

YAPI MERKEZİ' NDE ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETONUN GELİŞİMİ: 1989-2007

Rapor No: YM / AR – GE BÖLÜMÜ / 2007 – 11

Proje Tasarım ve Rapor Yazımı: Dr. Müh. Ergin ARIÖĞLU

Y. Müh. Gözde KURT

Deneysel Çalışmalar: Y. Müh. Orhan MANZAK

Müh. Adnan DONDURMACI

Tekniker Mehmet TOPÇU

Tekniker Kenan ERDEM

ÇAMLICA / İSTANBUL

KASIM 2007

ÖZET

Çok yüksek dayanımlı betonlar yüksek basınç dayanımı, durabilite gibi mühendislik özellikleri nedeni ile giderek artan bir kullanım alanına sahiptir. Gelişen beton teknolojisiyle “süper akışkanlaştırıcı” katkı kullanımı ile su/çimento oranını 0,20 düzeyine düşürülmesi, “silika füme” kullanımı ile agrega – çimento hamuru arayüzünün güçlendirilmesi ve özel kür uygulaması gibi yöntemlerle, beton basınç dayanımları 250 MPa’ a yaklaşmıştır. Birim dayanım başına düşen çimento tüketiminin az olduğu çok yüksek dayanımlı betonlar “sürdürülebilirlik kavramı” açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, Yapı Merkezi’ nde 1989 yılında başlatılan “Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi” kapsamında 2007 yılında üretilen 2346 kgf/cm² – 7 günlük, 10 cm küp – basınç dayanımına sahip betonun (basınç dayanımı-kür süresi değişimi, basınç dayanımı- su çimento oranı değişimi) gibi mühendislik büyüklükleri belli bir ayrıntı içerisinde incelenmiş ve uluslararası beton literatüründe rapor edilen diğer sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Çok yüksek dayanımlı betonların gerek beton, gerekse prefabrikasyon sektöründe kullanım yoğunluğu 1985 yılından sonra artmıştır. Bunu destekleyen önemli faktörlerin başında artan basınç dayanımı ile kesit boyutlarının küçülmesi, projelerde zaman ve para ekonomisinin sağlanması gelmektedir. Ayrıca; bunun kadar önemli olan diğer bir faktör ise “**sürdürülebilirlik kavramı**” için çimentonun az kullanılması, daha açık bir deyişle birim dayanım başına kullanılan çimento miktarının düşürülerek, karbondioksit emisyonunun sektörel bazda fark edilir bir şekilde azaltılmasıdır. Buna paralel olarak da endüstriyel atık olan silikafüme ve uçucu kül gibi mineral katkıları kullanarak, betonun proje süresi boyunca dayanıklılığının artırılma kaygısı da önem kazanmaktadır.

Yapı Merkezi AR – GE Bölümü’ nün, Prefabrikasyon A. Ş. ile 1989 yılından beri birlikte yürüttüğü çok yüksek dayanımlı beton araştırma projesi kapsamındaki beton üretimlerinin ilk evrelerinde, basınç dayanımı $1340 \text{ kgf/cm}^2 - 28 \text{ günlük, } 10 \text{ cm küp}$ – mertebesinde beton üretilirken, 2007 yılında ise $2346 \text{ kgf/cm}^2 - 7 \text{ günlük, } 10 \text{ cm küp}$ – değerine ulaşılmıştır. Çok yüksek dayanımlı beton denemelerinde farklı üretim prosesi ve kür uygulaması ile çok yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretilmiş ve bugün itibarıyla ulaşılan teknik literatürde verilen en yüksek dayanım düzeyi (2150 kgf/cm^2 , *Calgary Üniversitesi, 2004*) aşılmıştır. Araştırma projesi kapsamında ilk üretimlerde basınç dayanımını yükseltmek için, beton arayüzeyi silika füme ile güçlendirilmiştir. Ayrıca; su/çimento oranını aşağı çekme imkanını sağlayan yüksek akışkanlaştırıcılar kullanılarak dayanımlarda önemli mertebelerde artış sağlanmıştır. Bu betonların kırılma modları makroskobik olarak incelendiğinde, arayüzeylerin agregadan daha güçlü olmasından ötürü, kırılma hatlarının çoğu kez agregaların içinden geçtiği belirlenmiştir. Bu gözlemsel bulgu karşısında, projenin ikinci aşamasında agreganın dayanımının yükseltilmesi hedef alınmış ve bunun sonucunda da dayanım düzeyi 1700 kgf/cm^2 mertebesine ulaşılmıştır. Sonraki üretim evrelerinde, betona sıcak kür uygulanmış ($3 \text{ gün } 90\pm 3^\circ\text{C}$ sıcak su kürü, sonra $4 \text{ gün } 21\pm 3^\circ\text{C}$ de normal kür), ayrıca karışıma silika fümeden daha ince malzeme (*öğütülmüş kuvarz ve kalsit tozu*) katılarak, çimento hamuru hem fiziksel, hem de kimyasal olarak daha güçlü hale getirilmiştir. Bunlara ek olarak, kırılma noktasına yakın gerilme düzeylerinde çimento hamuru içinde meydana gelen çatlakların oluşumunu ve ilerlemesini önlemek amacı ile 6 mm uzunluğunda, 0,16 mm çapında ve % 1,5 – hacimce – konsantrasyonunda, mukavemet arttırıcı kısa kesilmiş çelik lifler katılmıştır. Bu bileşenlere sahip betonlarda ise 7 günlük basınç dayanımı $2346 \text{ kgf/cm}^2 - 7 \text{ günlük, } 10 \text{ cm küp}$ – olarak ölçülmüştür.

