

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI VE KIRILMA
PARAMETRELERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çevre Müh. Gözde GÜVENSOY**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2005

**YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN MEKANİK DAVRANIŞI VE KIRILMA
PARAMETRELERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Çevre Müh. Gözde GÜVENSOY
(501011062)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Aralık 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Ocak 2005**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Halit Yaşa Ersoy (M.S.Ü.)
Doç. Dr. Yılmaz Akkaya**

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Tezimi yöneten ve çalışmalarım sırasında yardım ve desteğini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR'e,

Çalışmalarımda ilgi ve yardımlarından dolayı Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR'e, Dr. Fikret Bayramov'a, İnş. Müh.'i Tufan Ekşioğlu'na, başta Araş. Gör. Cengiz Şengül olmak üzere tüm Yapı Malzemesi Anabilim Dalı araştırma görevlileri ve Laboratuvar çalışanlarına,

Deneysel çalışmalara yapılan destekleri nedeniyle başta İnş. Yük. Müh.'i A. Necip Kocatürk ve Müh. Sevtap Haberveren olmak üzere tüm İSTON Kalite Bölümü çalışanlarına,

Yüksek Lisans eğitimim boyunca arkamda desteğini ve güvenini hissettiğim sevgili aileme teşekkür ederim.

Şubat 2005

Gözde GÜVENSOY

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler	4
2.1.1. Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)	4
2.1.2. Büyük kusurlarından arındırılmış (MDF) çimento	5
2.1.3. Sıkıştırılmış nemli çimento (DCC)	6
2.1.4. Geleneksel çelik tel donatılı betonlar	6
2.1.5. Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON)	8
2.1.6. Reaktif pudra betonu (RPB)	9
2.2. Silis Dumanı, Kimyasal Katkı, Çelik Tel Ve Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi	20
2.2.1. Silis dumanının beton özellikleri üzerindeki etkisi	20
2.2.1.1 Silis dumanın özellikleri	20
2.2.1.2 Silis dumanın betonun dayanımına ve dürabilitesi üzerindeki etkiler	22
2.2.2. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkileri	23
2.2.3. Çelik telin beton özelliklerine etkisi	25
2.2.4. Isıl işlemin beton özelliklerine etkisi	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	28
3.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler	28
3.1.1. Çimento	28
3.1.2. Silis dumanı	29
3.1.3. Agregalar	29
3.1.4. Çelik lif	31
3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı	31
3.2. Beton Üretimi	32
3.2.1. Üretimde izlenen sıra	32
3.2.2. Numune boyutları ve şekilleri	33

3.3. Üretilen Numunelerin Kodlarının Belirlenmesi	33
3.4. Isıl İşlem Programı	34
3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri	35
3.5.1. Küp basınç deneyi	35
3.5.2. Küp yarma çekme dayanımı deneyi	35
3.5.3. Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi	35
3.5.3.1 Net eğilme dayanımının belirlenmesi	37
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	38
4.1. Modifiye Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	38
4.2. Küp Yarma Çekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	39
4.3. Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	39
5. GENEL SONUÇLAR	43
REFERANSLAR	45
EKLER	49
ÖZGEÇMİŞ	71

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. : Beton Sınıflandırılması.....	2
Tablo 2.1. : Yalın betonla karşılaştırıldığında ÇTDB'ların sahip olduğu bazı üstün özellikleri ve sağladıkları diğer avantajları.....	8
Tablo 2.2. : Bazı tel donatılı betonların yapısal özellikleri.....	9
Tablo 2.3. : Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	10
Tablo 2.4. : RPB ile yüksek dayanımlı betonun fiziksel özellikleri karşılaştırılması.....	12
Tablo 2.5. : RPB 200 ve RPB 800 betonlarının tipik bileşimi.....	13
Tablo 2.6. : RPB 200 ve RPB 800'ün Mekanik Özellikleri.....	15
Tablo 2.7. : Sherbrook köprüsü RPC bileşimi.....	17
Tablo 2.8. : Güçlendirme için üretilen RPC Bileşimi	19
Tablo 3.1. : Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	28
Tablo 3.2. : Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	29
Tablo 3.3. : Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	29
Tablo 3.4. : Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	30
Tablo 3.5. : Karışım 5 de kullanılan agregaların granülometreleri.....	30
Tablo 3.6. : OL 6/15'nin teknik özellikleri.....	33
Tablo 3.7. : Numune Kodlaması.....	34
Tablo 3.8. : Taze Beton Özellikleri.....	34
Tablo 3.9. : Sertleşmiş Beton Özellikleri.....	37

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı.....	5
Şekil 2.2 : Normal harç ve tel donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı.....	11
Şekil 2.3 : Normal harcın ve RPB 200'ün kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	11
Şekil 2.4 : RPB, çelik, öngermeli beton ve betonarme malzemeden yapılmış kiriş enkesitlerinin karşılaştırılması.....	16
Şekil 2.5 : Sherbrook Köprüsü Uzay Kafes Yapısı.....	16
Şekil 2.6 : Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonuyla güçlendirilmesi	20
Şekil 2.7 : Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi.....	22
Şekil 2.8 : Silis dumanı katkısının ara yüzeye etkisi.....	23
Şekil 2.9 : Silis dumanının beton dayanımına etkisi.....	24
Şekil 3.1 : Karışım 5 üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi.....	31
Şekil 3.2 : Numune boyut ve şekilleri.....	33
Şekil 3.3 : 3 noktalı eğilme deneyi düzeneği.....	36
Şekil 4.1. : Küp Basınç Dayanımları.....	38
Şekil 4.2. : Küp Yarma-Çekme Dayanımları.....	39
Şekil 4.3. : Kırılma Enerjileri.....	40
Şekil 4.4. : Net Eğilme Dayanımları.....	40
Şekil 4.5. : İlk 4 karışımla harcın Yük-Sehim Diyagramlarının Karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.6. : Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (4. karışım)....	42
Şekil 4.7. : Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (5. karışım):...	42
Şekil B.1. : Karışımda Kullanılan Malzemeler.....	54
Şekil B.2. : Kuru Karışım.....	54
Şekil B.3. : Agregalar, çimento ve silis dumanının kuru karıştırılması.....	55
Şekil B.4. : Süperakışkanlaştırıcı ve suyun ilk yarısının eklenmesi.....	55
Şekil B.5. : Karışıma Çelik Tel Eklenmesi.....	56
Şekil B.6. : Karışımın Yeterli İşlenebilirliği Sağlanmış Hali.....	56
Şekil B.7. : Karışımın Kalıplara Alınmadan Önceki Hali.....	57
Şekil B.8. : Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması –1.....	57
Şekil B.9. : Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması –2.....	58
Şekil B.10. : Numunelerin Vibrasyondan Sonraki Hali.....	58
Şekil C.1. : Küp Basınç Dayanımı Deney Düzeneği.....	60
Şekil D.1. : Üç noktalı Eğilme Deneyi Düzeneği.....	62
Şekil D.2. : Üç noktalı Eğilme Deneyi Sonrası K1 Numunesi.....	63
Şekil E.1. : K1 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1a Numunesi).....	65
Şekil E.2. : K1 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1c Numunesi).....	65
Şekil E.3. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2a Numunesi).....	66
Şekil E.4. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2b Numunesi).....	66
Şekil E.5. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2c Numunesi).....	67

Şekil E.6.	: K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3a Numunesi).....	67
Şekil E.7.	: K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3b Numunesi).....	68
Şekil E.8.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3c Numunesi).....	68
Şekil E.9.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4a Numunesi).....	69
Şekil E.10.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4b Numunesi).....	69
Şekil E.11.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4c Numunesi).....	70
Şekil E.12.	: K5 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1c Numunesi).....	70

