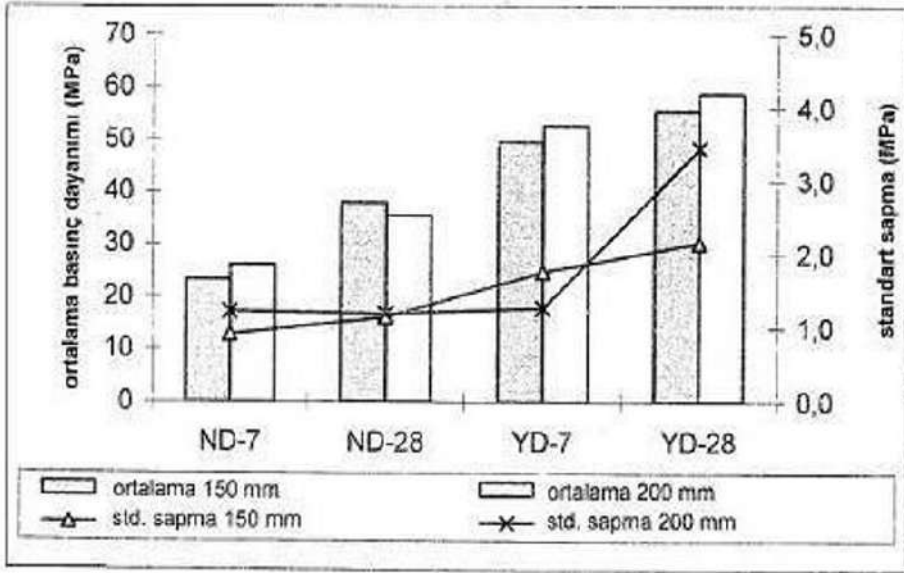
Dayanım sınıfı	ND sınıfı		YD sınıfı		ND sınıfı		YD sınıfı	
Örnek türü	küp 150mm		küp 150mm		küp 200mm		küp 200mm	
Örnek yaşı	7	28	7	28	7	28	7	28
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	23.8	38.6	49.4	56.9	27.4	36.7	53.8	62.6
2	23.7	38.6	50.8	57	25.5	35.8	52.8	62.9
3	24.6	39.5	52.8	56.4	25.7	36.5	53.5	62.4
4	22.6	38.7	49.9	55.4	24.5	36.8	53.9	59.5
5	23.5	38.4	49.3	55.9	27.6	34.8	53.5	55.3
6	23.9	37.1	48.8	52.4	24.9	34.5	51.5	57
7	21.9	36.3	51	59.4	25.5	35.1	50.9	54.8
8	23.6	36.9	46.4	53.4	25.5	33.1	53.3	61
9	22	36.5	48.6	53.7	27.8	36	50.8	54.7
Ortalama (MPa)	23.3	37.8	49.7	55.6	26.0	35.5	52.7	58.9
Standart sapma (MPa)	0.9	1.1	1.8	2.2	1.2	1.2	1.3	3.5
Değişkenlik katsayısı (%)	3.9	3.0	3.6	3.9	4.7	3.4	2.4	5.9

Çizelge 14. Felekoğlu ve Türkel [37]'in çalışmasında silindir formundaki örnekler için basınç dayanımı değerleri ve istatistiksel veriler

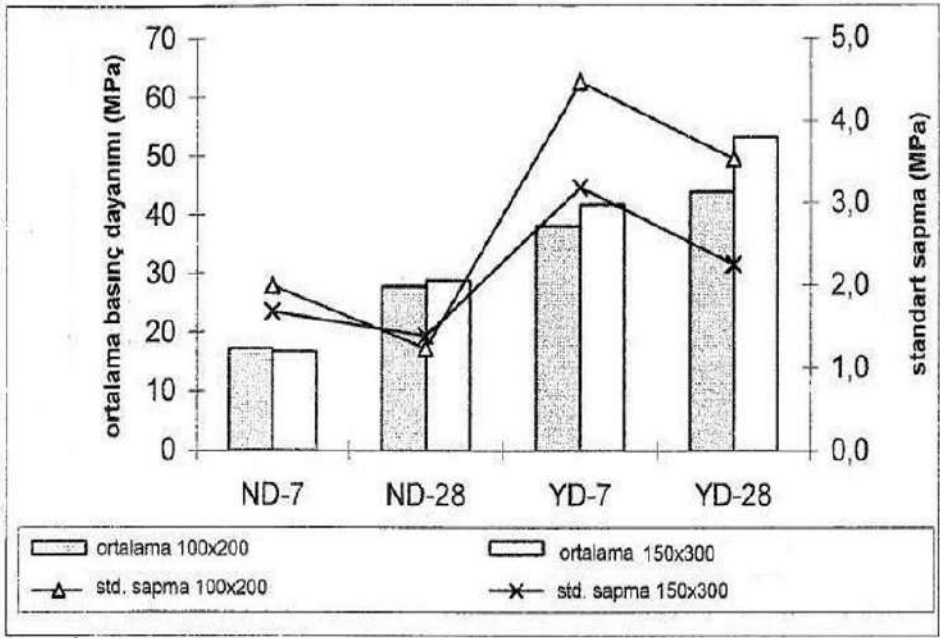
Dayanım sınıfı	ND sınıfı		YD sınıfı		ND sınıfı		YD sınıfı	
Örnek türü	100x200mm silindir		100x200mm silindir		150x300mm silindir		150x300mm silindir	
Örnek yaşı	7	28	7	28	7	28	7	28
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
1	18.3	30.1	40.6	43	18.5	29.6	47.1	53.9
2	16.6	27.5	41.4	41.3	18.3	31.9	43.5	54.2
3	18	27.1	40.8	46.5	17.5	28.6	36.7	53.1
4	17.4	25.7	43.2	47.9	18.3	28.4	38.9	51.1
5	19.7	28.6	34.1	47.2	15.8	28.4	43	57.5
6	19.1	27.9	33.3	38.3	14.6	28.4	41.9	53.4
7	15.8	27.7	32.6	42.3	15.9	27.5	42.3	49.3
8	17.3	28.4	33.6	39.5	14.5	27.8	39.8	53.1
9	13	26.8	42.5	46.5	*	*	*	52.2
Ortalama (MPa)	17.2	27.8	38.0	43.6	16.7	28.8	41.7	53.1
Standart sapma (MPa)	2.0	1.2	4.5	3.5	1.7	1.4	3.2	2.3
Değişkenlik katsayısı (%)	11.5	4.5	11.7	8.1	10.1	4.8	7.6	4.2

Çizelge 15. Felekoğlu ve Türkel [37]'in çalışmasında farklı örnekler için standart örnekleri geçiş katsayıları.

Geçiş katsayısı	ND 150mm	YD 150mm	ND 100x200 mm	YD 100x200 mm	ND 200mm	YD 200mm	ND 150x300 mm	YD 150x300 mm
Standart silindir	0.75	0.90	1.02	1.16	0.75	0.85	1	1
Standart küp	1	1	1.36	1.29	1.01	0.94	1.34	1.10



Şekil 13. Felekoğlu ve Türkel [37]'in çalışmasında küp örnekleri için basınç dayanımı ve standart sapma değerleri



Şekil 14. Felekoğlu ve Türkel [37]'in çalışma silindir örnekler için basınç dayanımı ve standart sapma değerleri

Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un yaptığı çalışmada pomza taşı ve silis dumanı kullanılarak elde edilen taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerini incelemek amacıyla 3, 7, 14, 28 günlük kür süreleri için kontrol betonu (kb) ve silis dumanı katkılı beton (sdb) olmak üzere iki tip beton serisi hazırlanmıştır. Tüm beton serilerinde aynı elek aralıkları kullanılmış olup çimento dozajı 310 kg/m^3 olarak seçilmiştir. Mineral katkı olarak kullanılan silis dumanı portland çimentosu ile ağırlık olarak %10 oranında yer değiştirilerek karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca çalışmada tüm beton serilerinde çökme değeri sabit tutulmuştur ($7.5 \pm 1.5 \text{ cm}$).

Çalışmada ultrasonik ses geçirgenlik ve basınç dayanımı deneyleri için $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ ölçülerindeki küp numune kalıpları kullanılmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyi için ise $150 \times 300 \text{ mm}$ ölçülerindeki silindirik numune kalıpları kullanılmıştır.

Beton serileri erken yaşlarda benzer basınç dayanımı özellikleri sergilemelerine rağmen, özellikle 7 günlük yaş ile birlikte dayanımlarda farklılıklar gözlenmiştir. 28 günlük su kürü sonrasında en yüksek basınç dayanımı %10 sdb numunelerinde ve bunu takiben kb numunelerinde gözlenmiştir. Puzolanik aktivasyon bakımından silis dumanının erken yaşlarda dahi etkili bir özellik sergilediği söylenebilir. Bu sonuç, çimento hidratasyonu boyunca serbest kalsiyum hidroksitle silis dumanının reaksiyonuna bağlanabilir.

Silis dumanı ile üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımı artış oranı, kontrol betonuna göre yaklaşık olarak %7.5'tir. Çalışma sonuçları incelendiğinde kb serilerinin basınç dayanımı TS EN 206-1 [39]'e göre LC 25 sınıfına girerken, sdb serilerinin basınç dayanımı LC 28 seviyesindedir.

Yarmada çekme dayanımına tabi tutulan numunelerde kırılma erken yaşlarda yüzey çatlakları şeklinde oluşurken, özellikle 14 günlük su kürü sonrasında tam olarak ortadan yarıma şeklinde gözlenmiştir. Dolayısıyla kırılma erken yaşlarda agrega-harç ara yüzeyinde oluşurken, sonraki yaşlarında ise kaba agregalarda olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda da en iyi dayanımı sdb serisi göstermiştir.

Silis dumanı katkısının nitelik ve aktivasyonunun yüksek olması dolayısıyla silis dumanı katkılı betonların sesüstü dalga hızları kb'ye göre daha yüksek çıkmıştır. Betonun içerisinden geçen sesüstü dalga hızıyla beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak, sesüstü dalganın hızıyla betonun yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, dalga hızı betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça sesüstü dalganın hızı daha küçük olmaktadır. Sdb serilerinin boşluk hacminin diğer serilere göre daha az olduğu söylenebilir. Bu durum sd parçacıklarının, betonu doldurma kapasitesinin yüksek olması ile açıklanabilir. Böylece sdb serisinin daha iyi mekanik özellikler sergileyeceği görülür. Çizelge 16'da deneylerde kullanılan çimento ve silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri, Çizelge 17'de kullanılan agregaların fiziksel özellikleri, Çizelge 18'de beton karışım oranları, Şekil 15'te kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama basınç dayanımı, Şekil 16'da hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama küp basınç dayanımı, Şekil 17'de kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama yarmada çekme dayanımı, Şekil 18'de hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama yarmada çekme dayanımı, Şekil 19'da hafif agregalı beton serilerinin kür periyodu-USG hızı grafiği, Şekil 20'de basınç, yarmada çekme dayanımları ve ultrasonik ses geçirgenlik değerleri arasındaki ilişki ve Şekil 21'de beton serilerinin basınç ve yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 16. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında kullanılan çimento ve silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

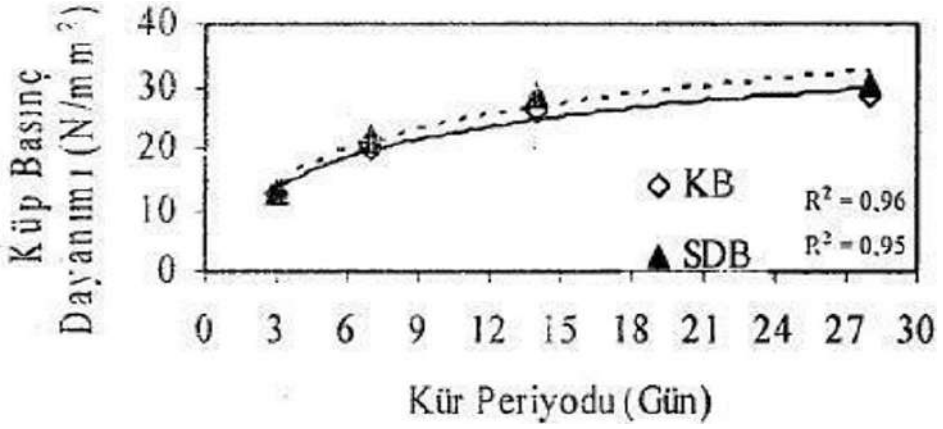
Malzeme İçeriği	Çimento(%)	SD (%)
SiO ₂	21.12	91
Al ₂ O ₃	5.62	0.58
Fe ₂ O ₃	3.24	0.24
CaO	62.94	0.71
MgO	2.73	0.33
SO ₃	1.79	1.06
K.K.	1.78	1.84
Blaine	3382	-
Özgül Ağırlık	3.10	2.20