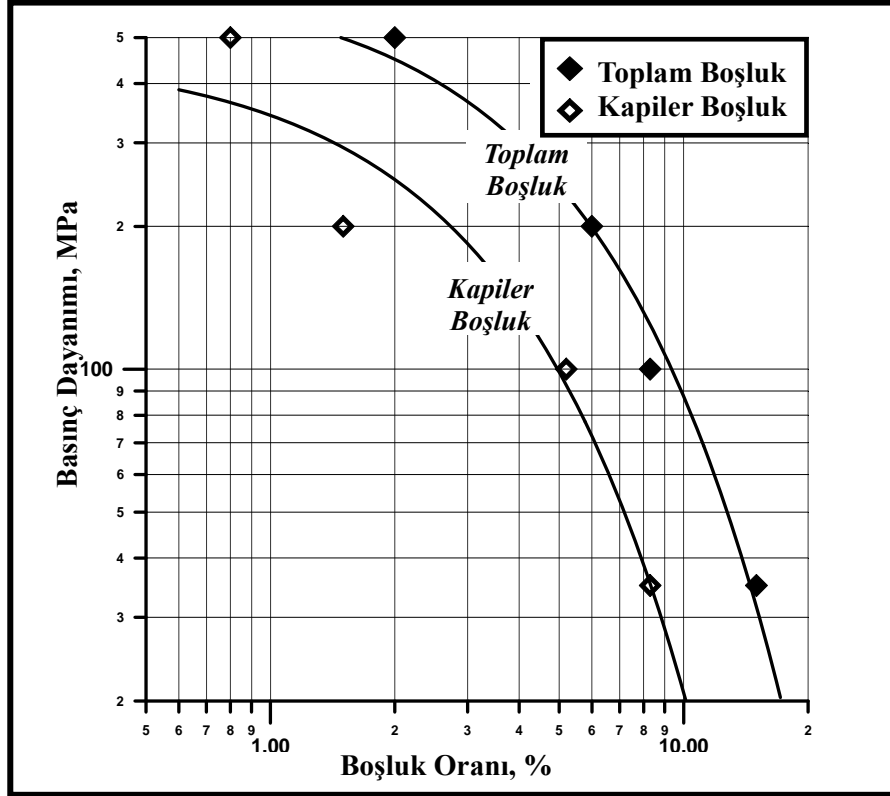
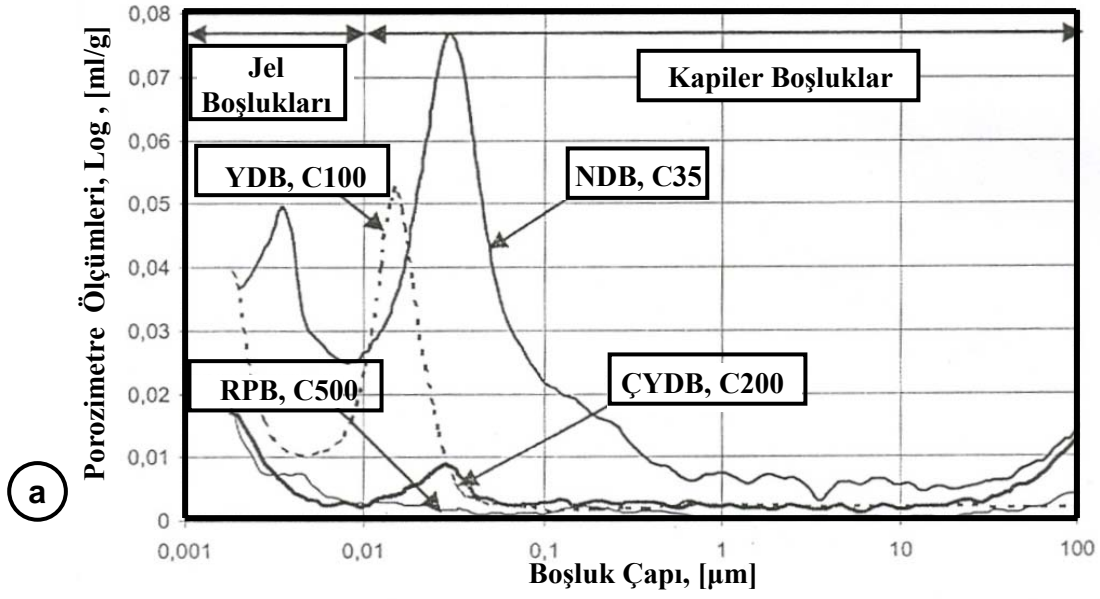
Bu bildiri çerçevesinde 2006 ve 2007 yılı denemelerinde elde edilen sonuçlar ile güncel beton literatüründe rapor edilen deneysel bulguların ayrıntılı bir karşılaştırması verilmektedir. Ayrıca, çok yüksek dayanımlı betonların dayanım düzeylerini arttırmak için, su/çimento oranının azaltılmasını

dışında, agrega granülometrisinin inceltilmesi, porozitenin düşürülmesi, kür sıcaklığını arttırarak, hidrasyon kinematığının olumlu yönde etkilenmesi ve karışımlara lif katılması gibi farklı yöntemlerin de dayanım üzerindeki etkileri çalışma kapsamında incelenmiştir. Çok yüksek dayanımlı beton tasarımları, birim dayanım için kullanılan çimento miktarına göre değerlendirilmiş ve en ekonomik karışım tasarımına Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı betonlarının sahip olduğu belirlenmiştir.

2. ÇOK YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN MİKRO YAPISINA KISA BAKIŞ

Çok yüksek dayanımlı betonlar, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan dayanım düzeyindeki (30 MPa – 40 MPa) betonlardan, sahip olduğu mikro yapı nedeni ile büyük farklılık göstermektedir. Bu farklılığı ortaya koyan [2]' kaynağından alınan Şekil – 1a ve aynı kaynaktan rapor edilen işlenmemiş veriler kullanılarak, bildiri yazarları tarafından oluşturulan Şekil – 1b, farklı dayanım düzeylerindeki betonların mikro yapı özellikleri bakımından önemli bulgular içermektedir. Şekil – 1 yakından incelendiğinde elde edilen önemli sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmektedir:

- Porozimetre ile ölçülen “civa sokulum farkı” büyüklüğünün boşluk çapı ile değişimleri, dayanım düzeyi ile denetlenmektedir. Kapiler boşluklara tanım aralığında (0,01 μm – 100 μm) bakıldığında, basınç dayanımları açısından büyük farklılıklar görülmektedir. Öyle ki; C35 betonunda civa sokulum büyüklüğü özellikle (0,01 μm – 0,1 μm) aralığında çok yüksektir. Ayrıca, dayanım düzeyi arttıkça, kapiler boşluklarda farklılık gözükmemektedir. Jel boşlukları için tanımlanan (0,001 μm – 0,01 μm) aralığında ise düşük dayanım düzeyine sahip betonlar için aynı değişkenlik devam etmektedir. Buna karşın dayanım düzeyi yüksek betonların iç yapısındaki jel boşluklarının olağanüstü azaldığı göze çarpmaktadır. Bu olgu, dayanım artışını sağlayan en önemli faktördür.
- Normal, yüksek ve çok yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımı ile boşluk oranı değişimleri her iki eksen logaritmik eşel alınarak değerlendirildiğinde; basınç dayanımı ile boşluk oranı arasındaki ilişki lineer olmayan bir matematik model ile ifade edilebilir. Artan boşluk oranı ile basınç dayanımı azalmaktadır. Normal dayanımlı betonda – C35 – kapiler ve toplam boşluk oranı sırası ile % 8,3 ve % 15 iken, çok yüksek dayanımlı betonda – örneğin C200 – aynı oranlar % 60 ve % 82 oranında azalarak sırasıyla % 1,5 ve % 6,0 değerini almıştır. Boşluk oranlarında meydana gelen bu azalmalar, çok önemli dayanım artışlarını sağlamıştır .