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı.....	5
Şekil 2.2 : Normal harç ve tel donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı.....	11
Şekil 2.3 : Normal harcın ve RPB 200'ün kırılma enerjilerinin karşılaştırılması.....	11
Şekil 2.4 : RPB, çelik, öngermeli beton ve betonarme malzemeden yapılmış kiriş enkesitlerinin karşılaştırılması.....	16
Şekil 2.5 : Sherbrook Köprüsü Uzay Kafes Yapısı.....	16
Şekil 2.6 : Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonuyla güçlendirilmesi	20
Şekil 2.7 : Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi.....	22
Şekil 2.8 : Silis dumanı katkısının ara yüzeye etkisi.....	23
Şekil 2.9 : Silis dumanının beton dayanımına etkisi.....	24
Şekil 3.1 : Karışım 5 üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi.....	31
Şekil 3.2 : Numune boyut ve şekilleri.....	33
Şekil 3.3 : 3 noktalı eğilme deneyi düzeneği.....	36
Şekil 4.1. : Küp Basınç Dayanımları.....	38
Şekil 4.2. : Küp Yarma-Çekme Dayanımları.....	39
Şekil 4.3. : Kırılma Enerjileri.....	40
Şekil 4.4. : Net Eğilme Dayanımları.....	40
Şekil 4.5. : İlk 4 karışımla harcın Yük-Sehim Diyagramlarının Karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.6. : Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (4. karışım)....	42
Şekil 4.7. : Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (5. karışım):...	42
Şekil B.1. : Karışımda Kullanılan Malzemeler.....	54
Şekil B.2. : Kuru Karışım.....	54
Şekil B.3. : Agregalar, çimento ve silis dumanının kuru karıştırılması.....	55
Şekil B.4. : Süperakışkanlaştırıcı ve suyun ilk yarısının eklenmesi.....	55
Şekil B.5. : Karışıma Çelik Tel Eklenmesi.....	56
Şekil B.6. : Karışımın Yeterli İşlenebilirliği Sağlanmış Hali.....	56
Şekil B.7. : Karışımın Kalıplara Alınmadan Önceki Hali.....	57
Şekil B.8. : Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması –1.....	57
Şekil B.9. : Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması –2.....	58
Şekil B.10. : Numunelerin Vibrasyondan Sonraki Hali.....	58
Şekil C.1. : Küp Basınç Dayanımı Deney Düzeneği.....	60
Şekil D.1. : Üç noktalı Eğilme Deneyi Düzeneği.....	62
Şekil D.2. : Üç noktalı Eğilme Deneyi Sonrası K1 Numunesi.....	63
Şekil E.1. : K1 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1a Numunesi).....	65
Şekil E.2. : K1 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1c Numunesi).....	65
Şekil E.3. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2a Numunesi).....	66
Şekil E.4. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2b Numunesi).....	66
Şekil E.5. : K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2c Numunesi).....	67

Şekil E.6.	: K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3a Numunesi).....	67
Şekil E.7.	: K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3b Numunesi).....	68
Şekil E.8.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3c Numunesi).....	68
Şekil E.9.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4a Numunesi).....	69
Şekil E.10.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4b Numunesi).....	69
Şekil E.11.	: K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4c Numunesi).....	70
Şekil E.12.	: K5 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1c Numunesi).....	70

YÜKSEK PERFORMANSLI LİF DONATILI ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN (YPLDÇEK) MEKANİK DAVRANIŞI VE KIRILMA PARAMETRELERİ

ÖZET

Son yıllarda, beton teknolojisinde önemli gelişmeler kaydedildi. Sadece 40 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi. Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m² olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir. Son beş yıl içinde İTÜ'de basınç dayanımları 200 MPa' aşan Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Çimento Esaslı Kompozit Malzemeler üretildi. Beton teknolojisinde söz konusu yüksek dayanımlı bu malzemeler Reaktif Pudra Betonları (RPB) olarak adlandırılırlar ve dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliliğe sahiptirler. Süneklilikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır. Çok düşük poroziteleri, bu tip betonlara önemli dürabilite ve düşük zararlı iyon taşıma özellikleri sağlamakta ve bunları beton yapıların güçlendirilmesinde kullanılan yeni bir teknik için potansiyel olarak uygun hale getirmektedir. Bu malzemeler mükemmel darbe dayanım özelliklerine sahip olmaları nedeniyle, askeri yapılarda, betonarme yapıların onarımında ve küçük veya orta büyüklükteki prefabrik elemanların üretiminde kullanılırlar.

Bu çalışmada 5 farklı karışım hazırlandı. Silis dumanı çimento ağırlığının % 25'i oranında kullanıldı. Kullanılan agregalar; Silisli Kum-1 (0.50mm) Silisli Kum-2 (0-0.25mm), Deniz kumu (0-0.25 mm) ve Podima kumu (0-2 mm)'dur. Su/bağlayıcı oranı 0.17-0.25 aralığında tutuldu. Üstü pirinç kaplı düz şekilli kısa kesilmiş çelik lifler kullanıldı. Kullanılan çelik liflerin narinliği 40, çekme dayanımları 2250 N/mm²'dir. Çelik tel oranı hacimce % 5 ile %7.8 arasında kullanıldı. Numunelere 2 gün 90°C ± 2°C'de ısıtıl işlem uygulandı ve ardından 20°C ± 2°C'de kirece doymun su içine alınarak burada 28 ± 2 gün bekletildi. Eğilme deneyleri için 70x70x280 mm'lik kırış numuneler hazırlandı.

Üretilen YPLDÇEK malzemelerin çekme ve eğilme dayanımları belirgin biçimde artmış ve çok sünek bir davranış göstermişlerdir. Kırılma enerjileri normal harca göre 218 kat daha fazladır ve 220 N/mm² 'ye kadar ulaşan basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Tekrarlı yükler altında, yükleme - boşaltma döngülerinden sonra rijitlikte azalma görülmemiştir. Döngülerin eğimi yük-sehim eğrisinin başlangıçtaki eğimine hemen hemen paraleldir. Çelik tel donatısız yüksek dayanımlı betonlarda (YDB) odak noktası gevrekliğin bir ölçüsü olarak alınabilir. YDB'lerle karşılaştırıldığında, YPLDÇEK malzemeler için bu nokta orijinden çok uzakta oluşmakta veya oluşmamaktadır.

Üretilen YPLDÇEK malzemeler bazı stratejik yapılarda, betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesinde ve sanayi atıklarının depolandığı yapılarda kullanılabilirler. Laboratuvar sonuçlarının mühendislik uygulamasına dönüşebilmesi beklenmektedir.

MECHANICAL BEHAVIOUR AND FRACTURE PARAMETERS OF HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES (HPFRCC's)

SUMMARY

In recent years, incredible advances in concrete technology have been recorded. Only 40 years ago, the maximum compressive strength at the construction site was about 40 MPa, such a concrete is now really quite low strength material in relation to modern very-high strength concretes with cube compressive strengths between 200 MPa and 800 MPa, tensile strengths between 25 MPa and 150 MPa, fracture energies about 30000 J/m². Within the past five years, High Performance steel Fiber Reinforced Cementitious Composites which have compressive strengths over 200 MPa have been developed at ITU. In concrete technology, they are also called Reactive Powder Concretes (RPCs). These materials allow remarkable flexural strength and extremely high ductility; their ductility is more than about 300 times greater than that of conventional concrete. Their very low porosity gives them important durability and low transport properties, and makes them potentially suitable for being used in new technique for retrofitting reinforced concrete structures. Since these materials have excellent impact resistance properties, they can be employed for military structures and in repairing of reinforced concrete structures and also for small or medium size prefabricated elements. The main objective of this work is to investigate mechanical behaviour of HPFRCC's under cyclic loading condition using three point bending test.