Çizelge 17. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

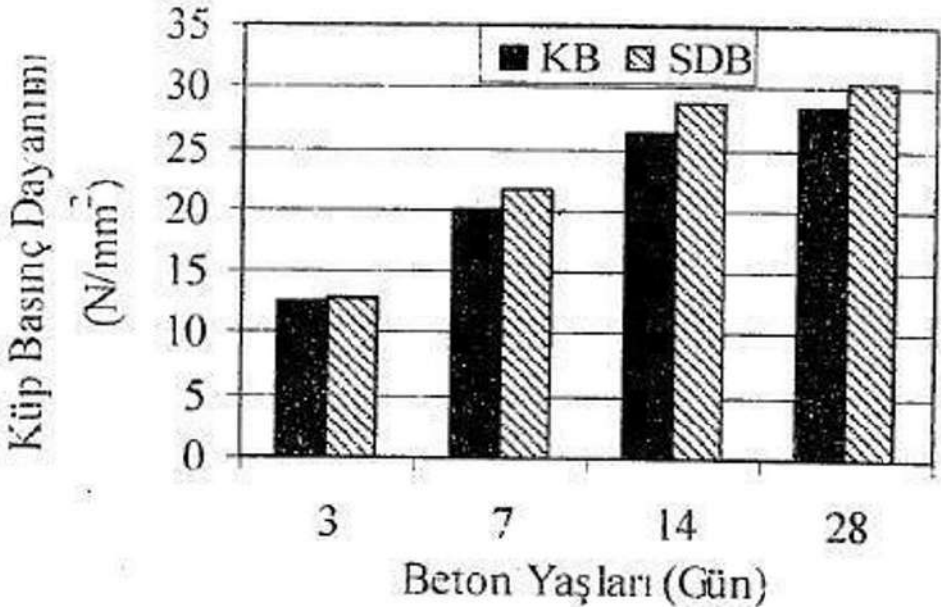
Çalışmada kullanılan elek aralıkları	Pomza özellikleri
Kum : 0-5 mm, Orta Sınıf: 5-10 mm. İri Sınıf : 10-20 mm	Kuru bir hac. ağı. (gr/cm ³): 1.29 Su Emme Mik. (%).....: 22.36 Los Angi. (300 dev.%).....: 42 Basınç dayanımı (N/mm ²): 11.30

Çizelge 18. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasındaki beton karışım oranları

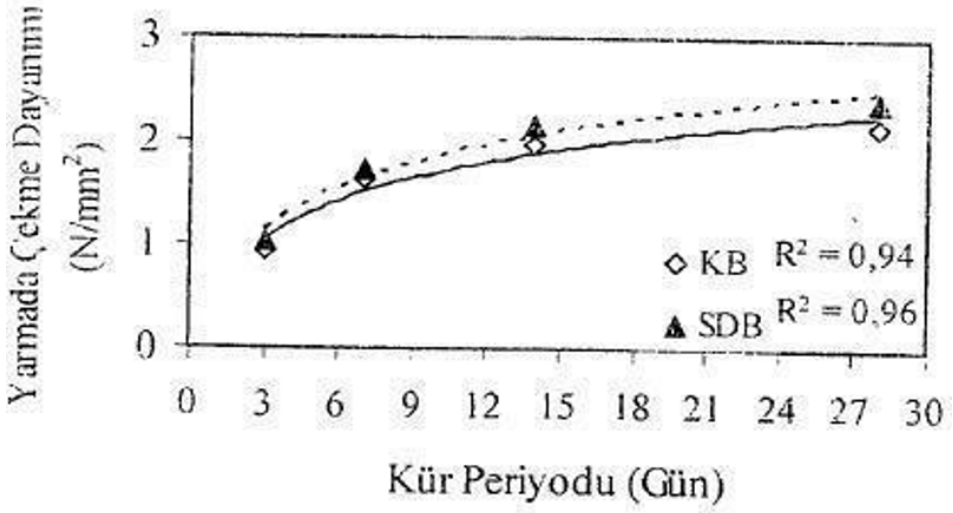
Beton karışımı	KB (Kg/m ³)	SDB (Kg/m ³)
Portland çimentosu CEM-I	310	279
Silis dumanı	-	31
İnce kum	780	780
Kaba agregası (5-10 mm)	360	360
Kaba agregası (10-20 mm)	490	490
Su/Çimento oranı	0.65	0.67
Kaba agregası /Agregası	0.52	0.52
İnce kum/Agregası	0.48	0.48
Kuru birim ağırlığı (kg/m ³)	1.90	1.89



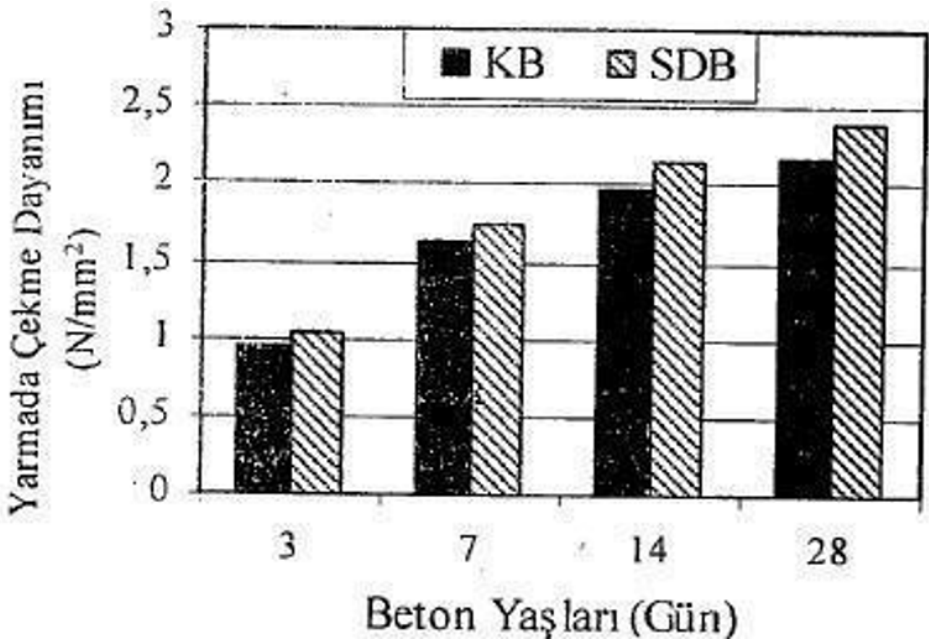
Şekil 15. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama küp basınç dayanımı



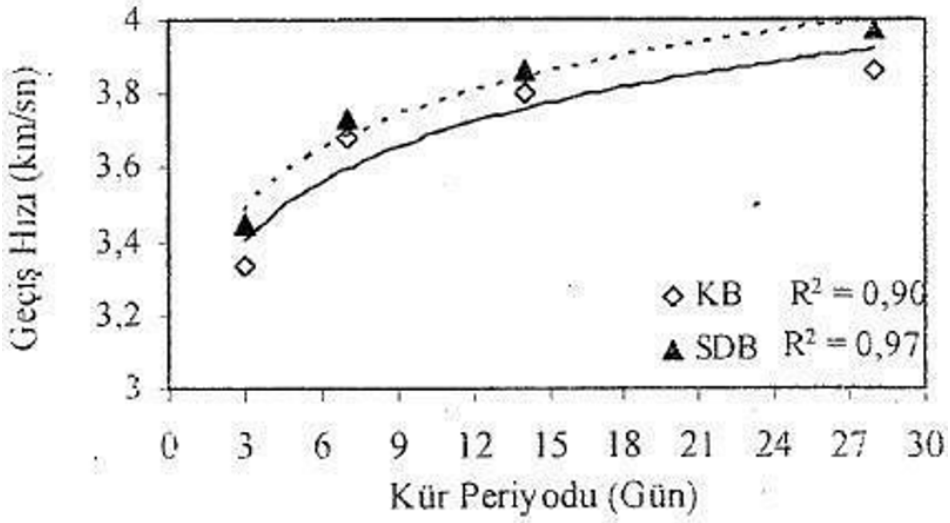
Şekil 16. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama küp basınç dayanımı



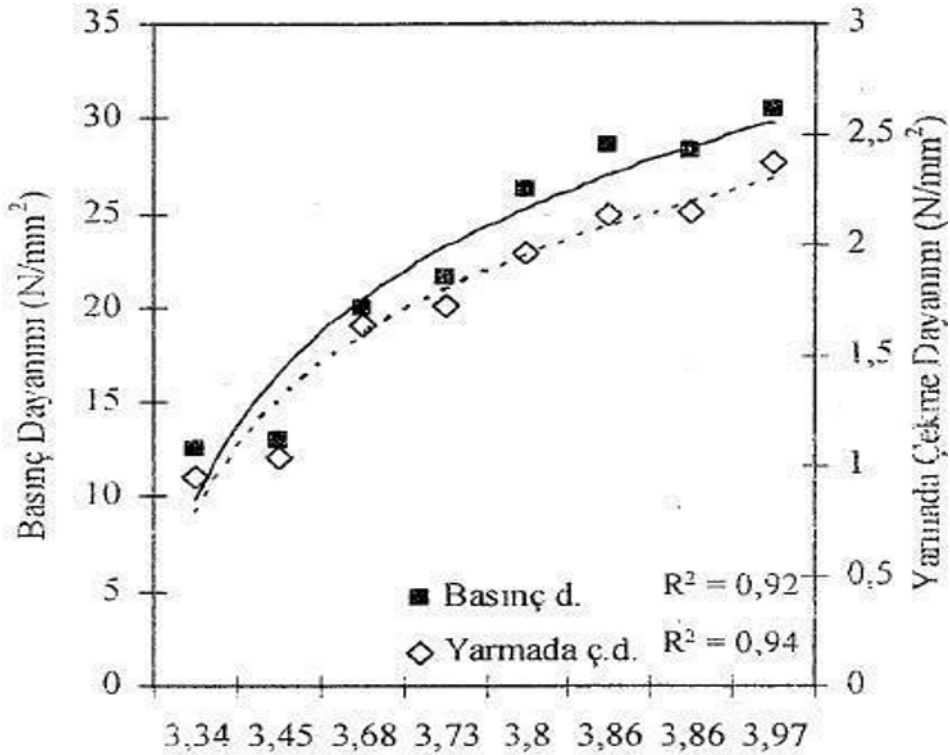
Şekil 17. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında kür periyoduna göre hafif agregalı beton serilerinin ortalama yarmada çekmede dayanımı



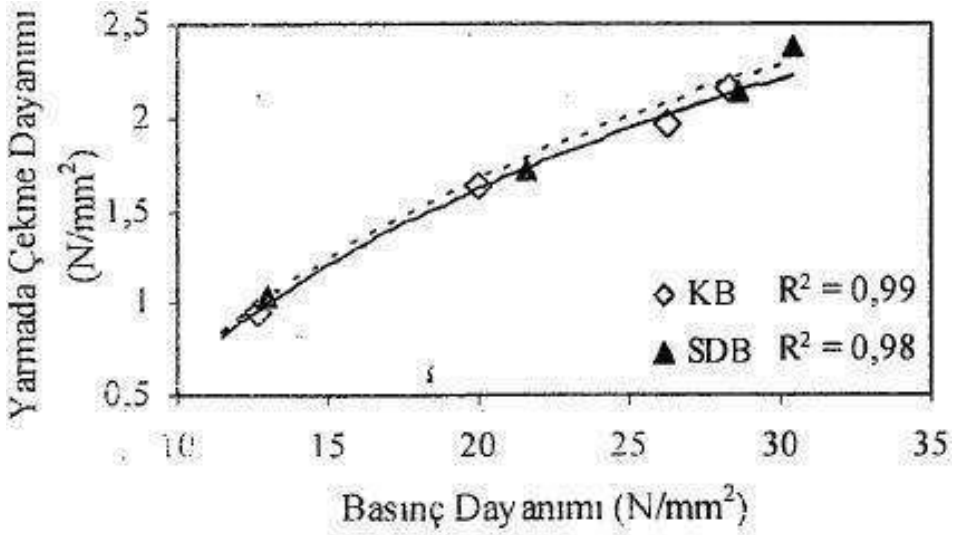
Şekil 18. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında hafif agregalı beton serilerinin beton yaşına göre ortalama yarmada çekme dayanımı



Şekil 19. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında hafif agregalı beton serilerinin kür periyodu-ultrasonik ses geçirgenlik hızı grafiği



Şekil 20. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında basınç, yarmada çekme dayanımları ve ultrasonik ses geçirgenlik değerleri arasındaki ilişki



Şekil 21. Yazıcıoğlu ve Bozkurt [38]'un çalışmasında beton serilerinin basınç ve yarmada çekme dayanımının karşılaştırılması

Persson [40] hava ve ıslak küre tabi tutulan yüksek performanslı betonun poisson oranı üzerinde geniş kapsamlı bir araştırma yapmıştır. 8 çeşit yüksek performanslı beton üzerinde çalışmıştır. Betonlar %5-%10 arasında silis dumanı içermektedir ve iki tane yüksek performanslı betona da hava sürükleyici katkı ilave edilmiştir. Toplam olarak 178 test yapılmıştır. Bunların 48 tanesi erken yaştaki yüksek performanslı betonlardır. Olgun yüksek performanslı betonların test sonuçları daha sağlıklı sonuçlar vermiştir. Erken yaştaki yüksek performanslı betonlar olgun yaştakilere göre düşük değerler vermiştir.

Bu çalışmada varyasyon 0,04'ten küçüktür ki bu değer güvenilir sınırlar içindedir.

Çalışmadan şu sonuçlar ortaya çıkmıştır:

1. Kuvarzitle kuru kürede yapılan olgun yaştaki yüksek performanslı betonun poisson oranı yaklaşık $\nu = 0.13$ olarak bulunmuştur.
2. Kuvarzitle ıslak kürede yapılan olgun yaştaki yüksek performanslı betonun poisson oranı yaklaşık $\nu = 0.14$ olarak bulunmuştur.
3. Granitle yapılan olgun yaştaki yüksek performanslı betonun poisson oranı yaklaşık $\nu = 0.16$ olarak bulunmuştur.
4. Erken yaşılarıdaki yüksek performanslı betonların poisson oranı, olgun yaşılarıdaki yüksek performanslı betonlardan daha düşük sonuçlar vermiştir.
5. 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre erken yaşılarıdaki yüksek performanslı betonların poisson oranı, olgun yaştakilerden yaklaşık 0.03 daha düşüktür.