Boşluk Türü	NB, 35 MPa	YDB, 100 MPa	ÇYDB, 200 MPa	RPB, 500 MPa
Kapiler Boşluk, %	8,3	5,2	1,5	0,8
Toplam Boşluk, %	15,0	8,3	6,0	2,0

Şekil – 1 Farklı dayanım düzeylerine sahip betonlarda boşluk çapı dağılımı (NB= Normal dayanımlı beton, YDB= Yüksek dayanımlı beton, ÇYDB= Çok yüksek dayanımlı beton, RPB= Reaktif pudra betonu).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI

3.1. Kullanılan Malzemeler

Yapı Merkezi “Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi” kapsamında 2007 yılında üretilen beton karışımlarında kullanılan malzemelere ait teknik bilgiler aşağıda kısaca belirtilmiştir:

- Çimento: CEM I 42,5 R (norm dayanımı 425 kg/m²)
- İri agrega: Lüleburgaz Bazalt tozu
- İnce agrega: Dere kumu + Kalsit tozu
- Silika füme:
- Süper Akışkanlaştırıcı:
- Su:
- Çelik lif: Mukavemet artırıcı çelik lif (OL 6/16: boy 6 mm, çap 0,16 mm)

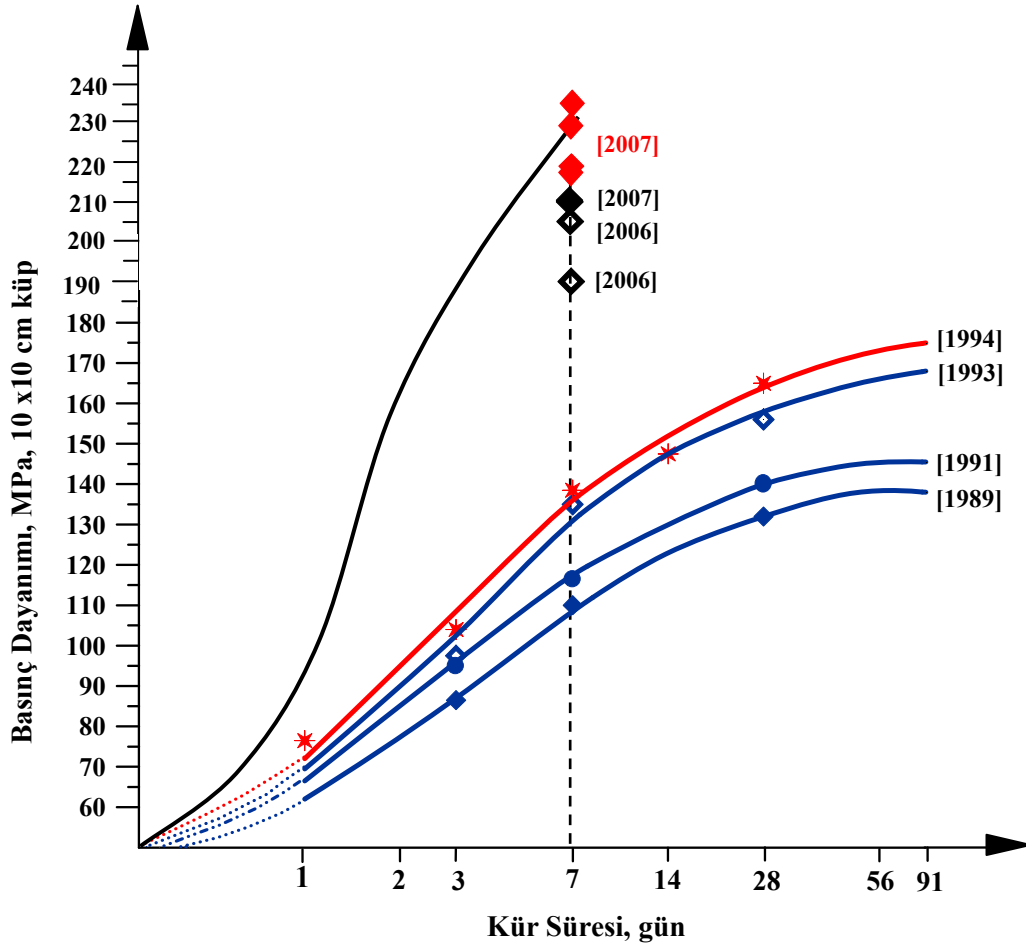
3.2. Karışım Tasarımı

Yapı Merkezi’nde 1989 – 2007 yılları arasında yapılan çok yüksek dayanımlı beton üretimlerine ait karışım bileşenleri ve kullanım oranları Çizelge – 1’de gösterilmiştir. Beton üretimlerinin tamamı ve deneyler Yapı Merkezi Prefabrikasyon A.Ş. Kalite Kontrol Laboratuvarı’nda yapılmıştır. 1989 yılında başlanan ilk denemelerde 1340 kgf/cm² basınç dayanımına sahip beton üretilirken, dayanım düzeyleri 1991, 1993 ve 1994 yıllarında sırası ile 1400 kgf/cm², 1550 kgf/cm² ve 1700 kgf/cm²’ye ulaşmıştır. 1994 yılında ara verilip, 2006 yılında yeniden başlanan üretimlerde iri agrega olarak bazalt, ince agrega olarak kum ile birlikte kuvarz tozu ve kalsit tozu kullanılmıştır.

Çizelge – 1 1989 - 2007 Dönemi Yapı Merkezi Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesinde Kullanılan Karışımlarına Ait Mühendislik Karakteristikleri

Karışım tasarım büyüklükleri	Yıl				
	[1989]	[1991]	[1993]	[1994]	[2007]
Çimento içeriği , [kg/m ³]	525	550	550	550	480
Silika füme içeriği , [kg/m ³]	15	137.5	137.5	55	120
Su/(Çimento+Silika füme) (ağırlıkça)	0.26	0.20	0.18	0.24	0,10
İri agreg a çeşidi	Bazalt	Diabaz	Diabaz	Bazalt	Bazalt
İri agreg a miktarı, [kg/m ³]	1540	1080	1080	1200	1243
İnce agreg a çeşidi	Kum	Diabaz tozu	Diabaz tozu	Kum	Kum+Kalsit tozu
İnce agreg a miktarı, [kg/m ³]	410	570	570	650	682
Toplam agreg a / çimento oranı	3.71	3.00	3.00	3.36	3,22
Taze beton birim ağırlığı, [kg/m ³]	2640	2530	2570	2620	2700

“Yapı Merkezi Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi” üretimlerinde Temmuz, 2007’ de 2346 kgf/cm² basınç dayanımına sahip beton üretilmiştir. Elde edilen bu dayanım düzeyi, bugün itibariyle ulaşılan teknik literatürde verilen en yüksek dayanım düzeyinin (2150 kgf/cm², Calgary Üniversitesi, 2004) oldukça üzerindedir. 1989 – 2007 yılları arasında üretilen çok yüksek dayanımlı betonlara ait basınç dayanımının, kür süresi ile değişimi Şekil – 2 ile gösterilmiştir. 2006 ve 2007 yılında üretilen betonlarda ince malzemelerin kullanımı, çelik lif takviyesi ve özel kür koşulları gibi uygulamalar basınç dayanımlarının 7 günde 200 MPa’ ın üzerine çıkmasına olanak sağlamıştır.



Şekil – 2 Yapı Merkezi Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi’ nde 7 günlük basınç dayanımları – 10 cm küp – kür süresi değişimleri (2006 ve 2007 yılı üretimlerinde numuneler – 3 gün 90±3°C sıcak kür havuzunda bekletilmiş, bir grup numune 21±3°C’ de normal kür edilirken, diğer grup numuneler deney gününe kadar 105±3°C’ de etüvde bekletilmiştir – Diğer yıllarda üretilen betonlara ise – 21±3°C de normal kür – uygulanmıştır. 1 MPa ≈ 10 kgf/cm²).