Five HPFRCC mixtures were cast for research. Silica fume was used in the amount of 25% of the cement by weight. Siliceous sands (Sand 1 : 0-0.5 mm and Sand 2 : 0-0.25 mm), sea sand (Sand 3 : 0-0.25 mm), and round siliceous sea sand (Sand 4 : 0-2 mm) were used as aggregate. Water/binder ratio of the mixtures was in the range of 0.17 and 0.25. Straight, short cut and brass coated steel fibers were used. Aspect ratio of steel fibers was 40. The tensile strength of the steel fibers was 2250 N/mm². The volume fractions of steel fibers were varied between 5.0% and 7.8%. Hot curing was applied to the specimens at 90°C ± 2°C for two days. After thermal treatment, all the specimens were restored in water saturated with lime at 20 °C ± 2°C until 28 days of age. Beam specimens were prepared for the fracture energy tests in the dimensions of 280 mm in length and 70x70 mm in cross section.

HPFRCCs allow remarkable compressive and flexural strengths and very high ductility. The fracture energy of HPFRCC is 218 times that of conventional mortar and the compressive strength of this cementitious composites reaches up to 220 N/mm². There is no significant loss in the initial compliance of HPFRCCs, the slopes of the unloading-reloading loops are almost the same of the slope of the initial ascending part of the load-deflection curve. Although the residual strength decreases gradually after the peak stress in HPFRCCs, the stiffness degradation is not significant under cyclic loading condition. In high strength concretes (HSCs) without steel fibers, the focal point can be taken as a measure of concrete

brittleness. In HPFRCCs, however, this point is far from the origin or does not exist, in contrast to that of HSCs without steel fibers.

HPFRCCs produced can be used at some strategic structures and for retrofitting damaged and/or under strength reinforced concretes, and also building of containers for industrial waste materials. It is hopefully expected that the laboratory findings can be transformed to the engineering practice.

1.GİRİŞ

Beton, bütün dünyada kullanımı en yaygın olan yapı malzemesidir. Geleneksel anlamda beton; agrega, çimento ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilir. Betona değişik özellikler kazandırmak için katkı maddeleri de eklenir. Modern beton, çimento, su, ve agregaların basit karışımından öte bir malzemedir. Günümüzdeki; betona değişik özellikler kazandıran mineral ve kimyasal katkıları da vardır.

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra yapı ve inşaat mühendisliğindeki hızlı gelişim betonun temel madde olarak ekonominin her alanında kullanılmasıyla kendini gösterdi. Yapı ve inşaat mühendisliğindeki yeni yapı türleri (yüksek yapılar, açık deniz yapıları vb.) ve yeni teknolojiler bu malzeme için daha önemli gereksinimler yarattı. Bu gereksinimleri karşılamak için Amerika ve Avrupa'da araştırmalar yapıldı ve bu araştırmalar sonucu yeni bir betonun üretimi sıradan betonun zayıflığının üstesinden gelindi. Betonun tasarımında kullanılan temel parametre basınç dayanımıdır. Fakat, modern inşaat mühendisliği betondan basınç dayanımının yanı sıra başka özellikler de gerektirmektedir [1].

Uzun zamandır beton endüstrisi ve yapı mühendisleri, basınç dayanımları 15-25 MPa arasında değişen, her koşul altında kullanılabilecek kadar iyi bir beton üretilip kullanılmaktaydılar. Buna karşın 1970'lerin başında, narin kolonların mimari seçenek sunarak daha fazla kullanım alanı oluşturmalarından dolayı yüksek yapı kolonları için 40 ila 50 MPa dayanımlı betonlar tasarlanmaya başlandı. Zamanla "Yüksek Dayanımlı Beton" diye tanımlanan bu betonların özelliğinin sadece dayanımla kısıtlı olmadığına görülmesi üzerine isimleri "Yüksek Performanslı Beton (YPB)" olarak anılmaya başlandı. Bu betonlar açık havada daha şiddetli çevresel etkilere maruz, kıyı platformları, köprüler, yollar gibi yapılarda kullanılmaya başlandı [2].

Beton içerikleri ve üretim teknolojisindeki son zamanlardaki gelişimler dikkate alındığında aşağıdaki çimento bazlı beton sınıflandırılması yapılabilir. [1]

Tablo 1.1 Betonların Sınıflandırılması [1]

Beton Türü	Basınç Dayanımı (MPa)
Geleneksel Beton	<60
Yüksek Dayanımlı Beton	60-90
Çok Yüksek Dayanımlı Beton	90-130
Reaktif Pudra Betonu	200-800
Yüksek performanslı hafif beton	>55

Bu sınıflandırma basınç dayanımı açısından kullanılır. Bu sınıflandırmadan ayrı yeni bir düşünce olarak ortaya çıkan yüksek performanslı betonlarda dayanımın yanı sıra betonun geçirimliliği, karbonatlaşması, donma çözülme dayanıklılığı gibi diğer özellikleri de önem taşır.

Yüksek Performanslı Beton (YPB) dürabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betondur. Bununla birlikte değişik tanımlar da yapılmaktadır. ABD deki Stratejik Otoyol Araştırma Programına (SHRP, 1991) göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, dürabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- i. Aşağıdaki dayanım özelliklerinden birine sahip olmalıdır:
 - 4 saatlik basınç dayanımı ≥ 17.5 MPa (çok erken dayanımlı beton)
 - 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa (çok yüksek erken dayanımlı beton)
 - 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa (çok yüksek dayanımlı beton)
- ii. dürabilite çarpanı $\geq \%80$ (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra)
- iii. Su / Bağlayıcı $\leq 0,35$ olmalıdır [3].

Yüksek performanslı betonların uygulamacılar tarafından kabul görmesi yavaş olmaktadır, fakat tasarım yapan mühendisler ve mal sahiplerinin bu betonun değerini ve durabilitesini anlamalarıyla bu gelişme devam edecektir. Yüksek performanslı betonların bu gelişimine paralel olarak, son zamanlarda çelik tel takviyeli beton, kendiliğinden yerleşen beton, reaktif pudra betonu gibi teknoloji gerektiren yeni betonlar da uygulamada yerini almaya başladı [2].

Yukarıda bahsedilen yeni teknoloji betonlarından olan Reaktif Pudra Betonları (RPB) ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliliğe ve aşırı derecede düşük geçirimliliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir

[4]. Bu malzemeler, ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues'in laboratuvarlarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir.

Bileşimi kum, çimento, kuvars, silis dumanı ve kısa kesilmiş çelik tel olan en büyük tane boyutu 1 mm civarında olan RPB'ları, klasik beton üretimine benzeyen şartlar altında fakat çok az su ile üretilmektedirler. RPB'ları, performansları fabrikasyon metodlarına göre değişen, malzeme grubunu oluştururlar. Prizden sonra uygulanan termik işlem beton kalitesinin ihtiyaçlara göre uyarlanmasına izin vermektedir: RPB 200 için, RPB serisinin referans betonu, 90°C'de ısıtılma işlemi söz konusu iken RPB 800 priz sırasında bir basınç uygulamasına ve bunu izleyen 250°C'de bir ısıtılma işlemi ihtiyaç duyar [5].

Reaktif pudra betonları küp basınç dayanımları 200 ve 800 MPa aralığında, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa aralığında, birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen ve kırılma enerjileri 30000-40000 J/m² arasında değişen yeni kuşak betonları temsil etmektedir [6].

Bu çalışmada, literatürde verilen Yüksek Performanslı Çelik Tel Donatılı Betonlar ile ilgili en son gelişmelerin ışığında bu yeni teknoloji betonunun mekanik davranışlarını ve kırılma parametrelerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çerçevede agrega cinsleri ve miktarları değişken olmak üzere beş karışım hazırlanmış; bu karışımlarda maksimum agrega çapı 250 µm olarak seçilmiştir. Silis dumanı yüksek performanslı betonların önemli bir bileşeni olup bu çalışmada çimento ağırlığının % 25'u oranında kullanılmıştır. Daha sünek ve yüksek dayanımlı bir beton üretmek amacıyla karışıma % 5 oranında çelik tel eklenmiştir. Isıl işlemim betonun dürabilitesine ve dayanımına yaptığı olumlu etkilerden dolayı çalışmada numunelere 7. günde 2 gün süreyle 90°C ± 2°C'de ısıtılma işlemi uygulanmıştır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Yeni Çimento Esaslı Kompozitler

Geçtiğimiz yıllar boyunca çimento esaslı malzemeler ile yüksek performans elde etmek için çalışmalar yapılmıştır. 1930'larda Eugene Freyssinet dayanımını arttırmak için taze betona yerleştirme sırasında basınç uygulamanın avantajını göstermiştir. 1960'larda yüksek basınç altında ve ısıtma işlemi görmüş numunelerde 650 MPa değeri elde edilmiştir.