6. Hava kürüyle yapılan erken yaşlardaki yüksek performanslı betonların poisson oranları, ıslak kürle yapılan erken yaştakilere oranla yaklaşık 0.03 daha yüksektir.

7. Bağlı nem poisson oranı üzerinde etkili değildir.

Jianyong ve Yan [41]'ın yaptığı çalışmada üç grup yüksek performanslı beton oluşturulmuştur. Bunlara beton A, beton B ve beton C denmiştir. Bağlayıcı maddeleri hariç bu üç beton karışımının, karışım oranları aynıdır. Beton A'da sadece portland çimentosu bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Beton B'de çimento ile ağırlık olarak %30 oranında yer değiştirmiş ultra ince yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Beton C'de ise çimento ile ağırlık olarak %30 oranında yer değiştirmiş ultra ince yüksek fırın cürufu ve çimento ile ağırlık olarak %10 oranında silis dumanı yani toplam %40 oranında çimento ile yer değiştirmiş yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcının bütün beton karışımlarındaki oranı sabit ve toplam bağlayıcı ağırlığının %1.6'sıdır.

Betonu oluşturan maddeler aynı anda betoniye yerleştirilmiş ve 3 dakika karıştırılmıştır. Karıştırılma işlemi bittiğinde çökme ve çökme yayılımı ölçülmüştür. Çökme miktarı beton A için 22.5 cm, beton B için 24.5 cm ve beton C için 24 cm.,dir. Çökme yayılımı beton A için 49 cm, beton B için 67 cm ve beton C için 56 cm'dir.

Karışım kalıplara vibrasyonla 20 ± 2 °C sıcaklıkta yerleştirilmiştir. Numuneler 1 gün sonra kalıptan çıkartılmış ve 20 ± 3 °C sıcaklıktaki suda kür edilmiştir.

Betonun mekanik özellikleri olan basınç dayanımı, çekmede yarma dayanımı, sünme ve kuruma rötresi araştırılmıştır. Basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri için 10x10x10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Sünme için 10x10x30 cm ve kuruma rötresi için 10x10x50 cm prizmatik numuneler kullanılmıştır. Bütün özellikler için 3 adet numunenin ortalaması alınarak test sonuçları ortaya çıkartılmıştır.

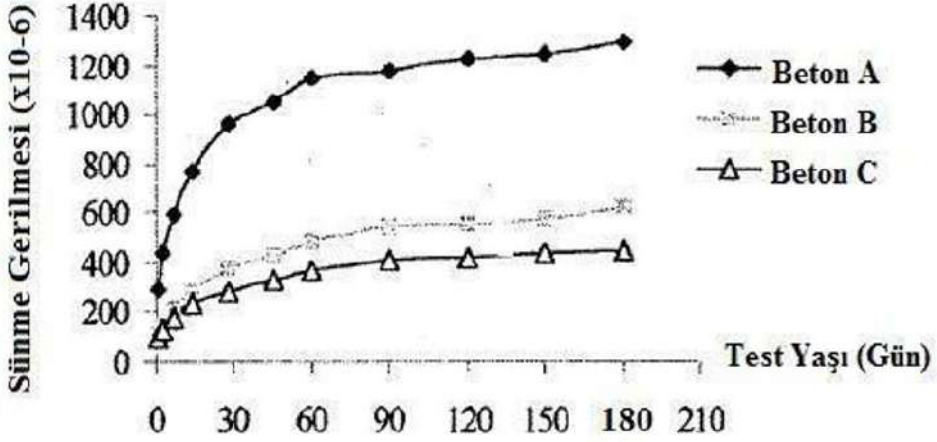
Beton B ve beton C her test yaşında beton A'ya göre daha yüksek basınç ve yarmada çekme dayanımı göstermiştir. 3 günlük test yaşında beton A'nın basınç dayanımı 63.8 MPa, beton B'nin ve beton C'nin basınç dayanımı 69.3 MPa'dır. 7 günlük test yaşında beton A'nın basınç dayanımı 71.2 MPa, beton B'nin 83.2 ve beton C'nin 87 MPa'dır. 28 günlük test yaşında ise beton A'nın basınç dayanımı 81.1 MPa, beton B'nin 100.4 MPa ve beton C'nin 104 MPa'dır. Yarmada çekme dayanımı gelişimi de basınç dayanımı ile aynı eğilimdedir. 3 günlük test yaşında beton A'nın yarmada çekme dayanımı 3.80 MPa, beton B'nin 4.06 MPa ve beton C'nin 5.20 MPa.,dir. 7 günlük test yaşında beton A'nın yarmada çekme dayanımı 4.54 MPa, beton B'nin 5.03 MPa, beton C'nin 5.44 MPa'dır. 28 günlük test yaşında ise beton A'nın yarmada çekme dayanımı 5.54 MPa, beton B'nin 5.91 MPa ve beton C'nin 6.14 MPa'dır.

Bütün test süresince (1.günden 180.güne kadar) beton B ve beton C daima, beton A'dan daha küçük sünme değeri göstermiştir. Ultra ince yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılarak yapılmış olan beton C en küçük sünme değerini vermiştir.180. günü sonunda beton A'nın sünme değeri 1293×10^{-6} , beton B'nin 623×10^{-6} ve beton C'nin ise 450×10^{-6} 'dır.

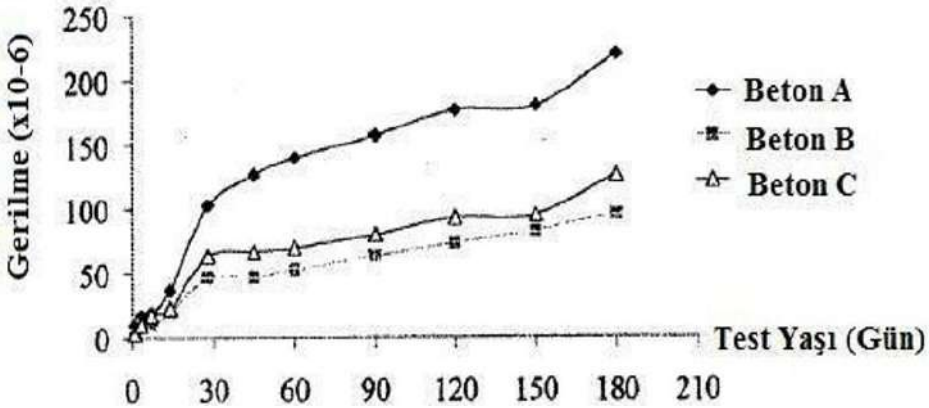
3 grup betonda da erken yaşlardaki sünme miktarı, gelişimi ilerleyen yaşlara göre daha hızlı dayanım göstermiştir. 60.gün dönüm noktası olmuştur. Her üç tip betonda da sünme miktarı farklıdır. 60. günden önce beton A, beton B ve beton C'den daha büyük sünme değerine sahiptir. Beton C en küçük sünme değerine sahiptir. 60. günden sonra sünme artış oranı 3 tip betonda da benzer özellik göstermektedir. Ayrıca 60. günden sonra beton B ve beton C'nin eşit sünme artış oranına sahip olduğu düşünülebilir.

Beton A, beton B ve beton C „nin erken yaşlardaki kuruma rötresi miktarları arasındaki fark küçüktür. 28.günden sonra beton A beton B ve beton C'den daha büyük miktarda kuruma rötresi göstermiştir. 28. günde beton B ve beton C benzer miktarda kuruma rötresine sahiptirler. 180. gündeki beton A'nın kuruma rötresi değeri 180×10^{-6} , beton B'nin 96×10^{-6} ve beton C,nin ise 127×10^{-6} 'dır. Bütün test süresi boyunca beton B, sünme gelişiminden farklı olarak en düşük rötreyi sergilemiştir. 28. günden önce beton A en büyük rötre artış miktarına sahiptir. 28.günden sonra 3 grup için de rötre artış miktarı benzer özellikler göstermektedir. Şekil 22'de betonlardaki sünme gelişimi ve Şekil 23'te betonların kuruma rötresi test sonuçları gösterilmiştir.

Kadiroğlu [42] yaptığı çalışmada, farklı kür koşulları altındaki betonlarda, farklı çap ve boy/çap oranına sahip karot numuneleri, standart numuneler ve Schmidt Çekici deneyi ile elde edilen basınç dayanımı sonuçları aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır. Bunun için bir hazır beton santralinden üretilen 5 m^3 C35 ($D_{\text{maks}}=25 \text{ mm}$, Kıvam=K4) betonu kullanılarak her biri $25 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ dikdörtgen kesitli ve 4 m uzunluğunda 6 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Betonun kırıslara dökülmesi, sıkıştırılması ve TS 1247 [43] standardına uygun olarak yapılmıştır. Betonun dökülmesi sırasında 60 adet $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ küp ve 60 adet $15 \times 30 \text{ cm}$ silindir numune alınmıştır. Numuneler TS EN 12390-1 [44]'e uygun kalıplara, TS EN 12390-2 [45]'ye uygun olarak alınmıştır.



Şekil 22. Jianyong ve Yan [41]'in çalışmasında betonlardaki sünme gelişimi



Şekil 23. Jianyong ve Yan [41]'in çalışmasında betonların kuruma rötresi test sonuçları

Üretilen kirişler her biri 2''şer adetten oluşan 3 gruba ayrılmıştır. 1. grup TS 1247 standardına uygun olarak dökülen betonun hemen arkasından başlamak üzere 28 gün boyunca ıslak çuvallarla sarılarak kür edilmiş, 2. grup sadece sabah ve akşam olmak üzere birer kez sulamak şeklinde kür edilmiş ve 3.grup ise hiç kür edilmemiştir. Her bir kür yöntemine karşılık olarak 15''er adet küp ve 15''er adet silindir numune, gruplara uygulanan kür işlemiyle aynı koşullarda küre tabi tutulmuşlardır. 15 adet küp ve 15 adet silindir TS EN 12390-2'ye göre laboratuarda küre tabi tutulmuşlardır. Bütün numunelerin 28 günlük basınç dayanımları tespit edilmiştir. 28 gün sonunda her bir grup kirişlerden 30''ar adet 10x20 cm, 10x10 cm, 5x10 cm ve 5x5 cm silindir boyutunda karotlar alınarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Karot almadan önce her bir grup kiriş 30''ar

adet noktada (her nokta 10 vuruş) Schmidt Çekici deneyine tabi tutulmuşlardır.

Sonuç olarak, farklı boyutlardaki karot numunelerinden, standart küp ve silindir numunelerinden ve Schmidt Çekici deneyinden elde edilen basınç dayanımı sonuçları arasındaki ilişkiler, farklı kür koşullarında araştırılmıştır.

Üretilen kirişler ve standart numunelerden, farklı yöntemlerle kür uygulamak amacıyla dört grup oluşturulmuştur. İlk üç grup, rastgele seçilen ikişer kiriş, 15"er küp ve 15"er adet silindir, dördüncü grup ise 15 adet küp 15 adet silindir numuneden oluşturulmuştur. Bu gruplar ve uygulanan kür yöntemleri şunlardır:

1. Tam Kür Grubu (TK Grubu): Bu gruba dahil edilen iki kiriş, 15 adet küp ve 15 adet silindir numune, hemen ıslak çuvallarla örtülerek kür uygulamasına maruz bırakılmışlardır. 24 saat sonra kalıpların sökülmesinin arkasından 21. güne kadar TS 1247"ye uygun olarak ıslak çuval kürü uygulanmıştır. 21. gün sonunda çuvallar açılarak kür uygulaması kesilmiş ve 28. güne kadar atmosfer koşullarında bırakılmışlardır.
2. Az Kür Grubu (AK Grubu): Bu gruba dahil edilen iki kiriş, 15 adet küp ve 15 adet silindir numuneler üzerine ilk 24 saat hiçbir kür işlemi uygulanmamıştır. 24 saat sonunda kalıplar açılarak, 21. güne kadar, sadece sabah ve akşam olmak üzere, çeşmeye bağlı bir hortumla, 5-10 dakika boyunca su püskürtülerek küre tabi tutulmuşlardır. 21. günden 28. güne kadar ise hiçbir kür işlemine maruz bırakılmamışlardır.
3. Hiç Kür Grubu (HK Grubu) :Bu gruba dahil edilen iki adet kiriş, 15 adet küp ve 15 adet silindir numuneler üzerine, 28 gün boyunca hiçbir kür işlemi uygulanmamış ve tamamen atmosfer koşulları etkisine maruz bırakılmışlardır.
4. Laboratuvar Kür Grubu (LK Grubu): 15 adet standart küp ve 15 adet standart silindir numune ilk 24 saat ıslak çuvallarla örtüldükten sonra kalıplardan sökülerek laboratuara taşınmış ve laboratuvar kür havuzunda TS EN 12390-2 standardına uygun olarak deney günlerine kadar kür edilmişlerdir.

Beton döküm gününden itibaren 28. güne kadar kirişlerin bulunduğu ortamdaki hava sıcaklıkları ve bağıl nem oranları; sabah, öğle, akşam ve gece olmak üzere her gün tespit edilmiş ve bu süre boyunca ortalama 25 °C hava sıcaklığı (en düşük 17,2 °C gece, en yüksek 33,7 °C öğle), ortalama bağıl nem %52 (en düşük %40, en yüksek %61) olarak ifade edilmiştir.