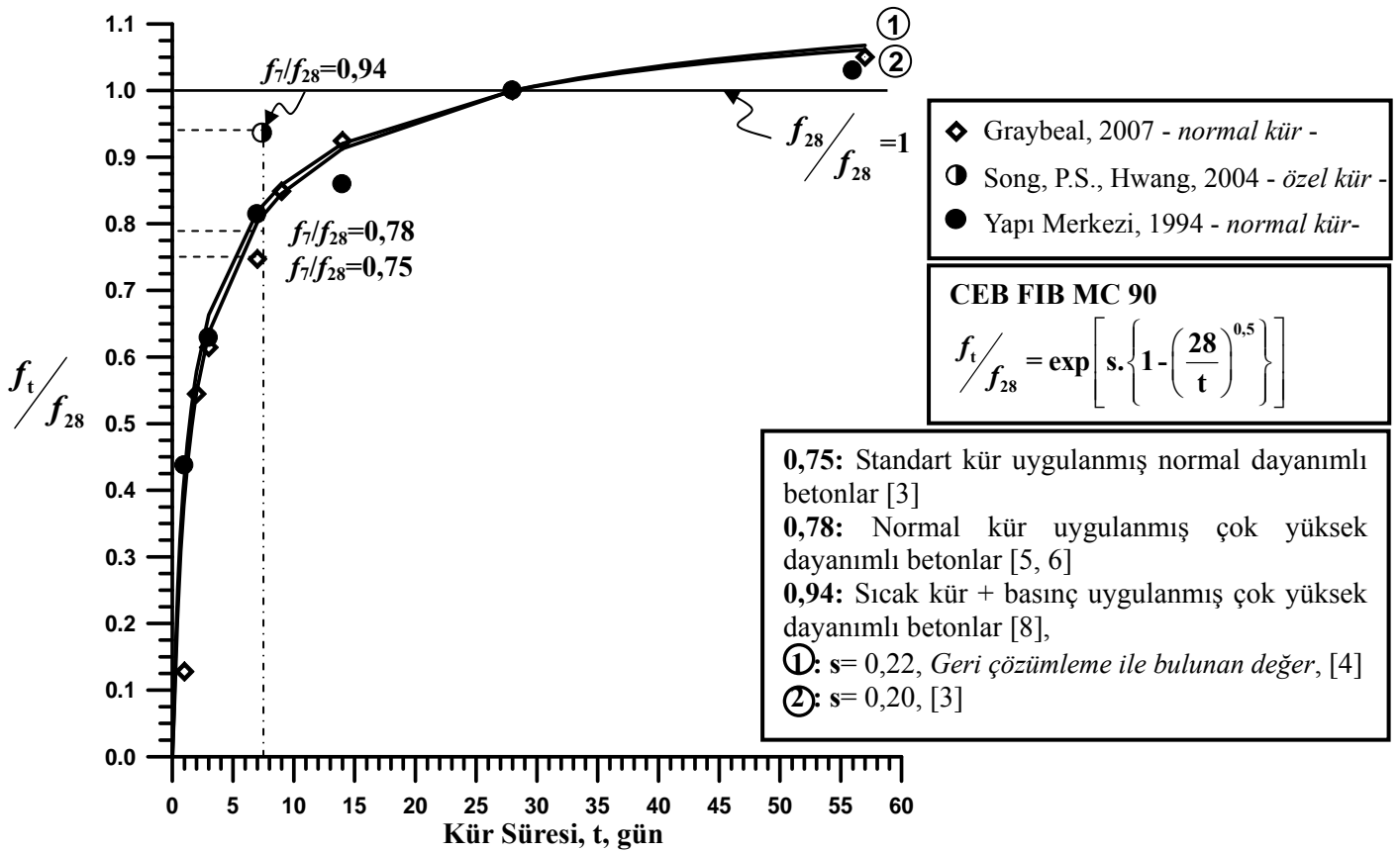
3.3. Deneyler

Deneylerde 10x10x10 cm küp numuneler kullanılmıştır. Numuneler ilk 24 saat döküldükleri çelik kalıpta bekletildikten sonra, ertesi gün kalıptan çıkartılmıştır. 3 gün 90±3°C sıcak su havuzunda kür uygulanan numuneler, deney gününe kadar 105±3°C de etüvde saklanmıştır. Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı beton projesi 2006 yılı üretimlerinde numuneler – 3 gün 90±3°C sıcak kür havuzunda bekletilmiş, sonra 21±3°C de normal kür edilmiştir. Numuneler, 7. gün sonunda deneyden yaklaşık 2 – 3 saat önce sudan çıkarılmış ve deneylere tabi tutulmuştur.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN GÜNCEL BETON LİTERATÜR VERİLERİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

4.1. Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda Basınç Dayanımı – Kür Süresi İlişkisi