Son zamanlarda iki araştırma yaklaşımı izlenmiştir. Birincisi Homojen Dağılı Ultra İncelikteki Taneleri İçeren Yoğunlaştırılmış Sistemler (DSP) dir. Bu betonlar yüksek oranda süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve dayanımı yüksek agrega (kalsine olmuş boksit) içerir.

İkinci yaklaşım Büyük Kusurlardan Arındırılmış Çimento (MDF) ile yapılan beton ise 150 MPa'lık veya daha yüksek çekme dayanımına sahip olan bir polimer hamurudur [7]. Yüksek dayanımlı betonlarda olduğu gibi bu malzemelerin sünekliği düşük olduğundan, sünekliklerini arttırmak için çelik tel kullanılmaktadır.

Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitler üstün mekanik özelliklere ve yüksek sünekliğe sahip olup darbe etkilerine dayanıklılık gerektiren silah depoları, diğer askeri amaçlı yapılar ile nükleer ve endüstriyel atıkların depolanması ve bazı prefabrik elemanların üretimi alanlarında kullanılabilecek niteliktedirler. Ayrıca yüksek mekanik performanslarının yanında ultra-yoğun mikroyapıları nedeniyle üstün dürabilite özelliklerine de sahiptirler, bundan dolayı zararlı ortamlara karşı yüksek dayanıklılık sağlayan yeni çimento esaslı kompozit malzemelerdir. Söz konusu olan yeni yüksek performanslı betonların iç yapı ve mekanik davranış bakımından incelenmesine yönelik çabalar giderek artmaktadır.

2.1.1. Homojen dağılı ultra incelikteki taneleri içeren yoğunlaştırılmış sistemler (DSP)

Çimentolu malzemelerin bu yeni sınıfı Danimarka'daki Aalborg Portland Çimento fabrikası tarafından üretilmiştir [8, 9]. DSP bağlayıcılar çimento taneleri arasında kalan boşluklarda homojen olarak dağıtılan ultra incelikteki silis dumanını içerirler. Mümkün olan en yoğun dizilişi elde etmek için, karıştırma ve döküm sırasında

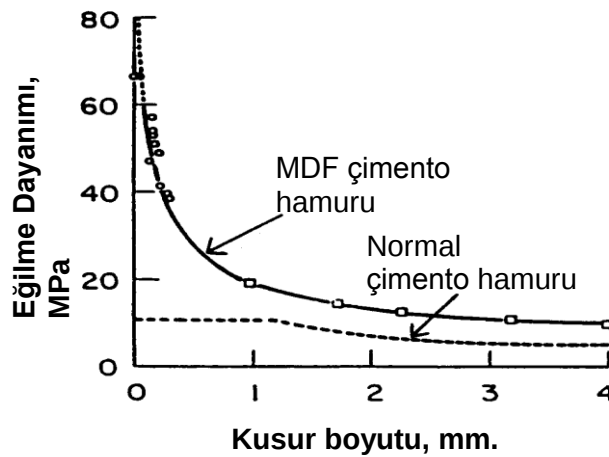
çimento ve silis dumanının topaklanmasını önlemek için süperakışkanlaştırıcılar kullanılır. Bu DSP esaslı kompozitler Densit adı altında söz konusu firma tarafından uygulayıcılara sunulmaktadır.

16 mm'lik kırılmış granit agregasına sahip normal DSP'nin basınç dayanımı yaklaşık 130 MPa'dır. Eğer kalsine olmuş boksit gibi dayanımı yüksek agregalar kullanılırsa basınç dayanımı 270 MPa'a kadar ulaşabilir. DSP esaslı malzemeler çok gevrek olup normal Portland çimentosu hamurundan da gevrekler [8, 9].

2.1.2. Büyük kusurlarından arındırılmış (MDF) çimento

MDF çimentolu malzemeler Portland veya Yüksek Alüminli çimentoların yüksek moleküler kütleli suda çözünen bir polimer ile birleştirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Polimer, çimento tanelerinin topaklanmasını önler, düşük su/katı oranındaki karışımın viskozitesi artar. MDF polimer hamurlarının üretiminde ana fikir çimento hamurunun yoğunluğunun dolayısıyla dayanımının artırılmasıdır. 1980'lerde Imperial Chemical Industries (ICI)'daki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [10].

Birchall ve diğ. (1981) Griffith yaklaşımını kullanarak "büyük kusurlardan arınmış (MDF)" çimentolarını geliştirdiler. Bu araştırmacılara göre, normal çimentolarda, yaklaşık 1mm'lik kusur boyutuna kadar Griffith eğrisiyle iyi bir uyum sağlandı. Bu kusur boyutunun altında dayanımlar aynı kaldı. Daha sonra, büyük boşlukları yok etmek için özel bir proses tekniğini kullanarak çimentolar hazırlandılar. Bu çimentolarda çok yüksek eğilme dayanımlarına erişildi ve gözlenen en büyük boşlukların çapı yaklaşık 90 µm oluncaya dek Griffith eğrisi uygulandı. Sonuçlar Şekil 2.1'de gösterilmektedir [11, 12].



Şekil 2.1. MDF ve normal çimento hamurunun eğilme dayanımı [11, 12].

MDF hamurları kalıplanabilir, püskürtülebilir, veya plastikler gibi haddelenebilir [13]. Bu hamurlar özellikle alüminli çimentolarla karıştırıldıklarında çok yüksek çekme dayanımına (150 MPa veya daha büyük) sahip olurlar [7]. MDF hamurlarına kum, metalik pudra ve lif ilavesiyle aşınmaya karşı dayanımı ve tokluğu artırılmış kompozit malzemeler elde edilir.

2.1.3. Sıkıştırılmış nemli çimento (DCC)

Su/çimento oranı 0.05 - 0.10 aralığında değişen nemli çimento pudrası yüksek basınç altında sıkıştırılıp, uygun bir kür programı uygulanırsa çok düşük geçirimsiliğe ve yüksek dayanıma sahip DCC üretmek mümkün olur [14, 15]. Çok düşük su/çimento oranlarında ($w/c = 0.05-0.10$), yüksek basınç (350 MPa), ve yüksek sıcaklık (250°C) kürleri uygulaması sonucunda düşük geçirimsilik ve 665 MPa basınç dayanımı değerleri elde edilir [16]. Hidrate olmamış çimento taneleri DCC'nin içinde mikro agregalar gibi davranırlar. Şu anda teknoloji bütün uygulamalar için uygun olmadığından bu laboratuvar bulguları mühendislik pratiğine henüz geçirilememektedir [17].

2.1.4 Geleneksel çelik tel donatılı betonlar

Çelik tel donatılı beton (ÇTDB) ilk defa patentli olarak 1874 yılında kullanıldı. O tarihten itibaren, ÇTDB çok geniş bir uygulama alanında, hatta II. Dünya savaşında hava pistlerindeki bomba çukurlarının yamanmasında, uçak hangarlarının bombalardan korunmasında da kullanıldı. 1970'lerden sonra bu malzemenin ticari amaçla kullanımı, özellikle Avrupa'da, Japonya'da ve ABD'de büyük bir hız kazandı [18].