Kürün, beton basınç dayanımlarını önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Standartta uygun bir şekilde laboratuvar ortamında kür edilen numunelerden elde edilen basınç dayanımlarına göre; hiç kür edilmeyen numunelerden elde edilen basınç dayanımları sonuçlarında, küp numuneler için %20, silindir

numuneler için ise %32 oranlarında azalma olduğu görülmüştür. Küp ve silindir numuneler arasındaki dayanım kaybı farklılığının nedeni, bu numuneler arasındaki yüzey alanı farklılığı olabilir. TS 1247''ye göre tam olarak kür edilen kırımlardan alınan karot numunelerin basınç dayanımlarına göre, hiç kür edilmeyen ve sabah-akşam sulama şeklinde yetersiz kür edilen kırımlardan alınan karotların basınç dayanımları %11-18 arasındaki oranlarda düşük bulunmuştur. Standart kür yöntemi dışındaki kür yöntemlerinin etkin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

Hangi kür koşullarında muhafaza edilirse edilsin, standart kalıpları alınan numunelerin basınç dayanımları, karot numunelerin basınç dayanımlarından daha yüksek çıkmaktadır.

Standart küp ve standart silindir basınç dayanımları arasındaki ilişki, 40-50 N/mm² basınç dayanım değerleri için, TS 11222 veya TS EN 206-1 [47] standartlarının ön gördüğü dönüşüm değerleriyle bağdaşmamaktadır. Karakteristik silindir/küp basınç dayanım oranı, 40-50 N/mm² arasında, 0.96-0.97 olarak tespit edilmiştir. Oysa bu ilişki tüm standartlarda, aynı dayanım aralığında, 0.80-0.81 şeklinde ön görülmektedir.

Standart küp ve standart silindir numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri ile aynı betonla üretilen büyük boyutlu yapı elemanından alınan karot numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri arasında kurulmaya çalışılan ilişki, kür koşullarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu farklı şekilde elde edilen numuneler arasındaki ilişkiyi kapsayan TS 10465 [46] standardının, kür uygulanmış olan bir yapı elemanındaki betonda doğru bir değerlendirme yöntemini kapsadığı, ancak hiç kür uygulanmamış bir betonda çelişkili sonuçların elde edilmesine neden olabileceği kanaatine varılmıştır. Buna karşılık, standartta, sonuçların güvenilirliği için normal kürlü betonlara uygulanabilirliği işaret edilmektedir.

Boy/çap oranı 1,00 olan karot numuneleri ile 2,00 olan karot numuneleri arasındaki düzeltme katsayısının ASTM C 42 [47] ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ancak ASTM C 42''de yer alan, boy/çap oranı 2,00 olan silindir karot numune dayanımı sonuçlarının, standart kalıplara alınarak standarda uygun bir şekilde kür edilen silindir numunelerin dayanım sonuçlarının %85,,ini sağlaması yeterliliği sonucuna ulaşılamamıştır. Bu oran farklı kür koşullarına göre %55-%68 arasında oluşmuştur.

Schmidt Çekici deneyinin, yerindeki beton dayanımını tespit etmek için tek başına kullanılmasının güvenilirlik açısından yeterli olmadığı görülmüştür. Schmidt Çekici okumaları sonucunda özellikle yüksek dayanım elde edildiğinde, sonuçlar, karot alınarak kontrol edilmelidir. TS 10465''te ön görülen, Schmidt Çekici sonuçlarının 10x10 cm karot sonuçlarıyla aynı alınabileceği

değerlendirmesine çalışmada ulaşılamamıştır. Bu yargı, sadece hiç kür uygulanmayan betonlarda doğrulanmıştır.

Buna göre, Schmidt Çekici deneyi ile elde edilen dayanım sonuçlarının değerlendirilmesinde, TS 10465'te ön görülen istatistiksel değerlendirme yönteminin uygun olmadığı kanaatine ulaşılmıştır. Çizelge 19'da agregaların üretiminde kullanılan kireçtaşının kimyasal analizi, Çizelge 20'de agregaların fiziksel özellikleri, Çizelge 21'de çimento ve uçucu külün fiziksel özellikleri, Çizelge 22'te çimento ve uçucu külün kimyasal özellikleri, Çizelge 23'te C35 ($D_{maks}=25$ mm, kıvam sınıfı=K4) betonunun 1 m³ ü için karışım dizaynı, Çizelge 24'te taze betonun özellikleri, Çizelge 25'te laboratuvar kür grubu için küp ve silindir numunelere ait 28 günlük basınç dayanım sonuçları, Şekil 24'te farklı yöntemlerle elde edilen karakteristik basınç dayanımı-kür ilişkisi ve Çizelge 26'da basınç dayanımı sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 19. Kadiroğlu [42]'nin çalışmasında agregaların üretiminde kullanılan kireçtaşının kimyasal analizi

Malzeme	KİMYASAL ÖZELLİKLER									
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CaCO ₃ (%)	Cl ⁻ (%)
Kireçtaşı	2,74	1,11	0,21	52,91	0,07	0,10	0,19	0,11	95,07	0,0026

Çizelge 20.Kadiroğlu [42]'nin çalışmasında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega	DYK Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme Oranı (%)	0,063mm 'den Geçen İnce Malzeme Oranı (%)	Organik Kökenli Madde	Bilyalı Tambur İle Aşınma		Elek Analizi Elekten Geçen (%)							
					100 Devir	500 devir	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25
0-3	2,675	1,0	9,90	Berrak	---	---	100	100	100	100	72	45	29	19
0-5	2,681	1,2	8,85	Berrak	---	---	100	100	100	92	60	36	22	12
5-15	2,695	0,5	0,45	---	6	25	100	100	47	2	0	0	0	0
15-25	2,702	0,5	0,40	---			100	31	1	0	0	0	0	0

Çizelge 21. Kadiroğlu [42]*'nın çalışmasında kullanılan çimento ve uçucu külün fiziksel özellikleri

Malzeme	FİZİKSEL ÖZELLİKLER									
	Özgül Ağır. gr/cm ³	Blanie cm ² /gr	Priz Süresi		Hacim Gen. (mm)	Basınç Dayanımı (N/mm ²)			Puzolanik Aktivite	
			Baş.	Bitiş		2 Gün	7 Gün	28 Gün	7 Gün	28 Gün
Çimento	3,1	3285	2h 30'	3h 20'	2,00	22,2	39,2	48,0	---	---
Uçucu Kül	2,43	2615	---	---	---	---	---	---	78,09	79,32

Çizelge 22. Kadiroğlu [42]*'nın çalışmasında kullanılan çimento ve uçucu külün kimyasal özellikleri

Malzeme	KİMYASAL ÖZELLİKLER									
	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	FCaO (%)	Cl ⁻ (%)
Çimento	21,20	5,70	2,65	63,58	0,83	0,12	1,09	3,05	0,65	0,0018
Uçucu Kül	46,78	22,80	4,24	19,43	---	1,67	1,77	1,67	0,71	0,0032

Çizelge 23. Kadiroğlu [42]*'nın çalışmasında C35 ($D_{maks}=25$ mm, kıvam sınıfı=K4) betonunun 1 m³ „ü için karışım dizaynı

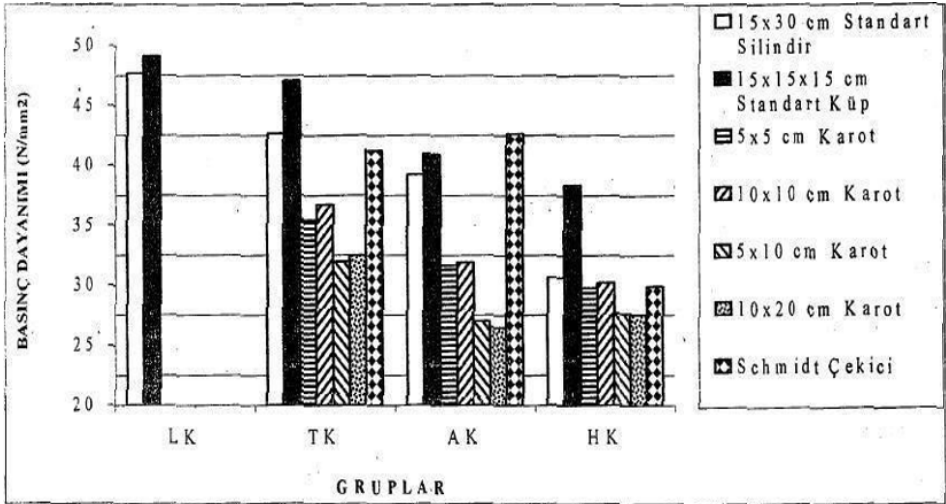
Bileşen	Çimento PÇ 42,5	U.Kül	Kim.Kat (Süp. Akş)	Su	0-3mm K.kum	0-5mm K.kum	5-15mm Kırmataş	15-25mm Kırmataş
Miktar (kg/m ³)	335	80	6	174	440	431	461	471

Çizelge 24. Kadiroğlu [42]"nın çalışmasında taze beton özellikleri

ÖZELLİK	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY	ORTALAMA	UYGULANAN STANDART
Çökme (cm)	18	19	17	18	TS EN 12350-2
Sıcaklık (°C)	31,5	31,9	32,4	31,9	TS EN 12350-1
Taze Yoğunluk (kg/m ³)	2398	2405	2388	2397	TS EN 12350-6
Hava İçeriği (%)	1,5	1,3	1,7	1,5	TS EN 12350-7

Çizelge 25. Kadiroğlu [42]"nın çalışmasında laboratuvar kür grubu için küp ve silindir numunelere ait 28 günlük basınç dayanım sonuçları

Numune Şekli	Numune Sayısı	Ort. Day., f_{cm} (N/mm ²)	Std. Sapma, S (N/mm ²)	%10 Risk için Karak. Day., f_{ck} (N/mm ²)
Silindir (15x30cm)	15	49,0	0,99	47,7
Küp (15x15x15cm)	15	51,2	1,6	49,1



Şekil 24. Kadiroğlu [42]"nın çalışmasında farklı yöntemlerle elde edilen basınç dayanımı-kür ilişkisi

Çizelge 26. Kadiroğlu [42]"nın çalışmasında basınç dayanımı sonuçları

Grup	Deney Yöntemi	Ortalama Dayanım, f_{cm} (N/mm ²)	Standart Sapma, σ (N/mm ²)	%10 Risk İçin Karak. Day., f_{ck} (N/mm ²)	Varyasyon, V (%)
TK	Schmidt Çek. Ort. Eşdeğer Küp Basınç Day.	44,50	2,56	41,22	5,76
	15x15x15cm Standart Küp	49,00	1,52	47,05	3,21
	15x30cm Standart Silindir	44,40	1,35	42,67	3,16
	5x5 cm Karot	40,86	4,28	35,38	10,47
	5x10 cm Karot	37,86	4,64	31,92	12,25
	10x10 cm Karot	42,58	4,58	36,72	10,76
	10x20 cm Karot	37,18	3,70	32,44	9,95
AK	Schmidt Çek. Ort. Eşdeğer Küp Basınç Day.	45,31	2,09	42,63	4,62
	15x15x15cm Standart Küp	42,20	0,96	40,97	2,37
	15x30cm Standart Silindir	40,90	1,31	39,22	3,32
	5x5 cm Karot	38,55	5,40	31,64	14,00
	5x10 cm Karot	33,25	4,89	26,99	14,71
	10x10 cm Karot	38,89	5,48	31,88	14,10
	10x20 cm Karot	32,89	5,03	26,45	15,30
HK	Schmidt Çek. Ort. Eşdeğer Küp Basınç Day.	32,27	2,08	29,61	6,46
	15x15x15cm Standart Küp	39,50	0,91	38,34	2,38
	15x30cm Standart Silindir	32,30	1,29	30,65	4,15
	5x5 cm Karot	37,05	5,69	29,77	15,35
	5x10 cm Karot	34,06	4,99	27,67	14,64
	10x10 cm Karot	37,32	5,55	30,22	14,88
	10x20 cm Karot	34,32	5,28	27,56	15,37

Wu ve diğ. [48] yaptığı çalışmada kaba agreganın tipinin 28 günlük hedef basınç dayanımları 30 MPa, 60 MPa, 90 MPa olan betonların basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları, kırılma enerjileri, karakteristik uzunlukları ve elastisite modülleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmada kaba agreganın olarak kırılmış kuvarzit, kırılmış granit, kireçtaşı ve mermer kullanılmıştır. Su/çimento oranları 0,26-0,44 ve 0,55 seçilmiştir.

Basınç dayanımları s/ç oranı 0,26 için kuvarzitte 98.2 MPa, granitte 99.1 MPa, kireçtaşında 83.4 MPa, mermerde 79.8 MPa'dır. S/Ç oranı 0,44 için kuvarzitte 70.4 MPa, granitte 65.8 MPa, kireçtaşında 60.5 MPa, mermerde 62.1 MPa'dır. S/Ç oranı 0.55 için ise kuvarzitte 44.8 MPa, granitte 43.2 MPa, kireçtaşında 46.6 MPa, mermerde 45 MPa'dır.

Yarmada çekme dayanımları s/ç oranı 0,26 için kuvarzitte 8.4 MPa, granitte 7.9 MPa, kireçtaşında 7.3 MPa, mermerde 7.6 MPa'dır. S/Ç oranı 0,44 için kuvarzitte 5.2 MPa, granitte 5.3 MPa, kireçtaşında 5 MPa, mermerde 5.1 MPa'dır. S/Ç oranı 0,55 için ise kuvarzitte 4.1 MPa, granitte 4.2 MPa, kireçtaşında 3.9 MPa, mermerde 4.2 MPa'dır.