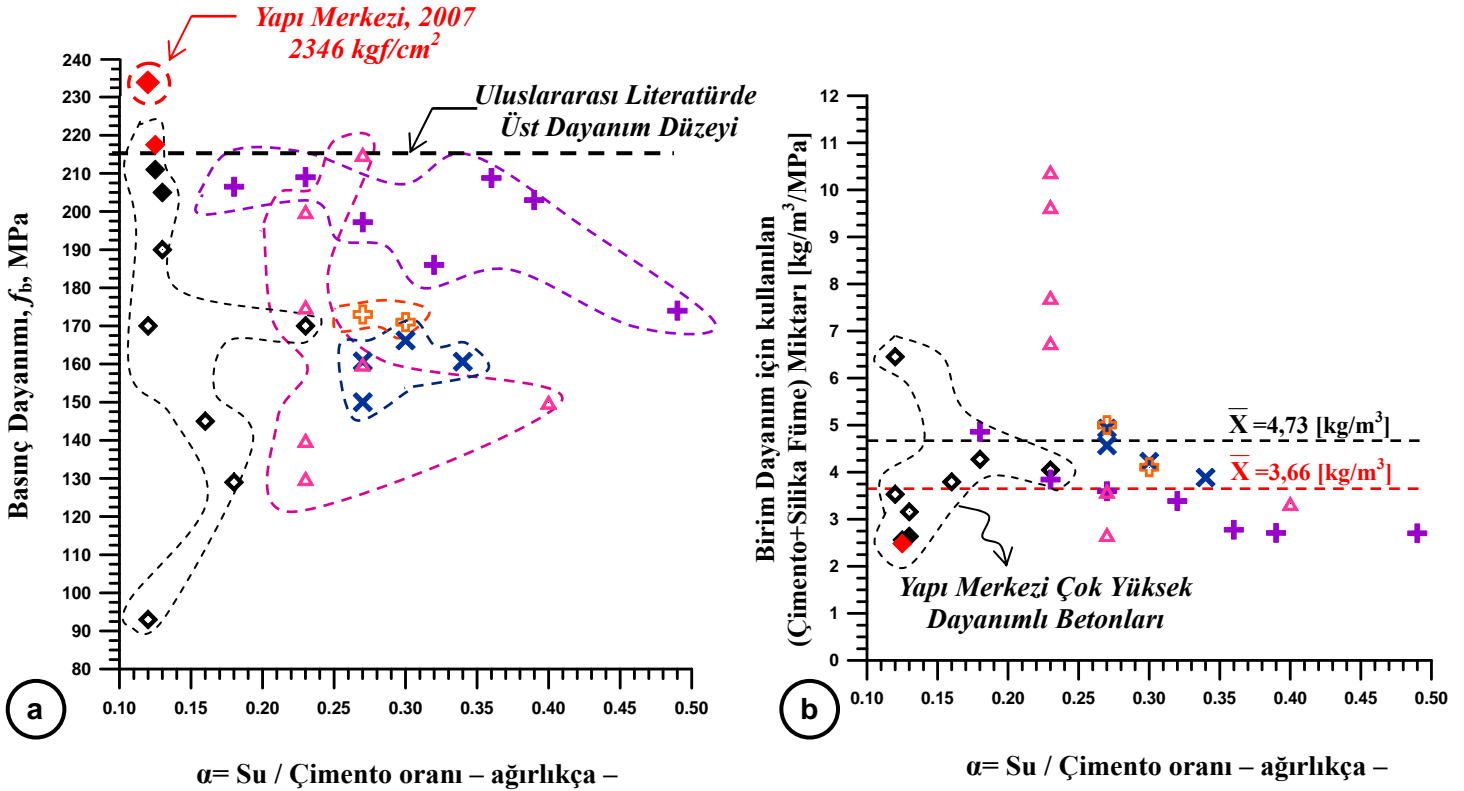
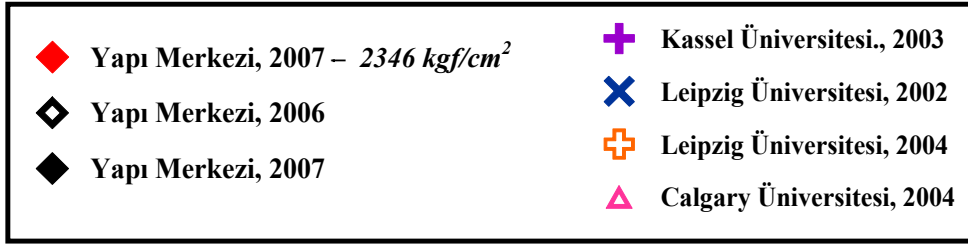
Bu çalışmada Yapı Merkezi "Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi" kapsamında 2006 ve 2007 yılları arasında yapılan üretimler belirli ayrıntı içinde incelenmiş ve uluslararası deneysel bulgularla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Beton literatüründe 28 güne normalize edilmiş basınç dayanımının " f_t/f_{28} " kür süresi ile değişimi, normal dayanımlı betonlar için CEB FIB MC 90 [3] bağıntısı ile bulunmaktadır. Bu yaklaşımda, anılan karakteristik oran, kür süresinin ve çimento sınıfına bağlı dayanım sabitinin bir fonksiyonu olarak artar. Normal dayanımlı betonlarda FIB' in vermiş olduğu çimento dayanım sabiti $s=0,20$ değeri, çok yüksek dayanımlı betonlarda $s=0,22$ ' ye çıktığı [4] kaynağında rapor edilmiştir. Şekil – 3' te $s=0,20$ ve $s=0,22$ için CEB FIB MC 90 eğrisi ile literatürde yüksek dayanımlı betonlar için rapor edilen deney sonuçlarının [5, 6] birbiri ile uyumu incelenmiştir. Aynı şekil üzerinde, farklı fiziksel özelliklere sahip betonlar için hesaplanan " f_7/f_{28} " oranları işaretlenmiştir. Normal dayanımlı betonlarda $\sim 0,75$ olan f_7/f_{28} [7] oranı, çok yüksek dayanımlı betonlarda - normal kür uygulanmış - $0,78$ iken, kür uygulanmış çok yüksek dayanımlı betonlarda ise $0,94$ (orandaki artışı %20) düzeyine ulaşmıştır. Ayrıca yüksek dayanımlı betonlarda ilk kür sürelerindeki dayanım artış hızı, normal dayanımlı betonlara göre daha yüksektir. 28. günden sonra ise, dayanım artışı pratik olarak önemsiz mertebededir.



Şekil – 3 Çok yüksek dayanımlı betonlarda normalize edilmiş basınç dayanımının kür süresi ile değişimi (f_t = Basınç dayanımı, f_{28} = 28 günlük basın dayanımı, s = çimento sınıfına bağlı dayanım katsayısı).

4.2. Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda Basınç Dayanımı – Su/Çimento Oranı İlişkisi

Beton karışım tasarımlarında su/çimento oranı, dayanım üzerinde belirleyici karakteristik bir orandır. Normal dayanımlı betonlarda ($20 \text{ MPa} < f_b < 70 \text{ MPa}$) aralığında su/çimento oranı – ağırlıkça – azaldıkça, basınç dayanımı artmaktadır [9]. Ancak dayanım düzeyi yüksek betonlarda ($f_b > 70 \text{ MPa}$), basınç dayanımı su/çimento oranından başka, silika füme kullanımı, lif takviyesi, özel kür uygulama vs. ile denetlenmektedir. Çok yüksek dayanımlı betonlarda basınç dayanımının ve 1 MPa basınç dayanımı elde etmek için 1 m^3 beton karışımında kullanılan bağlayıcı madde miktarının $\{1 \text{ MPa}/[\text{çimento}+\text{silika füme}]\}$, α = su/çimento oranı ile değişimleri Şekil – 4’ te gösterilmiştir. Değerlendirmeye alınan tüm numuneler aynı boyuta – $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ küp – sahiptir.



Şekil – 4 Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı betonlarında basınç dayanımı ve 1 MPa Dayanım/(Çimento+Silika füme) miktarının su/çimento oranı ile değişimleri ve uluslararası literatürde rapor edilen verilerle karşılaştırılması. (\bar{X} = Ortalama değer, $1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$).