Endüstriyel zeminler, tünel kaplamaları ve bazı prefabrike elemanlar ile yer betonları ÇTDB'ların en yaygın kullanıldığı uygulama alanlarıdır. Daha detaylı olarak uygulama alanları şöyle özetlenebilir; yağmur suyu kolektörleri, atık su ve atık madde tankları, atık depolama kutuları, cephe ve bölme duvar elemanları, kanalizasyon boruları, demiryolu sınır taşları, su drenaj blokları, santral kabinleri, prekast banyo kabinleri, çatı elemanları ve otobüs durakları gibi prefabrik elemanlar, köprü güverteleri, tüneller, duvar kaplamaları, yüzme havuzu, barajlar, kanallar, onarım ve güçlendirme alanları, hidrolik ve deniz yapıları ve diğer inşaat mühendisliği projeleri gibi yapısal uygulamalarda da ÇTDB'lar yaygın olarak kullanılmaktadır [19, 20]. ÇTDB'ların diğer uygulamaları ise püskürtme betonları, ön gerilmeli elemanlar ve sıcağa dayanıklı betonlardır.

Çelik telin betona katılması ne özel bir alet ve işçilik gerektirir, ne de betonun işlenebilirliğini ve üretimini önemli ölçüde etkiler. Buna karşılık, sertleşmiş betonun performansında artış gerçekleşir. ÇTDB yüksek çekme dayanımına, sünekliğe ve eğilme performanslarına sahiptir. ÇTDB'lerin mekanik davranışının daha iyi anlamak için malzemenin gerilme-şekil değiştirme ilişkisini incelemek ve yapıdaki davranışı ile ilişki kurmak gerekir. Çelik tellerin betona katılması gevrek olan betonun çekme şekil değiştirme kapasitesini artırarak yarı-sünek bir davranış kazandırır. Böylece, çatlama dayanımında ve tokluk özelliklerinde iyileşme beklenebilir. ÇTDB'lerin analizinde en önemli parametreler çekme ve eğilme dayanımları ve kırılma enerjisidir, çünkü bu parametreler malzeme davranışını temsil eder [19].

ÇTDB ile; i) yüksek süneklik, ii) yapı elemanları kenarlarının kırılmalara karşı dayanıklılığının artırılması, iii) beton rötresinde azalma, iv) geleneksel donatı ile oluşabilecek hataların ortadan kaldırılması, v) daha kısa inşaat süresi, vi) bütün doğrultularda çekme ve eğilme dayanımlarının artırılması, vii) kolay çatlak kontrolü ve matris çatlamasından sonra yutulan enerjide büyük artış gibi üstünlükler sağlanmaktadır [18].

Mekanik davranışları açısından ÇTDB'ler performanslarına göre 2 sınıfa ayrılırlar.

- i) Geleneksel ÇTDB ler
- ii) Yüksek Performanslı ÇTDB ler (RPC gibi)

Geleneksel ÇTDB ler gevrek matrisle karşılaştırıldığında sünek davranış gösterirler Fakat çekme ve eğilme dayanımları çok yüksek değildir ve özellikle bu malzemelerin basınç dayanımları çelik tel hacim oranıyla değişmez. Buna karşın Yüksek Performanslı ÇTDB ler maksimum yüke ulaşıncaya kadar büyük şekil değiştirme yaparlar ve çekme ve basınç dayanımları Geleneksel ÇTDB'lere göre daha yüksektir [22].

Yalın betonla karşılaştırıldığında, kullanılan çelik telin tipine ve içeriğine bağlı olarak ÇTDB'lerin sahip olduğu bazı özellikleri ve sağladıkları üstünlükleri Tablo 2.1'deki gibi özetlenebilir [18].

Tablo 2.1. Yalın betonla karşılaştırıldığında ÇTDB'lerin sahip olduğu özellikleri ve sağladıkları üstünlükleri [18].

Özelik	Açıklamalar
Aşınma dayanıklılığı	ÇTDB'lerin, çarpma aşınmasından dolayı oluşan mikro çatlamları kontrol etme yeteneği vardır.
Yorulma dayanıklılığı	Düşük tel içeriğinde bile 1,25 - 2 kat artış kaydedilmektedir.
Donma-çözülme dayanıklılığı	Donma-çözülme çevrimlerinden dolayı oluşan hasar azaltılabilmektedir. Hava sürükleyici katkı önerilmektedir.
Çarpma dayanıklılığı	2 – 20 kat arttırılabilir.
Kopma modülü	20-50 kg/m ³ tel içeriklerinde ilk çatlak dayanımı az değişmektedir.
Kısıtlanmış rötre	Düşük tel içeriğinde bile, gerilmelerin daha iyi yayılması çatlak genişliklerini %70'e kadar azaltabilir.
Kayma dayanımı	Düşük tel içeriğinde bile 1,25- 2 kat arttırılabilir.
Termik şoka karşı dayanıklılık	Düşük tel içeriğinde bile, önemli artış görülmektedir.
Basınç dayanımı	Az değişme görülmektedir (dar bir aralıkta artıp azalabilir).
Tokluk	Düşük tel içeriğinin kullanılması halinde bile önemli tokluk artışı elde edilmektedir.

2.1.5 Yüksek oranda çelik tel içeren çimento bulamacı (SIFCON)

SIFCON; çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir bulamacın sertleşmesiyle oluşan bir matris içinde hacmen % 20'ye varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur. Çelik tel donatılı betonlarda çelik tel içeriğinin %2 - %3 olduğu düşünülürse yaklaşık 10 kat fazla donatılan malzeme sünekliğinin mertebesi daha iyi anlaşılmaktadır.

Fritz, kancalı uçlu çelik tel (çap=0,5 mm, uzunluk= 30 mm) kullanılarak üretilen SIFCON üzerinde tek eksenli çekme altında elde edilen deney çalışmasında SIFCON'un kırılma enerjisi su/çimento oranına bağlı olarak değişmekte olduğunu ve normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 1340 katına varan değerler aldığını göstermiştir [23].

Tablo 2.2’de normal dayanımlı beton (NDB), çelik tel donatılı beton (ÇTDB) ve SIFCON’a ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması yapılmaktadır.

Tablo 2.2. Bazı tel donatılı betonların özellikleri [21].

	Çelik tel içeriği, %	Çekme dayanımı, MPa	Elastisite modülü, GPa	Kırılma enerjisi, J/m ²	Karakteristik boy, m	Kaynak
NDB	-	2-5	15-30	100-200	0,25 -0,4	Mishra (1995); Van Mier ve diğ. (1995)
ÇTDB	1	4-5	32,5	5000	8	Li (1998)
SIFCON	4-20	6-32	30-70	20000-30000	2-17	Naaman (1991)

Tablo 2.2’den görüldüğü gibi %1 oranında çelik telin betona eklenmesi kırılma enerjisini normal betonunkine (NDB) kıyasla yaklaşık 25-50 kat, karakteristik boyu ise 20-32 kat artırmaktadır. SIFCON’un kırılma enerjisinde normal betonun kırılma enerjisinin yaklaşık 300 katına, karakteristik boyda ise yaklaşık 70 katına varan değerler elde edilebilmektedir. Ayrıca SIFCON’un çekme dayanımı da normal betonun çekme dayanımının yaklaşık 15 katına, ÇTDB’un çekme dayanımının ise yaklaşık 7 katına varmaktadır [23].

SIFCON yüksek dozajda çimento bazen de ince kum, mikrosilis ve uçucu kül gibi malzemelerden oluşur, iri taneli agrega içermez. Matris harcı kalıp içindeki tellerin arasına rahatça girebilecek şekilde tasarlanarak, malzeme içinde dayanım ve durabiliteyi büyük ölçüde düşüren boşlukların oluşması önlenir.

SIFCON, patlamaya ve yangına karşı korunması gereken sığınaklarda, patlayıcı malzemelerin saklanması, betonarme kirişler gibi bazı yapısal elemanların, köprülerin, yer betonlarının onarımlarında, prekast ürünlerde ve sıcaklığa dayanıklılık gerektiren uygulamalarda kullanılabilir [24].