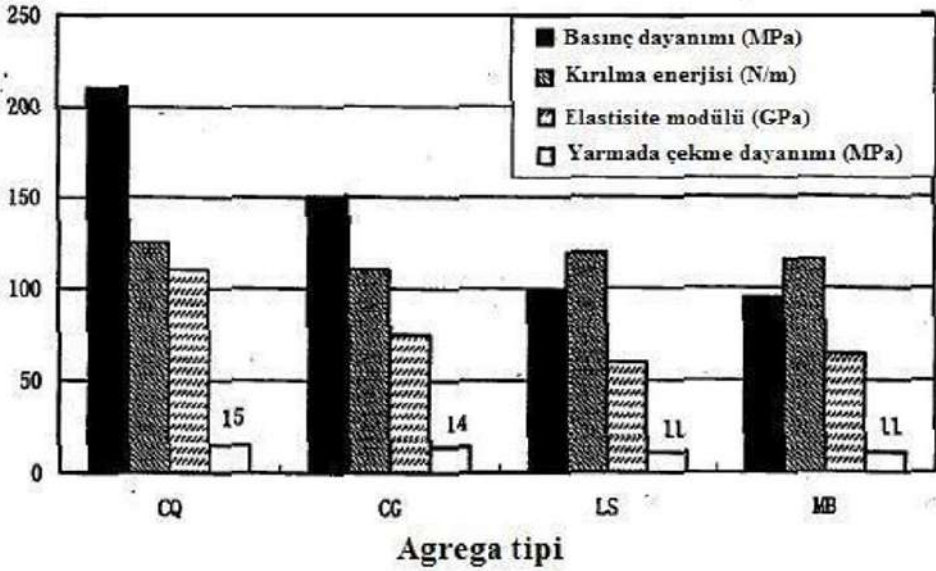
İri agregalar tipinin yüksek dayanımlı beton üzerine olan etkisi çok önemlidir. Bu çalışmada kırılmış kuvarzitle yapılan yüksek dayanımlı betonun, mermerle yapılan yüksek dayanımlı betona göre %10-20 daha fazla basınç ve yarmada çekme dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte hedef basınç dayanımı 30 MPa olan farklı iri agregalarla yapılmış olan betonların dayanımları arasındaki farklar düşüktür.

Agregaların kırılma mekanik özelliklerinin yanında, iri agregalar tipi de kırılma enerjisini önemli ölçüde etkilemektedir. Aynı dayanım sınıfında kuvarzitle yapılmış yüksek dayanımlı betonların kırılma enerjileri, granitle yapılmış yüksek dayanımlı betonların kırılma enerjilerinden %10-20 oranında daha fazladır. Test sonuçlarından agregalar tipinin betonun kırılma enerjisi yönünden etkili olduğu ve bazı agregaların yüksek dayanımlı betonların gevrekliğini düşürdüğü anlaşılmıştır.

Betonun gevrekliği karakteristik uzunluğu olarak adlandırılmaktadır ve I_{ch} simgesiyle gösterilmektedir. Agregalar çeşidinin kırılma enerjisinde olduğu gibi, karakteristik uzunluk üzerinde de etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca test sonuçları betonun dayanımıyla birlikte gevrekliğinin arttığı durumda karakteristik uzunluğun düştüğünü göstermiştir.

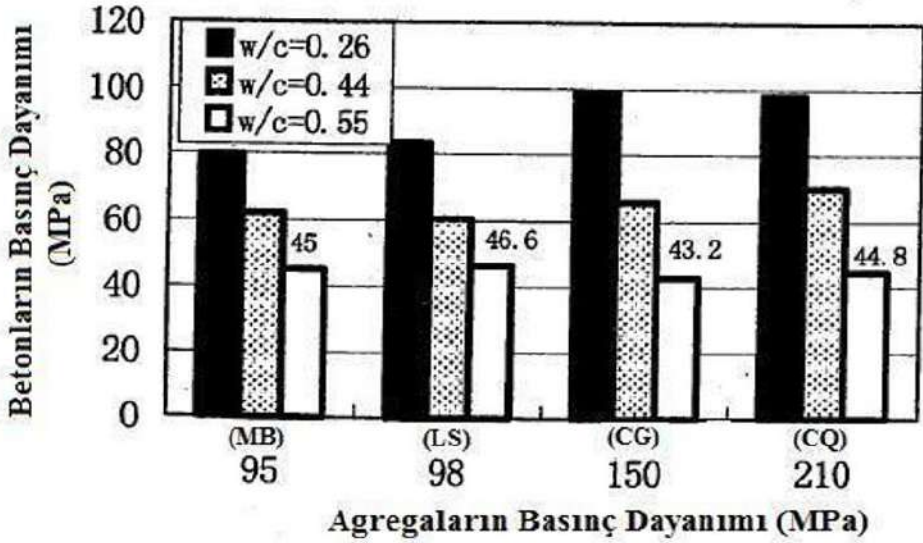
Betonun elastik özelliklerinin, betonu oluşturan elemanların elastik özellikleri ve agregalarla çimento hamuru arasındaki ara yüzeyin durumuna bağlı olduğu bilinmektedir. Agregalar betonda doğal katılık ve yüksek hacim kaplaması dolayısıyla, betonun elastisite modülü üzerinde büyük etkiye sahiptir. Sadece agregalar katılığı değil, aynı zamanda agregalar tipi de elastisite modülünü etkiler. Deney sonuçlarından aynı s/ç oranındaki kuvarzit betonunun elastisite modülü en yüksek değerdedir. Bunun nedeni kuvarzitin elastisite modülünün, diğer agregaların elastisite modülünden %30-50 oranında daha yüksek olmasıdır. Betonun basınç dayanımı düştükçe elastisite modülü değeri de düşmektedir. Basınç dayanımı arttıkça elastisite modülü değeri de artmaktadır.

Çalışmanın sonunda yüksek dayanımlı ve düşük gevreklikte agregalar kullanılarak, yüksek dayanımlı ve düşük gevreklikte beton üretilebileceği kanaatine varılmıştır. Şekil 25'te kullanılan agregalar tiplerinin mekanik özellikleri, Şekil 26'da betonun basınç dayanımı ile agregaların basınç dayanımı arasındaki ilişki, Şekil 27'de betonların yarmada çekme dayanımı ile agregaların yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki, Şekil 28'de betonların kırılma enerjisi ile agregaların kırılma enerjisi arasındaki ilişki, Şekil 29'da betonların kırılma enerjisi ile basınç dayanımı arasındaki ilişki, Şekil 30'da betonların basınç dayanımının karakteristik uzunlukları üzerine etkisi ve Şekil 31'de betonların elastisite modülü ile agregaların elastisite modülü arasındaki ilişki gösterilmiştir.



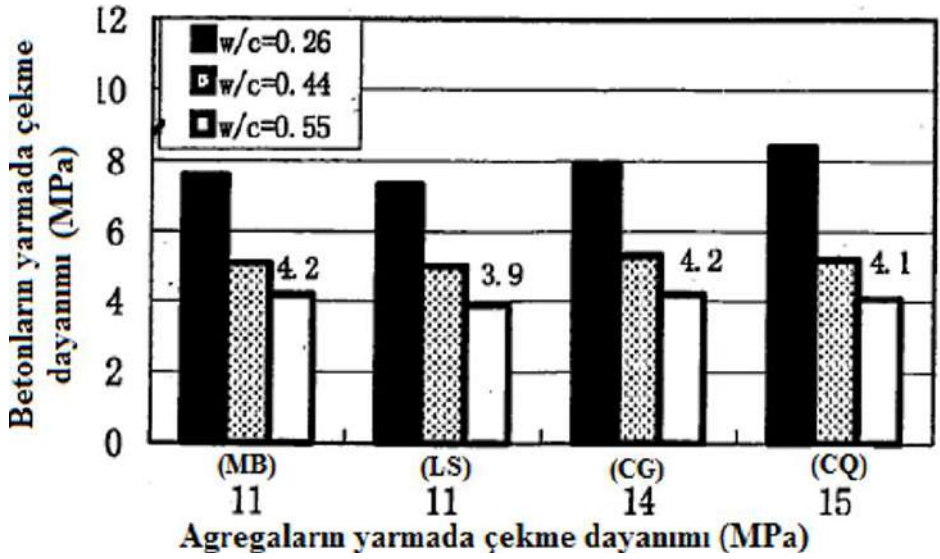
(CQ: Kırılmış kuvarzit, CG: Kırılmış granit, LS: Kireçtaşı, MB: Mermer)

Şekil 25. Wu ve diğ. [48] çalışmasında kullanılan agregaların mekanik özellikleri

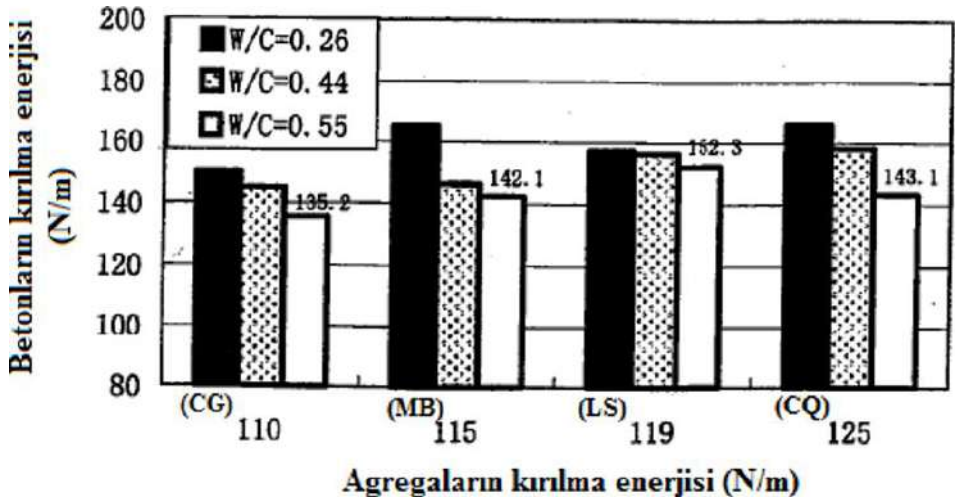


(W/C: Su/çimento oranı)

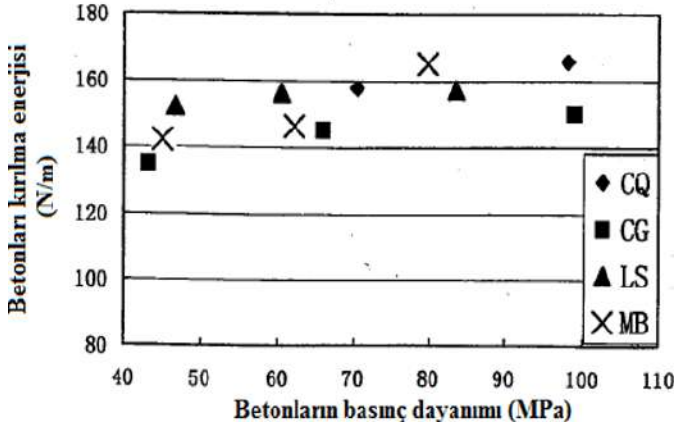
Şekil 26. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların basınç dayanımı ile agregaların basınç dayanımı arasındaki ilişki



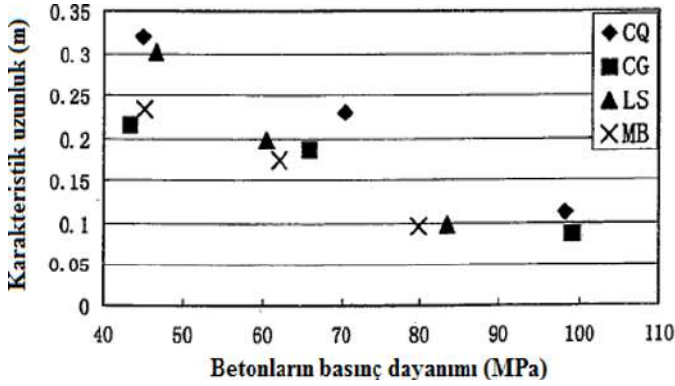
Şekil 27. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların yarmada çekme dayanımı ile agregaların yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki



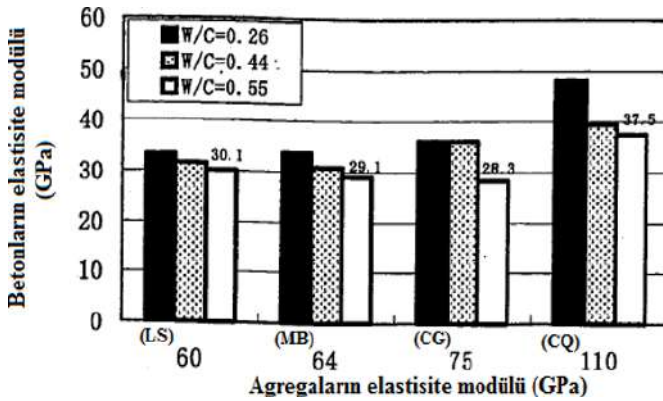
Şekil 28. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların kırılma enerjisi ile agregaların kırılma enerjisi arasındaki ilişki



Şekil 29. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların basınç dayanımı ile kırılma enerjisi arasındaki ilişki



Şekil 30. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların basınç dayanımının karakteristik uzunluk üzerine etkisi



Şekil 31. Wu ve diğ. [48] çalışmasında betonların elastisite modülü ile agregaların elastisite modülü arasındaki ilişki

Uyan, Işık ve Eryurtlu [49]"nın yaptığı çalışmada beton santralinden 2000 ve 2002 yılları arasında üretilen farklı sınıf betonlardan alınan aynı parti numunelerinin, 6 adedi standart laboratuvar şartlarında, 6 adedi de şantiye şartlarında açık havada kür edilerek 3.gün, 7.gün ve 28.gün dayanımları belirlenmiştir.