Farklı karışım tasarımlarına sahip çok yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımının ve birim dayanım başına düşen bağlayıcı malzeme miktarının, $\alpha = \text{su/çimento oranı}$ ($\alpha = 0,10 - 0,50$ aralığında) ile değişimi Şekil – 4a ve b' te belirtilmiştir. Şekil yakından incelendiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Beton literatüründe [9] kaynağında, betonun $\alpha = \text{su/çimento oranının}$ $0,4 - 1,0 - \text{ağırlıkça} - \text{aralığında}$ basınç dayanımı ile değişimi matematik bir modelle temsil edilmektedir. Artan su/çimento oranı ile basınç dayanımı azalmaktadır. Su/çimento oranı $0,4'$ ten küçük olan betonlarda “yüksek” su/çimento oranı ile “düşük” basınç dayanımı değişiminin etkin olmadığı söylenebilir. Diğer

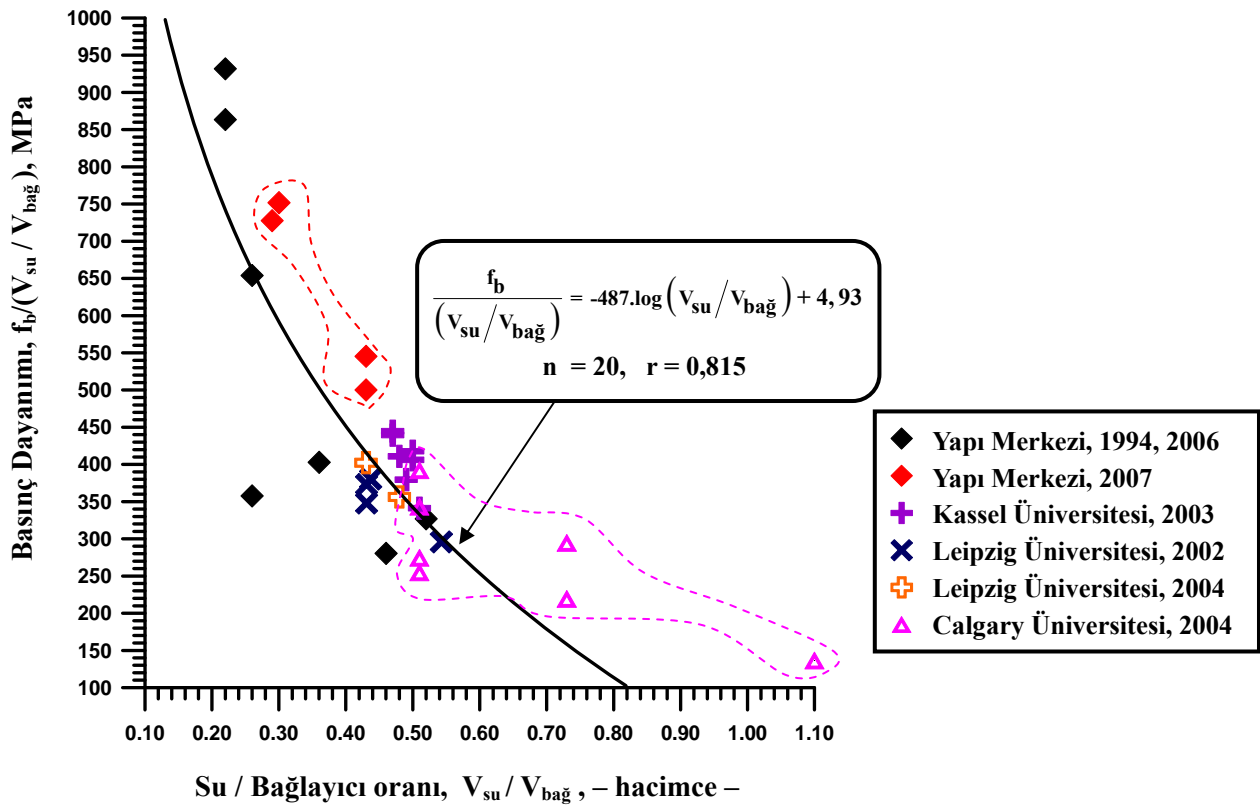
kelimelerle 0,4' ten küçük su/çimento oranlarında, beton basınç dayanımı, anılan karakteristik orandan bağımsız olarak değişmektedir. Örneğin Calgary Üniversitesi çok yüksek dayanımlı beton denemelerinde 130 MPa - 200 MPa dayanım aralığındaki betonlara ait su/çimento oranlarının aynı ($\alpha=0,22$) olduğu dikkat çekicidir. Benzer değerlendirme Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı betonları için yapıldığında; aynı su/çimento oranına sahip betonlarda basınç dayanımlarının (90 MPa – 240 MPa) aralığında değişkenlik gösterdiği göze çarpmaktadır. Bu somut bulgudan hareketle, çok yüksek dayanım düzeylerine ulaşmak için su/çimento oranının düşürülmesinin yanı sıra, diğer parametrelerin (kür şekli, agrega türü, lif takviyesi) etkileri de öne çıkmaktadır.

- Çok yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımlarında birim dayanım elde etmek için kullanılan bağlayıcı malzeme (*çimento+silika fume*) miktarı, beton basınç dayanımı ve karışımın ekonomikliğini belirleyen karakteristik bir orandır. Birim dayanım için kullanılan bağlayıcı malzeme miktarının, su/çimento oranı ile değişimi (Şekil – 3b) incelenmiş ve birim dayanım için kullanılan bağlayıcı malzeme miktarının, su/çimento oranından bağımsız olarak değiştiği görülmüştür. Kassel, Leipzig ve Calgary Üniversitelerinde [1, 10, 11, 12] yapılan çok yüksek dayanımlı beton denemelerinde, 1 MPa dayanıma ulaşmak için kullanılan bağlayıcı miktarı ortalama 4,73 kg/m³ iken, Yapı Merkezi betonlarında ise 1 MPa dayanım için ortalama 3,66 kg/m³ bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Buna göre Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı betonları göreceli olarak ekonomik karışım tasarımına sahiptir. Ayrıca; anılan karakteristik oranın beton karışım tasarımlarında elverdiği ölçüde az olması, özellikle beton sektörü bazında daha az CO₂ emisyonu demektir.

- Yapı Merkezi, Kassel Üniversitesi, Leipzig ve Calgary Üniversitesi çok yüksek dayanımlı betonlarının basınç dayanımları ile su/bağlayıcı (*hacimce*) oranı değişimi [13] kaynağında incelenmiş ve su/bağlayıcı oranının (*hacimce*), 93 – 215 MPa dayanım aralığında basınç dayanımı üzerinde etkili olmadığı belirlenmiştir. Aynı kaynakta basınç dayanımları, tasarımda kullanılan lif içeriği ve lif türüne göre değerlendirildiğinde ise basınç dayanımının lifsiz karışımlarda ortalama 161 MPa olduğu, lifli betonlarda ise ortalama 194 MPa' a ulaştığı rapor edilmiştir. Lifli betonlara ait basınç dayanımları, lifsiz betonlara ait basınç dayanımlarından ~ 1,3 kat daha büyük dayanımlara ulaşmıştır. Buradan açıkça görülmektedir ki; yüksek dayanım düzeyleri için su/çimento oranı, su/bağlayıcı hacmi gibi karakteristik oranların, kür uygulamalarının yanı sıra, karışıma lif ilavesi, ilave edilen liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri de basınç dayanımları üzerinde büyük önem taşımaktadır. Liflerin beton basınç dayanımı üzerindeki etkisine 4.3. bölümünde belirli bir ayrıntı içinde değinilmiştir.