2.1.6 Reaktif pudra betonu (RPB)

Basınç dayanımının üst limiti ticari uygulamalarda kullanılan malzemelerde giderek artmaktadır. Son üç yıl içinde Portland çimentosu esaslı basınç dayanımları 200 MPa dan büyük (yüksek dayanımlı betona nazaran 2 ila 4 kat yüksek) malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler dikkate değer eğilme dayanımı ve çok yüksek süneklik değerleri (geleneksel betona nazaran 250 kat yüksek) sağlarlar.

Reaktif Pudra Betonu (RPB) üstün dayanım, çok yüksek süneklik gibi gelişmiş mekanik özelliklere sahip bir kompozit malzemedir. 1990'larda Fransa'da Bouygues Laboratuvarında geliştirilmiştir. Mikro yapısı maksimum yoğunluğu elde etmek amacıyla karışımdaki bütün tanelerin hassas biçimde düzenlenmesi ile en büyük doluluğu sağlayacak biçimde optimize edilmiştir.

RPB basınç dayanımları 200 MPa'ı aşan Portland çimentosuna dayanan malzemelerin yeni bir sınıfını oluşturur. Kısa kesilmiş çelik teller eklenerek RPB'nun eğilme dayanımı 50 MPa' a kadar ulaşabilir. Malzeme metallerin enerji yutma değerlerine yakın yüksek süneklik gösterir [25].

RPB'lerinde kullanılan agregaların boyutları çimentonunkilere yakındır. Bu, hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. Bu betonlarda su/çimento oranı çok düşük olup 0,15 mertebesinde. Bu oran, çimento hamurunun boşluk oranını azaltmaya ve ortalama boşluk çapının azalmasına yardımcı olur. İşlenebilme, fazla miktarda süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için, hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunları mikserde karıştırma sırası önemlidir [26]. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar ile reaktif pudra betonlarına ait bir karşılaştırma Tablo 2.3'de yapılmaktadır.

Tablo 2.3. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve Reaktif Pudra Betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması.

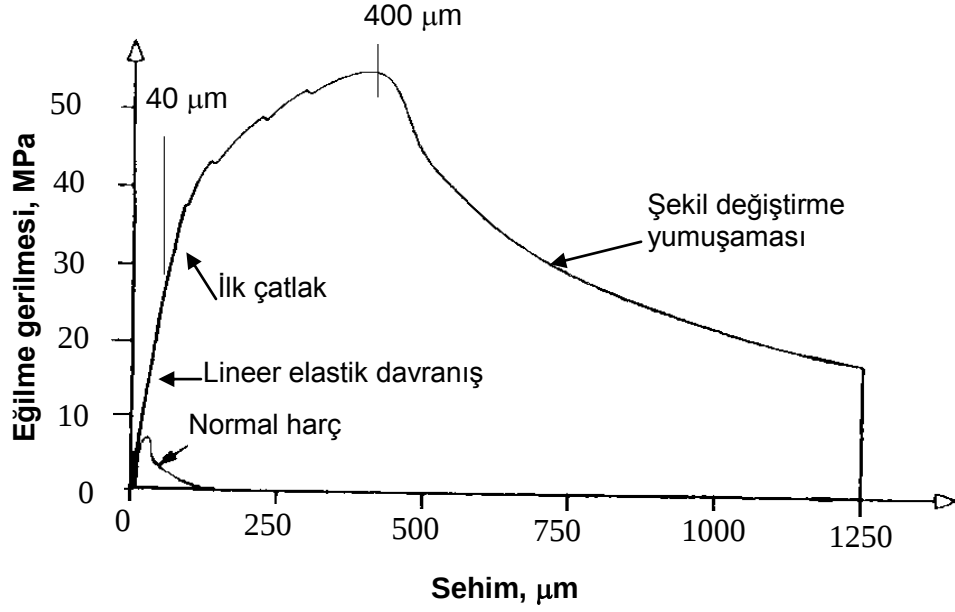
Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç dayanımı (MPa)	20-60	60-115	200-800
Elastisite modülü (GPa)	20-30	35-40	60-75
Eğilme dayanımı (MPa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma enerjisi (J/m ²)	100-120	100-130	10000 – 40000

Bu tabloda görüldüğü gibi çelik tellerin eklenmesiyle 50-140 MPa arasında değişen eğilme dayanımları elde edilmektedir. Bu betonların kırılma enerjileri ise 10000 J/m²'den 40000 J/m²'ye kadar değişmektedir. Eğilme dayanımlarında ve kırılma enerjilerindeki değişme eklenen çelik tellerin yüzdeleriyle orantılıdır [6].

Reaktif pudra betonunda en büyük yük, ilk çatlak yükünü belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilenmektedir. Bu da yüksek performansın tipik bir göstergesidir [27].

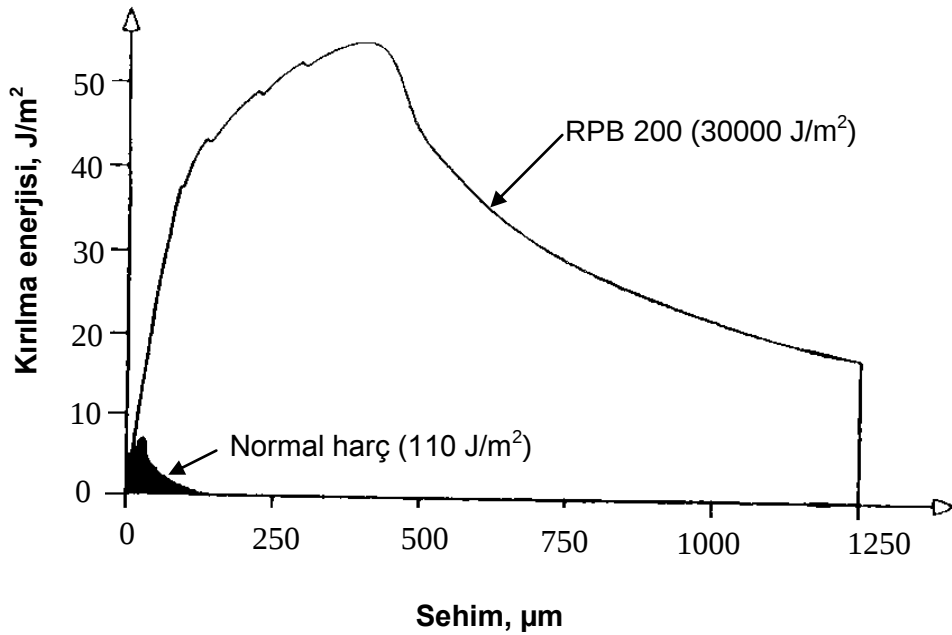
Şekil 2.2. normal bir harcın ve RPB 200'ün basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Reaktif pudra betonunun büyük bir şekil değiştirme sertleşmesi sergilediği görülmektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlamadaki gerilmenin iki katı kadar

yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür [6].



Şekil 2.2 Normal harç ve tel donatılı RPB 200'ün eğilme davranışı [6].

Kırılma enerjisi "gerilme-açıklığın ortasındaki sehim" eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Şekil 2.3'de gösterildiği gibi kırılma enerjisi RPB için 1250 μm'e kadar sehimde 30000 J/m² ve normal harç için ise toplam 110 J/m²'dir [6]. Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal harcının yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 2.3. Normal harcın ve RPB 200'ün kırılma enerjilerinin karşılaştırılması [6].

RPB'lerinin yararları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelik ile yarışacak bir potansiyele sahiptir.
- Üstün dayanımı yüksek kesme kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve limitsiz yapısal eleman şekline olanak verir.
- Sünek yapısıyla doğrudan gelen bütün çekme kuvvetlerine karşı koyabilir.
- Daha hafif elemanlarla atalet yüklerini azaltarak, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehime izin vererek ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak sismik performansta gelişim sağlar.
- Düşük ve birbirine bağlı olmayan porozitesi önemli dayanıklılık ve taşıma özellikleri sağlar ve nükleer malzemelerin depolanması için uygun bir malzeme olduğunu gösterir [25].