Üretilen ve şantiye dökümü esnasında alınan beton örneği 15 cm ayrıtlı küp kalıplara doldurulmuş, 20±4 saat boyunca kalıptan çıkarılıncaya kadar açık havada bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan numunelerin 6 adedi 23±2 °C sıcaklıktaki kür havuzuna konmuş, diğer 6 adedi de şantiye şartlarında kırım günlerine kadar bırakılmıştır.

DeneySEL çalışmalardan elde edilmiş verilere dayanarak, farklı beton sınıfları ve yaşlarında kür koşullarının etkisiyle farklılıklar gözlenmiştir.

Şantiye koşullarında saklanmış beton numunelerinin laboratuvar şartlarında saklanmış beton numunelerine göre daha düşük mukavemetler verdiği görülmüştür.

2000-2002 yılları arasında kasım- mart dönemine rastlayan numunelerde; dış hava koşullarından kaynaklanan dayanım farklılığının ortalama olarak 3 günlük numunelerde

%21, 7 günlük numunelerde %19 ve 28 günlük numunelerde % 18.2 iken; hava koşullarının daha ılıman olduğu mayıs-ekim döneminde 3 günlük numunelerde %6.4, 7 günlük numunelerde % 6.1 ve 28 günlük numunelerde %14 dayanım farklılığı olduğu görülmüştür.

Büyüktaş ve Alagöz [50] Türkiye’de üretilen çimento çeşitlerinin sulama kanalı betonlarında kullanılabilirliğinin incelenmesi ve kanal betonları için ideal olan çimento türü ve karışımının belirlenmesi üzerinde araştırma yapmışlardır.

Araştırmada materyal olarak, portland çimento, puzolanik çimento, kompoze çimento ve sülfata dayanıklı çimento olmak üzere 4 çeşit çimento kullanılmıştır.

Kanal kaplama betonlarının üretilmesinde ince agrega (0-4,76 mm) ve kaba agrega (4,76-32 mm) DSİ Adana Bölge Müdürlüğü Kanalet Üretim Tesisleri’nden sağlanmışır.

Beton karma suyu olarak şehir şebekesi suyu kullanılmış ve geçirimsizlik katkısı olarak Sika Deteks Yapı Kimyasalları A.Ş.”den alınan Plastocrete-N ”su geçirimsizlik beton katkı malzemesi” kullanılmıştır.

Çalışmanın ilk aşamasında, arazide iş makinesiyle kanalın yeri açılmış ve zeminde tokmaktama yöntemi ile sıkıştırma yapılmıştır.

İkinci aşamada, portland çimento, puzolanik çimento, kompoze çimento ve sülfata dayanıklı çimentonun her biriyle ,,,TS 1247 (1985) beton yapım, döküm ve bakım kuralları” standardına göre, 2 farklı karışım ve 3 farklı olgunlaştırma koşullarında 2,50 m uzunluğunda ve 2,30 m genişliğinde, taban genişliği 0,40 m

ve şev eğimi 1:1 olan anolar şeklinde olmak üzere toplam 60 m uzunluğunda trapez kesitli beton kaplamalı kanal yapılmıştır. Kanal anolarının üretiminde her çimento çeşidi için;

- I. Karışım: (%40 kum-%60 çakıl-250kg/m³ çimento),
- II. Karışım: (%45 kum-%55 çakıl-250kg/m³ çimento) olmak üzere iki farklı karışım uygulanmış ve her karışım için;
 - I. Uygulama: Bakım yok (anolar hiç sulanmadı),
 - II. Uygulama: Katkılı (%0,5 su geçirimsizlik katkısı kullanıldı),
- III. Uygulama: Kür (standartlara uygun bakımı yapıldı) olmak üzere 3 farklı olgunlaştırma koşulu uygulanmıştır.

Üçüncü aşamada, her çimento çeşidi ile farklı karışımlarda üretilen ve farklı uygulamalara tabi tutularak olgunlaştırılan kanal betonu anoları geçirgenlik testine tabi tutularak sızma miktarları belirlenmiştir. Geçirgenlik testinde yapılan gözlemler sonucunda, 4 çimento çeşidinin her iki karışımında da bakım yapılmadan olgunlaştırılan anolar içerisinde 4. günün sonunda suyun kalmadığı, buna karşın bakım yapılan anolarda ise 10. günün sonunda bile hemen hemen hiç sızmanın olmadığı gözlenmiştir.

Dört çeşidin her karışımında da katkı kullanılarak olgunlaştırılan ve kürde olgunlaştırılan kanal betonu anolarında meydana gelen sızma miktarlarının çok düşük olduğu, bu sızma miktarlarının Türkiye ortalamasının (0,0321 l/s/m²) ve Bureau of Reclamation sızma standardının kaplamalı kanallar için kabul edilen sızma miktarı (0,00024 l/s/m²) değerinin çok altında olduğu gözlenmiştir.

Dördüncü aşamada, 4 çimento çeşidi ile farklı karışımlarda dökülen ve farklı uygulamalara tabi tutularak olgunlaştırılan anolardan, 28 gün sonra karot alma makinesi ile 5"er adet olmak üzere toplam 120 adet karot örnekleri alınmış ve başlıklararak aksel basınç dayanımları belirlenmiştir. Karot örnekler her anoda karot alma makinesi ile tesadüfi olarak dairesel şekilde alınmıştır. Anolardan alınan karot örnekleri %70 kükürt ve

%30 grafit karışımıyla „TS 3068 (1978) Laboratuarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı"" standardına göre başlıklandıktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi işlemi, ""TS 10465 (1992) Beton Deney Metotları, Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini"" standardına göre 200 ton kapasiteli 2,50 kg-m/s hızla yükleme yapabilen dijital göstergeli beton presi ile yapılmıştır.

Çalışmada yapılan gözlemler sonucunda, iki farklı karışım ve üç farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanal betonu anolarından alınan karot örneklerinin basınç dayanımlarına bakıldığında, 4 çimento çeşidinin her iki

karışımında da bakım yapılmayan anoların karot dayanımları diğer olgunlaştırma koşullarına oranla daha düşük çıkmıştır.

Yine kullanılan çimento çeşitlerinin hepsinde ikinci karışımlarda yapılan anolardan alınan karot örneklerinin basınç dayanımlarının, 3 farklı olgunlaştırma koşulunda da birinci karışımında yapılan anolardan alınan karot örneklerin basınç dayanımlarına oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Bakım yapılmadan olgunlaştırılan anolardan alınan karotların basınç dayanımları, Şimşek (1993) Şanlıurfa ana sulama kanalı beton kaplamasından aldığı karot dayanım değerlerinden (en yüksek basınç dayanımını 169 kg/cm^2 bulurken, en düşük basınç dayanımını ise $77,7 \text{ kg/cm}^2$ bulmuştur) daha yüksek çıkmıştır.

Gözlemler sonucunda elde edilen en düşük karot basınç dayanımı değeri bile (puzolanik çimento kullanılarak birinci karışımında üretilen ve bakım yapılmadan olgunlaştırılan anolardan elde edilen dayanım (164 kgf/cm^2)) DSİ Sulama İnşaatları Teknik Şartnamesi,nde belirtilen dayanım değerine (BS 14) ulaşmıştır. Bununla birlikte, 4 farklı çimento çeşidinin her iki karışımında da, kürde olgunlaştırılan anolardan alınan karot örneklerinin basınç dayanımları, DSİ Sulama İnşaatları Teknik Şartnamesi,nde belirtilen dayanımdan (BS 14) daha yüksek çıktığı gözlenmiştir.

DSİ Sulama İnşaatları Teknik Şartnamesi (1993)“ ne göre kanal kaplama betonu genel olarak BS 14 olmalıdır ve bu değer bulunmasında en düşük çimento miktarının 275 kg/m^3 olmalıdır. Bu çalışmada, diğer karışım oranları aynı olmakla birlikte 250 kg/m^3 çimento miktarı kullanılarak şartnamede ön görülen beton dayanımından daha büyük dayanım elde edilmiştir.

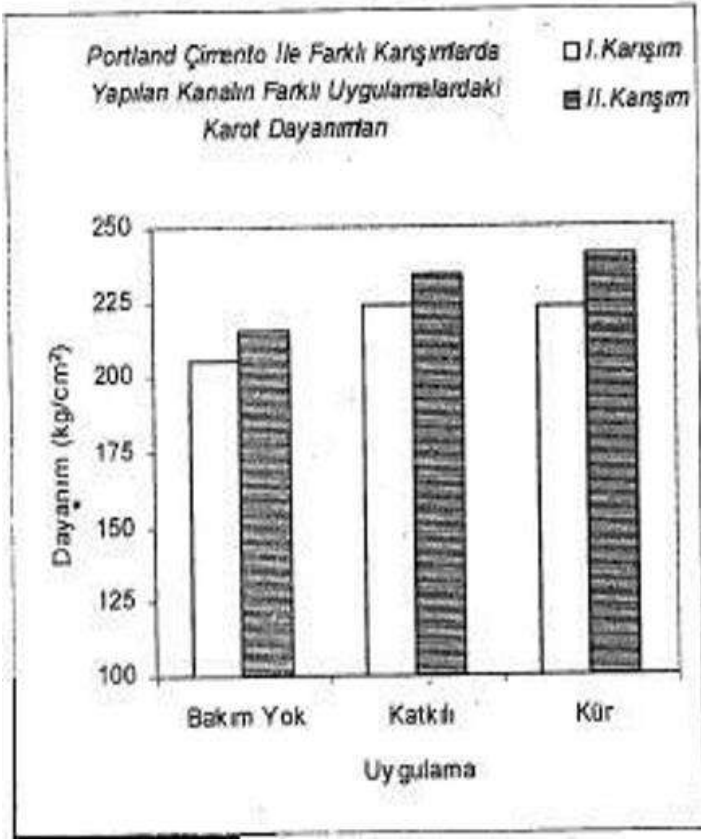
Dört farklı çimento çeşidi kullanılarak üretilen kanal kaplama betonlarının karılma işleminin betoniyele yapılmış olması, s/ç oranının TS 500 [51] standardında ve DSİ Teknik Şartnamesi“nde belirtilen değerlerde tutulmuş olması ve betonun iyi sıkıştırılmış olması, kanal betonlarının basınç dayanımlarının yüksek çıkmasını sağlamıştır. Yine zeminde iyi bir sıkıştırma yapılması ve kanal kaplama kalınlığının tüm yüzeylerde eşit tutulması dayanımın artmasını sağlamıştır.

Bakım yapılmadan olgunlaştırılan kanal anolarının betonlarında boyuna çatlaklar oluşmuş ve bu anolarda sızma kayıpları fazla olmuş, alınan karot örneklerinin dayanımları da düşük çıkmıştır. Bu durum beton karışım oranı ve karma koşulu kadar betonun yerleştirilmesi ve bakımının önemli olduğunu göstermektedir. Çizelge 27“de kanal betonu dökülmesinde uygulanan beton karışım miktarları, Şekil 32“de portland çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları, Şekil 33“te kompoze çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı

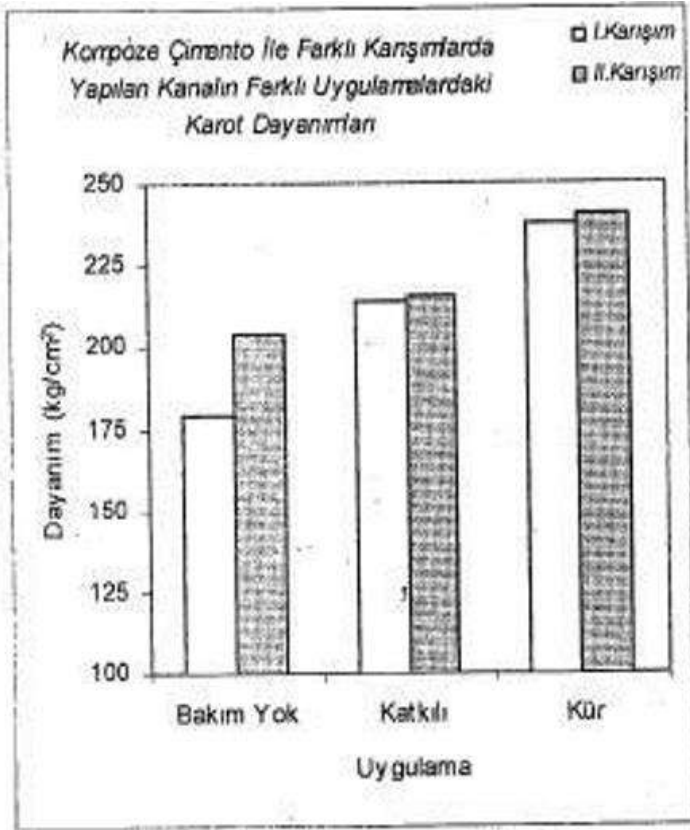
olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları, Şekil 34’’te puzolanik çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları, Şekil 35’’te sülfata dayanıklı çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları, Şekil 36’’da 4 çeşit çimento kullanılarak I. karışımında üretilen kanalın farklı olgunlaştırma koşullarındaki karot dayanımları ve Şekil 37’’de 4 çeşit çimento kullanılarak II. karışımında üretilen kanalın farklı olgunlaştırma koşullarındaki karot dayanımları gösterilmiştir.