- Beton literatüründe verilen çok yüksek dayanımlı betonların, basınç dayanımı/(su/bağlayıcı hacmi) ile (su/bağlayıcı hacmi) değişimi Şekil – 5' te gösterilmiştir. Basınç dayanımı/(su/bağlayıcı hacmi) ile (su/bağlayıcı hacmi) arasında anlamlı bir regresyon

bağıntısı ($n=20$, $r= 0,815$) bulunmuştur. Buna göre, s (su/bağlayıcı hacmi) arttıkça basınç dayanımı/(su/bağlayıcı hacmi) azalmaktadır. Aynı şekil üzerine regresyon çözümlemesine sokulmayan Yapı Merkezi ve Calgary Üniversitesi çok yüksek dayanımlı betonları işlenmiştir. İlginçtir ki, değerlerin yer aldığı küme regresyon bağıntısının üstünde kalmıştır. Bu farklılık büyük bir ihtimalle betonlara uygulanan kür şekliyle ilintilidir. [1, 14] kaynağındaki bulgular da, bu görüşü doğrulamaktadır.



Şekil 5 Çok yüksek dayanımlı betonlarda Basınç dayanımı/($V_{su}/V_{bağ}$) oranı ile ($V_{su}/V_{bağ}$) oranı değişimi (f_b = Basınç dayanımı, MPa, V_{su} = Karışımda kullanılan su hacmi, $V_{bağ}$ = Karışımda kullanılan çimento ve silika füme hacmi, n = Kullanılan data sayısı, r = Korelasyon katsayısı, $1 \text{ MPa} \approx 10 \text{ kgf/cm}^2$).

4.3. Karışıma Katılan Liflerin Basınç ve Çekme Dayanımı Üzerinde Etkisi

Çok yüksek dayanımlı betonların karışım tasarımında su/çimento oranını düşürmek, agrega boyutunu küçültmek, kür uygulaması ve özel üretim prosesi uygulamak vs. basınç dayanımını arttırmak için

kullanılan en yaygın yöntemlerdir. 1990' lı yıllarda beton literatüründe, liflerin sadece eğilmeye çalıştığı ve birim uzama büyüklüğünü arttırdığı düşünülmekteydi. Ancak, güncel beton literatüründe, özellikle çok yüksek dayanımlı betonlarla ilgili çalışmalarda, liflerin eğilme ve birim uzamanın yanı sıra, betonun basınç dayanımının da arttırdığı belirlenmiştir [8, 12, 15].

Beton literatüründe son yıllarda yapılan çalışmalar, karışımlara katılan liflerin çekme dayanımı ile birlikte, basınç dayanımlarını da arttırdığını kanıtlamıştır. [13, 15, 16] kaynaklarında, farklı dayanım düzeylerine sahip betonlar için karışıma katılan lif hacminin, basınç ve çekme dayanımı değişimi incelenmiştir. Üretimlerde kullanılan numuneler 150x300 mm silindir olup, karışımların tümünde kısa kesilmiş çelik lif kullanılmıştır. İncelenen konunun bütünlüğünü sağlamak için anılan deneysel çalışmalarda ulaşılan sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir:

- Normal ve orta yüksek dayanım ($35 \text{ MPa} < f_b < 85 \text{ MPa}$) düzeyine sahip betonlara hacimce %1 çelik lif takviyesi, basınç dayanımını %1,05 – %4,70 oranında, çekme dayanımını %23,90 – %25,05 oranında artmıştır. Yüksek dayanımlı betonlarda $85 \text{ MPa} < f_b < 100 \text{ MPa}$ aralığında basınç ve çekme dayanımında gözlemlenen artışlar sırası ile %11,7; %50 olmuştur. Dayanım düzeyi $100 \text{ MPa} < f_b < 150 \text{ MPa}$ aralığında olan çok yüksek dayanımlı betonlarda ise karışıma katılan lifler (*hacimce %1*) basınç dayanımında %11,77; çekme dayanımında ise %37,5 artış sağlamıştır. Buradan açıktır ki, farklı dayanım seviyeleri için, beton karışımlarına katılan lifler çekme dayanımının yanında, basınç dayanımında da belirgin artışa neden olmaktadır.

- Yapı Merkezi çok yüksek dayanımlı beton projesinde 2006 ve 2007 üretimlerinde karışımlara lif ilave edilmiştir. 2006 yılında yapılan ilk denemelerde (boy=30 mm, çap=0,55 mm, narinlik oranı, $\lambda = \frac{\text{boy}}{\text{çap}} = \frac{30 \text{ mm}}{0,55 \text{ mm}} \approx 55$) lifler kullanılmış ve betonda oluşan yerleştirme sorunu nedeni ile

dayanımlarda önemli kayıplar meydana gelmiştir. Sonraki üretimlerde kısa kesilmiş çelik liflerin (boy=6 mm, çap=0,16 mm, $\lambda = \frac{\text{boy}}{\text{çap}} = \frac{6 \text{ mm}}{0,16 \text{ mm}} = 37,5$) kullanımı ile yerleştirme sorunu giderilmiş

ve basınç dayanımlarında önemli artışlar sağlanmıştır. 2007 yılı üretimlerinde ise, karışıma katılan malzemeler sabit tutularak yapılan lif takviyesi (hacimce %1,5) sonucu, basınç dayanımlarının %11 – %23 oranında arttırdığı belirlenmiştir. Küçük liflerin çimento matrisinin içindeki varlığı mikro ölçekteki çatlakların yaygınlık kazanmasını büyük ölçüde azaltarak, betonun elastik bölgedeki davranışını daha da güçlendirmiştir. Kısacası; lifli betonlarda dayanım artışı, karışıma katılan liflerin türü, geometrik büyüklükleri – $\lambda = \frac{\text{boy}}{\text{çap}}$ oranı – , karışıma katılma miktarı ve üretim prosesi ile denetlenmektedir.