Yüksek dayanımlı betonlarla karşılaştırıldıklarında RPB'ların fiziksel özelliklerinin çok daha üstün olduğu Tablo 2.4' de görülmektedir [4].

Tablo 2.4. RPB ile yüksek dayanımlı betonun fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması [28]

Aşınma Kapasitesi	2.5 kat az
Su Emmesi	7 kat az
Korozyon Hızı	8 kat az
Klorür İyonu Difüzyonu	25 kat az

RPB'un bu özellikleri kimyasal agresif ortamlarda ve fiziksel aşınmanın diğer betonların ömrünü sınırladığı durumlarda kullanılmasına imkan verir [28].

Reaktif Pudra Betonunun iç yapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikroyapı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığıyla güçlendirilmektedir.

Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas biçimde ayarlanması,
- Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- Betondaki su miktarının azaltılması,
- Yüksek inceliğe sahip silis dumanının pozolanik özelliklerinin yoğun biçimde kullanımı,
- Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,

- Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcaklık koşullarında sertleştirme [6, 29].

Reaktif pudra betonuyla ilgili ilk çalışmalar Richard ve Chezezy [6, 7] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda betonların tasarımı yapılmış ve üretimi ile mekanik özellikleri açıklanmıştır. Yapılan çalışmalarda RPB 200 ve RPB 800 olmak üzere prensipte aynı fakat üretimde ve ısıtılma işlemde bazı farklılıklar bulunan iki değişik malzeme üretilmiştir. Burada 200 ve 800 üretilen numunelerde ulaşılabilen ortalama basınç dayanım değerleridir. Deneylerde çentikli kırış numuneleri kullanılmıştır.

Tablo 2.5’de RPB 200 ve RPB 800’e ait örnek bir birleşim verilmektedir.

Tablo 2.5. RPB 200 ve RPB 800 betonlarının tipik bileşimi [6].

Bileşim	RPB200	RPB800
Portland Çimentosu	955 kg/m ³	1000 kg/m ³
İnce Kum (150-400 mikron)	1051 kg/m ³	500 kg/m ³
Silis Dumanı (18 m ² /g)	229 kg/m ³	230 kg/m ³
Silika (35 m ² /g)	10 kg/m ³	-
Öğütülmüş Kuvars (4 mikron)	-	390 kg/m ³
Süperakışkanlaştırıcı	13 kg/m ³	18 kg/m ³
Çelik tel	191 kg/m ³	630 kg/m ³
Toplam Su	153 kg/m ³	180 kg/m ³

Richard ve Chezezy’nin çalışmalarında RBP 200 çelik lifli ve lifsiz olarak, RPB 800 silis ve çelik agrega kullanılarak dört farklı karakterde numune üretilmiş ve lif kullanımı, agrega cinsi ve boyutlarının etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda homojenliğin ve yoğunluğun artırılması yaklaşımı analiz edilmiştir [7].

RPB araştırma programında aşağıdaki ana ilkeler uygulanmıştır:

1. İri taneli agregaların çıkarılmasıyla homojenliğin artırılması,
2. Taneli karışımın optimizasyonu ve yerleştirme öncesinde ve esnasında basınç uygulayarak yoğunluğun artırılması,
3. Isıl işlem uygulayarak mikro yapının iyileştirilmesi,
4. Bileşime ince çelik lifler ekleyerek sünekliğin artırılması,
5. Karıştırma ve döküm işlemlerinin olabildiğince pratiğe yakın bir şekilde devam ettirilmesi.

Yukarıdaki ilk 3 maddenin uygulanması çok yüksek dayanımlı bir matris elde etmeyi

sağlar. Ancak, sünekliği geleneksel harçtan çok farklı olmamaktadır. Çelik tellerin eklenmesi çekme dayanımını arttırırken istenen süneklik değerine de ulaşılmasını sağlar.

Bu çalışmanın kapsamında aşağıdaki bulgular ve sonuçlar ortaya konulmuştur.

1) Heterojenlikle ilgili problemler RPB'de aşağıdaki sebepler dolayısıyla azaltılmıştır.

- Kaba agregaların elimine edilerek ince kumla yer değiştirilmesi (en fazla 600 μm),
- Hamurun geliştirilmiş mekanik özellikleri,
- Agregat/matris oranında azalma.

RPB için en büyük agrega boyutunu 50 gibi bir faktörle azaltmak (örnek: 20 mm yerine 400 μm) mikro çatlakların boyutunda büyük bir azalma oluşturur.

2) RPB granül karışımı tasarımı için aşağıdaki ilkelere dayanan deneysel bir yöntem izlenmiştir.

- Her bir agrega fraksiyonu içinde sıkı bir tane dizilişine sahip bir kaç tane sınıfının karışımı,
- İki ardışık tane sınıfı için ortalama çaplar (d_{50}) arasında yüksek bir oran seçilerek sınıflara ayrılması,
- Çimento/süperakışkanlaştırıcı uyumu ve reolojik analizlerle optimum oranların belirlenmesi,
- Sadece en az topaklanan ince pudralar seçilmesi.

Granüler karışımın kalitesini belirleyen ana parametre su ihtiyacıdır. Bu akışkanlaştırmak için pudraya eklenmesi gereken minimum su oranı şeklinde tanımlanır. En sıkı yapılı karışım için minimum su/bağlayıcı oranı 0.08' dir. Bağlayıcı çimento ve silis dumanını içerir.

3) Mineral içeriği açısından kuvars; çok sert bir madde olması, mükemmel hamur/agrega ara yüzeyi, hazır bulunabilmesi ve ucuz fiyatıyla üstünlük sağlar. Büyük çimento taneleri (80-100 μm) ile girişimi engellemek için maksimum 600 μm , minimum 150 μm tane boyutlu agregalar kullanılmaktadır.

4) Kimyasal içerik bakımından C_3A içeriği az olan çimentolar daha iyi sonuç vermektedir. Reolojik karakter ve mekanik performans açısından en iyi çimento; yüksek silis modülü içeren çimentodur fakat bu tip çimento çok yavaş priz hızına sahip olması açısından bazı uygulamalar için sakıncalıdır. Geleneksel yüksek priz

hızına sahip yüksek performanslı çimentolar yüksek su ihtiyacı gerektirirken aynı mekanik performansı sağlarlar.

5) RPB üretiminde kullanılan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldururlar ve çimentonun birincil hidrasyonundan oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) oluştururlar. Sonuç olarak malzeme daha yoğun ve dolayısıyla daha mukavemetli bir malzeme haline dönüşür.

6) Richard ve Chezezy [7] basınç dayanımının yoğunlukla arttığını saptamışlar ve yoğunluğu arttırmanın etkili bir yolunun da taze betona basınç uygulamak olduğunu göstermişlerdir. Bu basınç uygulamasının yöntem ve uygulama süresine göre hava kabarcıklarının azalması, fazla suyun dışarı atılması gibi yararlı etkileri vardır.

7) Numuneye 90°C de ısıtma işlemi uygulamak, oluşan hidratların mikro yapısını modifiye ederken puzolonik reaksiyonu yeteri kadar hızlandırır. Yüksek sıcaklıklarla ısıtma işlemi ($250 - 400^\circ\text{C}$) sadece lifli RPB'lerinde uygulanabilir.