Çizelge 27. Büyüктаş ve Alagöz [50]’ün çalışmasında kanal betonu dökülmesinde uygulanan beton karışım miktarları

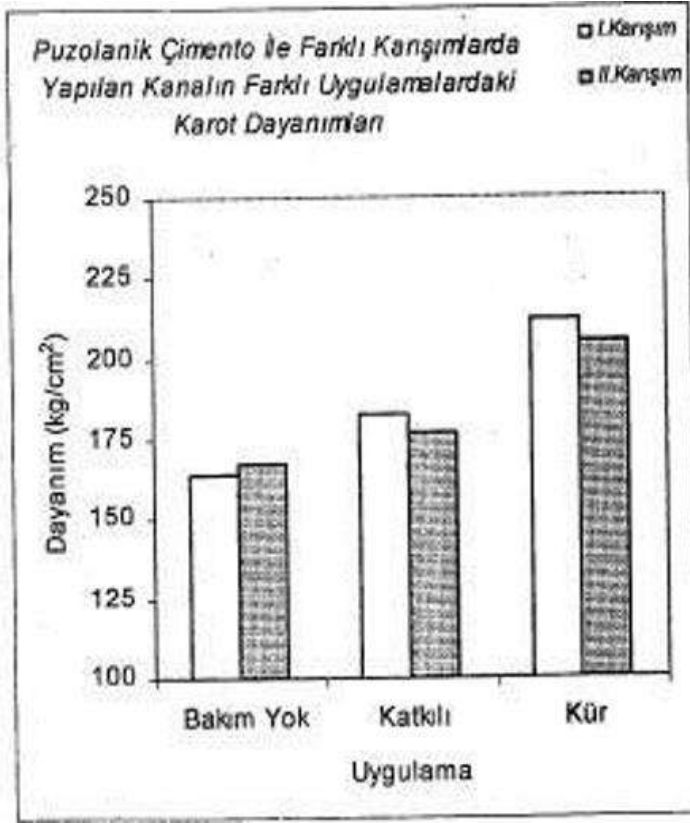
Beton Bileşenleri	1 m ³ Beton için DKY Durumunda Ağırlıklar (Kg)					
	I. Karışım % 40 Kum -% 60 Çakıl			II. Karışım % 45 Kum - % 55 Çakıl		
	Bakım Yok	Katkılı	Kür	Bakım Yok	Katkılı	Kür
Kum (0/4.76 mm)	741	741	741	833.4	833.4	833.4
Çakıl I (4.76/9.52 mm)	555.6	555.6	555.6	509.3	509.3	509.3
Çakıl II (9.52/32 mm)	555.6	555.6	555.6	509.3	509.3	509.3
Çimento (Kg)	250	250	250	250	250	250
Su (Kg)	137.5	125	137.5	137.5	125	137.5
S/Ç	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Katkı		1.25			1.25	
Toplam Agrega Miktarı = 1852 Kg						



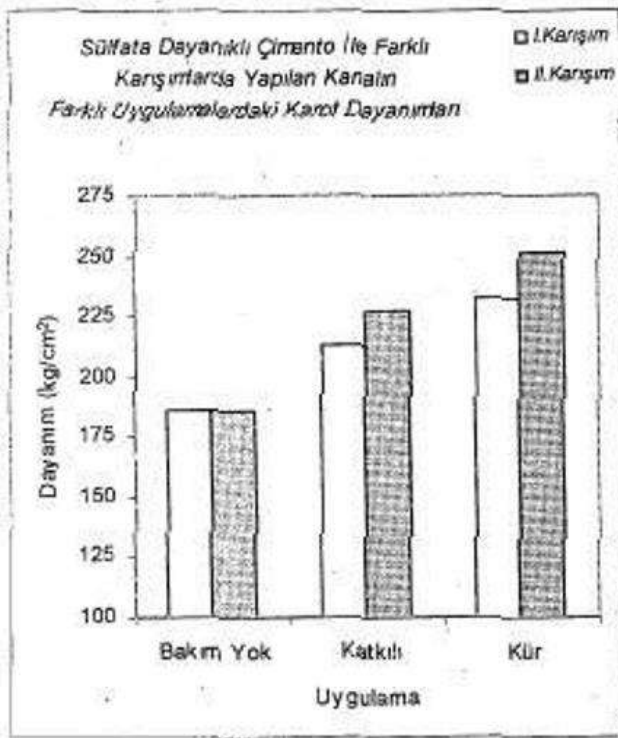
Şekil 32. Büyüktaş ve Alagöz [50]'ün çalışmasında portland çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları



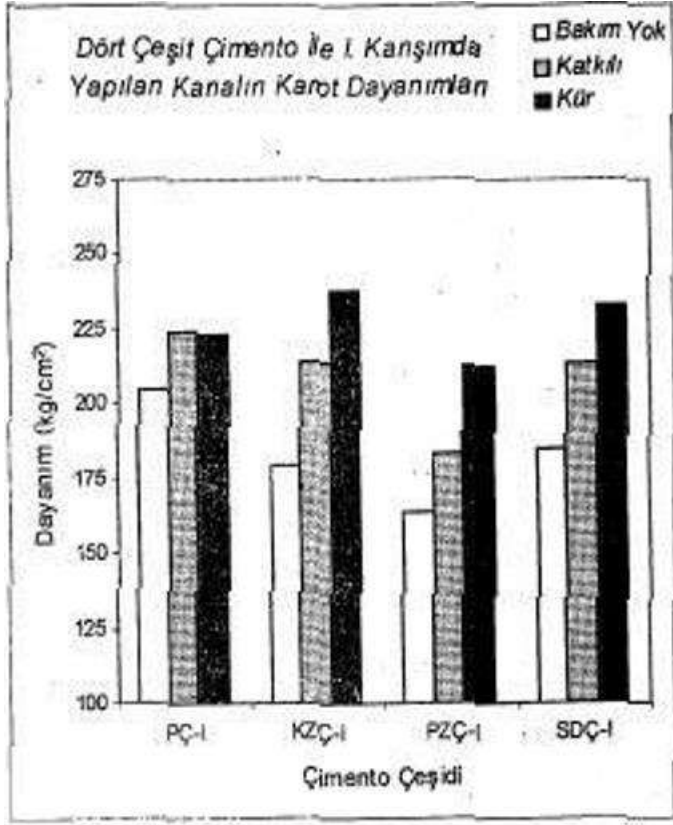
Şekil 33. Büyüktaş ve Alagöz [50]'ün çalışmasında kompozite çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları



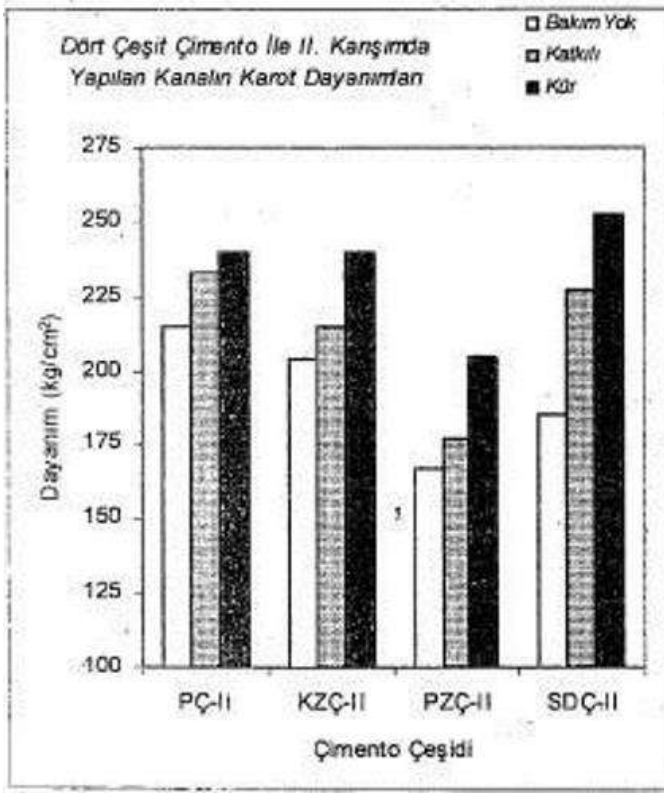
Şekil 34. Büyüktaş ve Alagöz [50]'ün çalışmasında puzolanik çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları



Şekil 35. Büyüktaş ve Alagöz [50]'ün çalışmasında sülfata dayanıklı çimento kullanılarak farklı karışım ve farklı olgunlaştırma koşullarında yapılan kanaldan alınan karot örneklerin dayanımları



Şekil 36. Büyüктаş ve Alagöz [50]'ün çalışmasında 4 çeşit çimento kullanılarak I. karışımında üretilen kanalın farklı olgunlaştırma koşullarındaki karot dayanımları



Şekil 37. Büyüktaş ve Alagöz [50]'ün yaptığı çalışmada 4 çeşit çimento kullanılarak II. karışımın üretilen kanalı farklı olgunlaştırma koşullarındaki karot dayanımları

Zain, Safiuddin ve Mahmud [52] yüksek su/bağlayıcı oranlarında silis dumanı kullanılarak yapılmış yüksek performanslı betonun mekanik özelliklerindeki gelişmeyi incelemişlerdir.

0,45 ve 0,50 su/bağlayıcı oranlarında silis dumanlı beton ve normal portland çimentolu betonu üretmişlerdir. Kuru hava ve su kürünü kullanmışlardır. Maksimum kür yaşını 91 gün ve kür sıcaklıklarını ise 20 °C, 35 °C ve 50 °C olarak belirlemişlerdir. Kuru hava kürü uygulanan numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra sıcaklığı 20 °C olan odada bekletilmiştir. Su kürü için ise numuneler aynı odadaki su havuzuna yerleştirilmiştir. Bağıl nem %65'tir.

50 °C'de küre tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları ve dinamik elastisite modülleri 35 °C'de kür edilen numunelere göre daha düşük çıkmış, yüzey geçirimsizlikleri ise daha yüksek çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda uygulanan kürler çimento hamurunda düşük hidrasyon yarattığı için sertleşmiş betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir. Sıcaklık artışı kuru hava kürüne tabi tutulan betonların basınç dayanımı, dinamik elastisite modülü ve yüzey geçirimsizliklerini, su kürüne tabi tutulanlara göre daha çok etkilemiştir. Deney sonuçlarına göre yüksek basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü ve düşük yüzey geçirimsizlik değerleri 35 °C'deki kürede elde edilmiştir.

Silis dumanlı betonun yüzey geçirimsizliği normal portland çimentolu betondan çok daha düşük çıkmıştır. Deneylerde en düşük yüzey geçirimsizlik değeri olan $7,9 \times 10^{-2}$ ml/m²/s.,yi 0,45 su/bağlayıcı oranında, su küründe silis dumanlı beton vermiştir. Deneylerde silis dumanlı beton en yüksek basınç dayanımı ve dinamik elastisite modülü değerini ve en düşük yüzey geçirimsizlik değerini vermiştir.

Deney sonuçlarından da anlaşılabacağı üzere, yüksek su/bağlayıcı oranlarında kür edilmiş yüksek performanslı betona silis dumanı katılmasının, betonun mekanik özelliklerini olumlu yönde arttırdığı gözlenmiştir.

Kim, Moon ve Eo [53] çeşitli kür sıcaklıklarının, değişik kür yaşlarındaki betonun basınç dayanımı üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla dört çeşit kür yaşı düşünülmüştür. 20 °C referans sıcaklığın dışında, 5 °C ve 40 °C olmak üzere iki ayrı kür sıcaklığı planlanmıştır. Sabit oran modeli esaslı yeni bir basınç dayanımı modeli önerilmiştir. Bu model Saul ve Arrhenius modelindeki denk yaşlar kullanılarak, çeşitli kür sıcaklıklarının farklı kür yaşlarındaki etkisi araştırılmıştır.

Test sonuçları, betonun ilk yaşlarında yüksek sıcaklığa (40 °C) maruz bırakılan beton numunelerinin erken yaşta yüksek dayanıma ulaştığı ama ilerleyen yaşlarda düşük dayanım sergilediğini göstermiştir. Diğer taraftan betonun ilk yaşlarında düşük sıcaklığa (5 °C) maruz bırakılan deney numunelerinin erken yaşta düşük dayanım gösterdiği ama ilerleyen yaşlarda, 20

°C yani izotermal kür sıcaklıklarındaki deney numuneleriyle aynı dayanımı sergilediği görülmüştür. Yapılan testlerde uygulanan değişik kür sıcaklıklarının 3 günlük süre zarfında etkili olduğu, 3 günden sonra ise betonun basınç dayanımı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

1.8. Yüksek Dayanımlı Beton Elde Etme Yöntemleri

1.8.1. Metha - Aitcin Yöntemi [54]

Metha-Aitcin yöntemi pratik ve kolayca uygulanabilir bir yöntemdir.

Ana İlkeler:

1. Yüksek dayanımlı beton için istenen basınç dayanımı, işlenebilirlik ve hacimsel stabiliteyi sağlamak için, hacimsel olarak optimum %35 çimento hamuru olmalıdır.
2. Çökme ve maksimum agregası boyutunun, çökmenin süper akışkanlaştırıcı miktarı ile kontrol edildikçe önemli olmadığı görülmektedir.
3. Mineral katkıları ekonomikliğini sağlamak için gereklidir.
4. İnce ve kalın agregası arasındaki hacimsel olarak optimum oran %65'tir.

İzlenecek Yol:

Karışım suyunu tahmin etmek için maksimum agregası boyutu 12-19 mm arasında olan ve büyük çökme sağlayan süper akışkanlaştırıcı katkı beton oluşturulmalıdır.

1. Çimento hamuru hacimsel oranı: Toplam çimento hamuru hacimsel oranı %35 olan ve 0.02 hava içeren durumu sağlamak için portland çimentosunun yalnız kullanılması, portland çimentosu ve uçucu kül veya yüksek fırın cürufunun birlikte kullanılması, portland çimentosunun uçucu kül ve ince öğütülmüş silis dumanı ile birlikte kullanılması olmak üzere üç seçenek vardır.
2. Agregası miktarını tahmin etmek: Düşük dayanım sınıfı için ince ve kaba agregası arasındaki hacimsel oran 2/3'tür.
3. Beton ağırlığını hesaplamak: Portland çimentosu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve agregaların öz ağırlıkları düşünülerek bir referans betonunun karışım oranları hesaplanmıştır.
4. Süper akışkanlaştırıcı oran: Çimentosu maddelerin ağırlığının %1'i oranında süper akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır.
5. İdeal karışımı ayarlamak: Referans alınan beton yol gösterici olmak üzere istenen işlenebilirlik ve basınç dayanımının bulunması için çeşitli karışım oranları denenmelidir.