5. SONUÇLAR

Çok yüksek dayanımlı betonların kimi mühendislik özelliklerini inceleyen bu çalışmada kapsamında elde edilen ana sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- 1989 yılından başlayan Yapı Merkezi Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi üretimlerinde çimento ve silika füme içeriği değiştirilmesi, iri ve ince agrega türünün değiştirilmesi (Çizelge – 1), lif kullanımı ve özel kür uygulaması sonucunda dayanım düzeyi 1340 kgf/cm^2 den, 2346 kgf/cm^2 ye yükselmiştir. Dayanımlarda meydana gelen bu artış, silika füme ve kalsit tozu kullanımı ile kapiler ve toplam boşluk oranının azaltılmasının yanı sıra, özel kür uygulaması ve lif içeriği ile denetlenmiştir. Karışıma katılan %1 - %1,5 – hacimce – oranında kısa kesilmiş çelik lifler, betonun elastik rejimi güçlendirerek, % 10 – %20 mertebelerinde ölçülebilen bir basınç dayanım artışı sağladı belirlenmiştir.
- Çok yüksek dayanımlı betonlarda ilk kür sürelerinde dayanım artış hızı, yüksek dayanımlı betonlara göre daha büyüktür (Şekil – 2). Normalize edilmiş basınç dayanımının kür süresi ile değişimi normal dayanımlı betonlar için CEB FIB MC 90’ in eksponansiyel bağıntısı ile verilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda 0,75 olan f_t/f_{t28} oranı, özel kür uygulanmış çok yüksek dayanımlı betonlarda ($85 \text{ MPa} < f_b < 96 \text{ MPa}$) 0,94’ e ulaşmıştır (Şekil – 3).
- Su/çimento oranının – ağırlıkça – 0,4’ ten küçük olduğu yüksek dayanımlı betonlarda anılan oranın dayanım üzerinde tek başına belirleyici etkisi bulunmamaktadır (Şekil – 4a). Basınç dayanımı diğer değişkenlerle de (silika füme kullanımı, kür şekli, lif şekli, boy/çap oranı ve hacimsel içeriği) hassas olarak ilintilidir.
- Çok yüksek dayanımlı betonlarda birim dayanım – 1 MPa – için kullanılan bağlayıcı malzeme miktarı ile su/çimento oranı bağımsız olarak değişmektedir (Şekil – 4b). Uluslararası literatürde rapor edilen çok yüksek dayanımlı betonlarda bu oran ortalama $4,73 \text{ kg/m}^3$ iken, Yapı Merkezi betonlarında ortalama $3,66 \text{ kg/m}^3$ bağlayıcı kullanılmıştır. Anılan karakteristik oranın elverdiği ölçüde en az düzeyde tutulması “*sürdürülebilir kalkınma*” kavramında daha az “*CO₂ emisyonu*” demektir.
- Çok yüksek dayanımlı betonların, basınç dayanımı/(su/bağlayıcı hacmi) ile (su/bağlayıcı hacmi) arasındaki istatistiksel ilişki anlamlı bir matematik model ile ifade edilmiştir (Şekil – 5). Artan, (su/bağlayıcı hacmi) ile basınç dayanımı/(su/bağlayıcı hacmi) oranı azalmaktadır.

Regresyon çözümlemesine sokulmayan – yerleştirme basıncı ve sıcak kür uygulanan – deney verilerinin tanımladığı küme, çıkartılan regresyon eğrisinin üzerinde kalmıştır. Bu sonuç ise çok yüksek dayanımlı betonun üretiminde – örneğin 2000 kgf/cm²'nin üzerinde – sıcak kür, yerleştirme basıncı uygulaması gibi özel kür proseslerinin, basınç dayanımı üzerinde çok etkili olduğunu işaret etmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, gördükleri sürekli akademik ilgi ve desteklerinden ötürü Yapı Merkezi Holding A.Ş. Onursal Başkanı Dr. Müh. Sayın Ersin ARIOĞLU 'na ve Yapı Merkezi Holding A.Ş. Yönetim Kurulu Üyelerine burada içten teşekkürlerini ifade ederler. Ayrıca, proje aşamasında gösterdikleri ilgiden dolayı Yapı Merkezi Prefabrikasyon A.Ş. Genel Müdürü Dr. Müh. Murat ŞENER' e ve tüm üretim ve deneysel çalışmalarda yer alan laboratuvar görevlileri Mehmet TOPÇU, Kenan ERDEM' e içten teşekkürlerini iletirler. Kalsit tozu Esen Mikronize Maden San. ve Tic. A.Ş. /Tuzla – İstanbul ve çelik lifler Beksa Çelik Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Bu firmalara burada teşekkür edilir. *Bildiride ileri sürülen tüm görüş ve değerlendirmeler doğrudan doğruya yazarlara aittir, çalıştıkları kuruluşları bağlamaz.*

KAYNAKLAR

- 1 – Reda, M. M., Shrive, N. G., Gillott, J. E., 2004. “Microstructural Investigation of Innovative UHPC”. Cement and Concrete Research, 29 (1999), p. 323–329
- 2 – Thomas Teichmann, Schmidt, M., 2004. “Influence of the Packing Density of Fine Particles on Structure, Strength and Durability of UHPC”. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, September 13 – 15, 2004, p. 313 – 323.
- 3 – Concrete Structures, Euro Design Handbook, 1995. Editör: Josef Eibl, Kalsruhe, Ernst & Sohn.
- 4 – Yapı Merkezi Holding A.Ş. AR-GE Bölümü, 2007. “Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda Basınç Dayanımı, Elastik Modül ve Birim Kısılma Büyüklüklerinin Değerlendirilmesi”, Rapor No: 07-07, s. 25.
- 5 – Graybeal, B. A., 2007. “Compressive Behavior of Ultra – High Performance Fiber – Reinforced Concrete”, ACI Materials Journal, March – April, 2007, p. 146 – 152.
- 6 – Arıoğlu, Ergin, Manzak, O., Dondurmacı, A., Köylüoğlu, Ö. S., 1997. “Yapı Merkezi’ nde Üretilen Çok yüksek Dayanımlı Betonların (B170) Mühendislik Büyüklüklerinin Değerlendirilmesi”, İnşaat Mühendisleri Odası, 14. Teknik Kongre.
- 7 – Arıoğlu, Ergin, Köylüoğlu, Ö.,S., 1997. “Mineral Katkı (Uçucu Kül – Silika Füme – Yüksek Fırın Cürufu) İçeren Betonlarda 7 – 28 – 91 Günlük Dayanımlar Arasında Çıkarılan İstatistiksel İlişkiler”, Beton Prefabrikasyon, Ocak 1997.
- 8 – Song, P. S., Hwang, S.2004; “Mechanical Properties of High Strength Steel Fiber – Reinforced Concrete”, Construction and Building Materials, No: 18, p. 669 – 673.
- 9 – Arıoğlu, N., Girgin, C., Arıoğlu, Ergin; Discussion of New Strength Model Based on Water-Cement Ratio and Capillary Porosity by K.S.Pann, Tsong Yen, Chao-Wei Tang and T.D.Lin, ACI Materials Journal, Vol 101, No: 3, 2004, pp 250 – 252.
- 10 – Bornemann, R. Schmidt, M., 2003. “Betonda Pudra Malzemelerin İşlevi”, Kassel Üniversitesi, Almanya. Çeviri: Reşat SÖNMEZ, Hazır Beton Dergisi, Mayıs – Haziran, 03. s.31 – 36.
- 11 – Mai, J., Dietzl, J.,2002. “Ultra High Performance Self Compacting Concrete”, LACER, No:7, 2002. p.33 – 41.
- 12 – Orgass, M, Klug, Y., 2004. “Fibre Reinforced Ultra – High Strength Concretes”. International Symposium on Ultra High Performance Concrete, September 13 – 15, 2004, p. 637 – 647.
- 13 – Yapı Merkezi Holding A.Ş., AR – GE Bölümü –Yapı Merkezi 2006 Yılı Çok Yüksek Dayanımlı Beton Projesi Genel Değerlendirme Raporu, 21 sayfa, Rapor No: 06-15, Çamlıca/İstanbul.
- 14 – Yapı Merkezi Holding A.Ş., AR – GE Bölümü, “Çok Yüksek Dayanımlı Betonlara Üretim Süreçlerinin Dayanım Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması”, Teknik Rapor, 8 sayfa, Çamlıca/İstanbul.
- 15 – Thomas, J., Ramaswamy, A., 2007. “Mechanical Properties of Steel Fiber-Reinforced Concrete”. Journal of Materials in Civil Engineering 19(5):pp. 385-392.