1.9. Toralles Carbonari Yöntemi [54]

Ana İlkeler:

Bu yöntem yüksek dayanımlı betonun, optimum çimentomsu maddeler ve agregalarla üretilebileceğini savunmaktadır. İnce ve kaba agrega arasında minimum boşluk içeren ideal bir karışım olduğunu belirtmektedir.

İzlenecek Yol:

Su/(çimento + katkı malzemesi) oranı ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi belirlenmelidir.

1. İnce ve kaba agrega optimizasyonu: İnce ve kaba agrega karışımı ve minimum boşluk oranı belirlenmelidir.
2. Çimentomsu maddelerle agregaların karışımı: Boşluk oranı % 0-10 arasında olan birçok farklı çimentomsu maddeler ve agregalar karıştırılmıştır. Tasarlanan basınç dayanımı ve işlenebilirliğine ulaşmak için çeşitli çimentomsu madde ve agrega karışımları test edilmelidir.

1.9.1. Aitcin Yöntemi

Aitcin yöntemi [54], Mehta-Aitcin yönteminin geliştirilmesi ve gerekli modifikasyonların yapılması ile elde edilmiş bir yöntemdir.

Ana İlkeler:

ACI 2111 Standard Practice for Selecting Proportions“ın normal, ağır ve kütle betonları içinki yaklaşımı ile aynı yaklaşıma sahiptir. Yaklaşık hacim yöntemini esas alan ampirik sonuçların ve matematik hesapların kombinasyonudur.

İzlenecek Yol:

1. Su/çimentomsu madde oranı nomogram tarafından belirlenebilir (28 günlük basınç dayanımı 40-160 MPa arası olan betonlar için).
2. Süper akışkanlaştırıcının, betonun işlenebilirliğini sağladığı noktaya göre, minimum su miktarı tahmin edilir.
3. Süper akışkanlaştırıcının dozajı, betonun işlenebilirliğinin sağlandığı noktadan anlaşılabilir.
4. Kaba agrega hacmi, biçimine bağlı olarak bulunabilir.
5. İlk olarak %1.5 oranında hapsolmuş hava hacmi tahmin edilmektedir. Denenen beton karışımından, tahmin edilen hapsolmuş hava hacmi doğrulanmalıdır.
6. Madde karışım oranlarını hesaplamak için bir karışım dizayn tablosu oluşturulmalıdır.

2. SONUÇLAR

Bu çalışmada geleneksel ve yüksek dayanımlı betonların farklı kür koşulları altında dayanımı deneysel olarak incelenmiştir. Bu inceleme için belirlenen deneysel çalışma planına uygun olarak, söz konusu numuneler merkezi basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Üretilen C55, C20 ve C12 sınıflarındaki betonlar üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Hiç suda kür edilmeyen numunelerde yüksek dayanımlı betonun soğuk ortama göre basınç dayanımı artmıştır.
- Standart ortamda kür edilen yüksek dayanımlı betonun soğuk ortama göre basınç dayanımı artmıştır.

KAYNAKLAR

1. Berktaş, İ., Genelde Yüksek Dayanımlı Beton, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 1-14.
2. Ersoy, U. ve Tankut, T., Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı ile İlgili Bir İrdeleme, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 122-139.
3. Kocataşkın, F., Yüksek Dayanımlı Betonun Bileşimi, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 211-226.
4. Kocataşkın, F., Betonun Dünü, Bugünü, Yarını, 2.Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 23-41.
5. Cengiz, Çiğdem. 2019. “Nonparametric Estimation of a Renewal Function in the Case of Censored Sample.”
6. Cengiz, Cigdem. 2024. “The Relationship Between Electricity Consumption From Outdoor Lighting And Economic Growth.” *Light and Engineering* 32(4):14–21. doi: 10.33383/2023-032.
7. Cengiz, Mehmet Sait. 2022a. “Lighting Master Plan Application In Living Areas.” *Light and Engineering* 30(6):124–32. doi: 10.33383/2021-111.
8. Cengiz, Mehmet Sait. 2022b. “Using Electric Lighting To Support Day-Lighting In Architectural Building Designs.” *Light and Engineering* 30(1):113–23. doi: 10.33383/2021-086.
9. M.S.,Cengiz, engiz, (2018). Numerical Analysis of Tunnel Led Lighting Maintenance Factor. *IJUM Engineering Journal*,19, 2, 154-163. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v19i2.1007>
10. Ahmad, S.H. ve Shah, S.P., High Strength Concrete-A Review,Utilization of High Strength Concrete Preceedings, Syposium in Stavanger, Norway, June 1987, 255-268.
11. Üzümeri, Ş. M. ve Özden, Ş., Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaatta Kullanımı Konusunda Standartlar ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 159-178.
12. Collepardi, M., Kozanoğlu, C. ve Yanardağ, C., Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 67-75.
13. Maton, R., Adhérence Acier-Béton: Propriétés des Bétons à Hautes et Très Hautes Performances, Thèse de I^{re} Université Nancy I, France,1988.

14. De Larrard, F. ve Malier, Y., Çok Yüksek Mukavemetli Betonların Mühendislik Özellikleri, 2.Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 76-113.
15. De Larrard, F. ve Malier, Y., Formulation et Propriétés des Bétons à Très Hautes Performances Thèse de Doctorale, ENPC-L.P.C. Research Report, No. 149,1988.
16. Durmuş, A., Dahil, H. ve Arslan, M.E., Yüksek Başarımlı Beton-Donatı Aderansının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 441, 2006, 45-52.
17. Building Code and Commentary, ACI 318M-89/318RM-89, Detroit, 351.
18. Nilson, A. H., "High Strength Concrete – An Overview of Cornell Research", Utilization of High Strength Concrete, Proceedings, Symposium in Stavenger, Norway, June 1987, 27-38.
19. Erdoğan, Y. T., Betonun Kürü, Beton, Mayıs 2003, Ankara, 370-405.
20. Atiş, C. D., Özcan, F., Kılıç, A., Karahan, O., Bilim, C. ve Severcan, M. H., Influence of Dry and Wet Curing Conditions on Compressive Strength of Silica Fume Concrete, Building and Environment, 40, 12, December 2005, 1678-1683.
21. Jianyong, L. ve Pei, T., Effect of Slag and Silica Fume on Mechanical Properties of High Strength Concrete, Cement and Concrete Research, 27, 6, 833-837, 1997.
22. Yazıcıoğlu, S. ve Demirel, B., Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılan Elazığ Yöresi Pomzasının İlerleyen Kür Yaşlarında Betonun Basınç Dayanımına Etkisi, Fırat Üniv., Fen ve Müh. Bil. Der., 18, 3, 367-374, 2006.
23. Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., Pomza ve Mineral Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Gazi Üniv., Müh. Mim. Fak. Der., 21, 4, 675-680, 2006.
24. Yılmaz, A., Çeşitli Çimentolarla Üretilen Harçlar için Olgunluk Fonksiyonlarının Geçerliliğinin Araştırılması, DEÜ, Müh. Fak., Fen ve Müh. Der., 7, 1, 31-41, 2005.
25. TS 24 (TS EN 196-1), Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım"", TSE, Ankara, Mart 2003.
26. Saul, A.G.A., Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Magazine of Concrete Research (London), 2, 6, 127-140, 1951.
27. Freiesleben, Hansen, P. ve Pedersen, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Betong, 21, 19-34, 1977.

28. Plowman, J.M., Maturity and the Strength of Concrete, ACI Journal, Proceedings, 68, 3, 196-203, 1956.
29. ASTM C 1074, „Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method“, PA, 2005.
30. Güneyisi, E., Özturan, T. ve Gesoğlu, M., İki Farklı Üreticiden Temin Edilen Benzer Tipte Portland Kompoze Çimentoları (CEM II/B-M) ile Üretilen Betonların Dayanım ve Klorür Geçirimsizlik Özelliklerinin Karşılaştırılması, Hazır Beton Der., Eylül-Ekim 2006, 66-72.
31. TS EN 197-1, „Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri“, TSE, Ankara, Mart 2002.
32. AASHTO T 277 (ASTM C1202), „Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration“, PA, 2003.
33. Gesoğlu, M., Güneyisi, E. ve Mermerdaş, K., Metakaolin Miktarının ve Kür Koşullarının Betonun Basınç Dayanımı ve Elektriksel Direnci Üzerine Etkileri, Hazır Beton Der., Mart-Nisan 2007, 72-76.
34. Mazloom, M., Ramezaniapour, A .A. ve Brooks, J. J., Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Cement & Concrete Composites 26, 2004, 347-357.
35. Shannag, M. J., High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume, Cement & Concrete Composites 22, 2000, 399-406.
36. Nassif, H.H., Najm, H. ve Suksawang, N., Effect of Pozzolanic Materials and Curing Methods on the Elastic Modulus of HPC, Cement and Concrete Composites, 27, 6, July 2005, 661-670.
37. Felekoğlu, B. ve Türkel, S., Biçim ve Boyutların Beton Basınç Dayanımına Etkisi, G.Ü., Fen Bilimleri Dergisi, 18, 4, 639-645, 2005.
38. Yazıcıoğlu, S. ve Bozkurt, N., Silis Dumanı Katkılı Taşıyıcı Hafif Betonun Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10, 1, 2006.
39. TS EN 206-1, „Beton- Bölüm1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk“, TSE, Ankara, Nisan 2002.
40. Persson, B., Poisson’s Ratio of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Research, 29, 1999, 1647-1653.
41. Jianyong, L. ve Yan, Y., A Study on Creep and Drying Shrinkage of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, 1203-1206.
42. Kadiroğlu, İ., Farklı Kür Koşulları Altındaki Betonarme Yapı Elemanlarının Basınç Dayanımı Tespitinde, Standart Numuneler ve Farklı Boyutlardaki Karot Numuneleri Arasındaki İlişkiler, <http://beton2004.googlepages.com/58.pdf>.

43. TS 1247, „„Beton Yapım, Döküm ve Bakım Kuralları (Normal Hava Koşullarında)““, TSE, Ankara, Mart 1984.
44. TS EN 12390-1, „„Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 1: Deney Numunesi Kalıpların Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri““, TSE, Ankara, Nisan 2002.
45. TS EN 12390-2, „„Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılan Deney Numunelerinin Yapımı ve Küre Tabi Tutulması““, TSE, Ankara, Nisan 2002.
46. TS 10465, „„Beton Deney Metotları- Yapı ve Yapı Bileşenlerinde Sertleşmiş Betondan Numune Alınması ve Basınç Mukavemetinin Tayini““, TSE, Ankara, Kasım 1992.
47. ASTM C 42, „„Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete““, PA, 2002.
48. Wu, K.R., Chen, B., Yao, W. ve Zhang, D., Effect of Coarse Aggregate Type on Mechanical Properties of High-Performance Concrete, Cement and Concrete Research, 31, 2001, 1421-1425.
49. Uyan, M., Işık, M., Eryurtlu, D., Betonda Nitelik-Sertleşme Deneyleri Mukavemet Sonuçlarının Karşılaştırılması, <http://beton2004.googlepages.com/128.pdf>.
50. Büyüktaş, K. ve Alagöz, T., Farklı Çimento Çeşitleri ve Karışımları Kullanılarak Yapılan Sulama Kanalı'nın Tahribatlı Yöntemle Dayanımının Belirlenmesi, Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 2005, 18, 3, 321-330.
51. TS 500, „„Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları““, TSE, Ankara, Şubat 2000.
52. Zain, M.F.M., Safiuddin, M. ve Mahmud, H., Development of High Performance Concrete Using Silica Fume at Relatively High Water-Binder Ratios, Cement and Concrete Research, 30, 2000, 1501-1505.
53. Kim, J.K., Moon, Y.H. ve Eo, S.H., Compressive Strength Development of Concrete with Different Curing Time and Temperature, Cement and Concrete Research, 28, 12, December 1998, 1761-1773.
54. Alves, M.F., Cremonini, R.A. ve Dal Molin, D.C.C., A Comparison of Mix Proportioning Methods for High-Strength Concrete, Cement & Concrete Composites 26, 2004, 613-621.
55. Hüssem, M., „„Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi““ Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.

56. TS 1226 ISO 3310-2, „„Deney Elekleri- Teknik Özellikler ve Deneyler- Kısım 2:Delikli Metal Levhalı Deney Elekleri““, TSE, Ankara, Şubat 1996.
57. TS 1227 ISO 3310-1, „„Deney Elekleri- Teknik Özellikler ve Deneyler- Kısım 1: Tel Örgülü Deney Elekleri““, TSE, Ankara, Şubat 1996.
58. TS EN 12620, „„Beton Agregaları““, TSE, Ankara, Nisan 2003.
59. TS EN 1097-6, „„Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri için Deneyler-Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini““, TSE, Ankara, Mart 2002.
60. TS 3529, „„Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini““, TSE, Ankara, Aralık 1980.
61. Hüsem, M., Pul, S. ve Görkem, S.E., Bileşik Eğilme Etkisindeki Yüksek Performanslı Betonarme Kolonların Davranışlarının Araştırılması, Araştırma Projesi Sonuç Raporu, K.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi, Trabzon, 2006.
62. TS EN 12390-3, „„Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini““, TSE, Ankara, Nisan 2002.