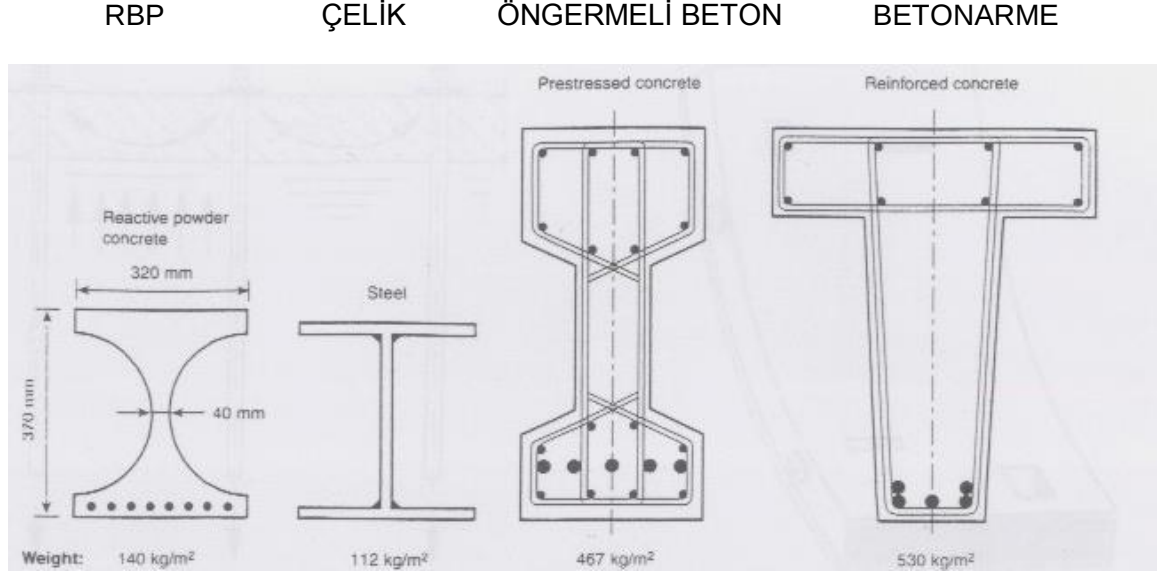
8) RPB matrislerinin davranışı kırılma enerjileri 30 J/m^2 yi geçmeyen lineer elastik bir davranıştır. RPB'nun sünekliğini arttırmak için lif eklenmesi gereklidir. Düz çelik teller 13 mm uzunluğunda ve 0.15 mm çapındadır. Teller karışıma hacimce %1.5-3 oranında eklenir. Ekonomik optimum oran %2 veya 155 kg/m^3 tür. 250°C ve üstünde ısıtma işlemi görmüş RPB'lerinde mekanik performansın artışı (basınç ve çekme dayanımı) daha kısa (3 mm den az) ve düzensiz şekilli liflerle elde edilir. Bu durumda kırılma enerjileri düşerken basınç dayanımları artar.

Richard ve Chezezy [7], tarafından üretilen iki tip RPB'nun mekanik özellikleri Tablo 2.6.'da özetlenmiştir.

Tablo 2.6. RPB 200 ve RPB 800'ün Mekanik Özellikleri [7].

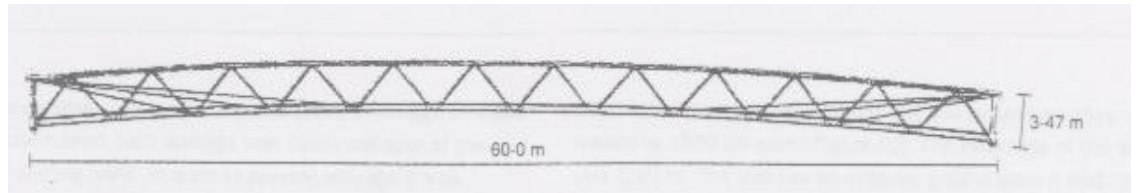
	RPB 200	RPB 800
Yerleşme Öncesi Uygulanan Basınç Gerilmesi (MPa)	Yok	50
Sıcak Kürü $^\circ\text{C}$	20-90	250-400
Basınç Dayanımı (MPa)	170-230	490-810
Eğilme Dayanımı (MPa)	30-60	45-141
Kırılma Enerjisi (J/m^2)	20000-40000	1200-20000
Elastisite Modülü (GPa)	50-60	65-75

RPB kendisini geleneksel beton ile çelik arasına yerleştiren özelliklere sahiptir. Geleneksel betondan biraz daha pahalı olmasına karşılık çelik malzemeden daha ucuzdur. Büyük mimari özgürlüklere sahip çok narin yapıların tasarımına olanak tanır. Şekil 2.4 RPB, çelik, ön germeli beton ve betonarme malzemeden yapılmış kiriş kesitlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir [29].



Şekil 2.4. RPB, çelik, öngermeli beton ve betonarme malzemeden yapılmış kiriş enkesitlerinin karşılaştırılması [29].

Bu güne kadar RPB kullanılarak yapılan en dikkat çekici yapı Sherbrook, Kanada'da yapılmış olan yaya/bisiklet köprüsüdür. RPB 200 betonundan yapılmış uzay kafes yapılı bu köprü'nün şematik bir gösterimi Şekil 2.5. de verilmektedir [29].



Şekil 2.5. Sherbrook Köprüsü Uzay Kafes Yapısı

Tablo 2.7.'de Sherbrook köprüsünde kullanılan RPB'nun bileşimi verilmektedir. Üretimde silis dumanının puzolonik reaksiyonunun hızlandırması ve hidrat oluşumunu modifiye etmesi amacıyla 90°C'de 2 gün su buharı kürü uygulanmıştır.

Tablo 2.7 Sherbrook köprüsü RPC bileşimi [30].

Bileşen	RPC
Çimento CSA Tip 20N (ASTM Tip 2)	710 kg
Silis Dumanı	230 kg
Öğütülmüş Kuvars (4 mikron)	210 kg
Silis Kumu	1010 kg
Çelik Tel	190 kg
Süperakışkanlaştırıcı	19 lt
Toplam Su	200 lt

1997’de inşa edilen Sherbrook köprüsünün kafes yapısı 150 mm çapında 2 mm kalınlığında ve 3,2 m uzunluğunda olan paslanmaz çelik tüpler içine konulan RPB’lerinin sıkıştırılarak basınç dayanımı 350 MPa’a ulaşan bir dayanım sağlamıştır [30].

Sherbrook köprüsü; RPB’nun gelişen teknolojinin prefabrik yapı endüstrisinde, malzeme kullanımının optimize edilmesi, ekonomik yararlar sağlaması, dayanımlı, dayanıklı, estetik ve çevreye duyarlı yapılar inşa edilmesini sağladığını gösteren bir örnek olmuştur.

Yine RPB’nun mekanik özelliklerini inceleyen Dugat ve arkadaşları [31], RPB200 ve RPB800 olmak üzere iki değişik karışım üzerinde basınç ve eğilme deneyleri yapmışlardır. RPB200’ün içeriği yüksek silis içerikli portland çimentosu, silis dumanı, kum ($d_{ort}=250 \mu m$), çelik teller ($d=0,175 \text{ mm}$ ve $L=13 \text{ mm}$) ve sudan oluşmaktadır. Karışımı akışkanlaştırmak için melamin süperakışkanlaştırıcısı kullanılmıştır. Silis dumanı çimento hacminin %25’i oranında ilave edilmiştir. Numunelere 3 tip kür uygulanmıştır. i) 7 gün 20° C de su kürü, ii) 4 gün 90° C de su kürü, iii) 2 gün 90° C de kuru hava kürü. Uygulanan ısı işlemle çimentonun hidratasyonun hızlandığını ve silis dumanının pozolonik reaksiyonunun aktif hale gelerek RPB’nun mekanik özelliklerinin iyileştiğini görmüşlerdir. RPC800 taze betonun yerleşme ve sertleşme sırasında basınç uygulanmasıyla elde edilmiştir. İçeriği RPC200 den farklı olarak 4 μm çaplı öğütülmüş kuvars tozu ve $L=13 \text{ mm}$ ’lik çelik teller yerine $L=3 \text{ mm}$ ’lik çelik tellerden oluşmaktadır. Yerleşme sırasında 60 MPa basınç uygulamasıyla sıkışmış hava kabarcıkları ve fazla su dışarı atılmaktadır. Bu işlem malzemenin yoğunluğunu %5-6 oranında artırır. 90°C ve arkasından 250°C’de ısı işlem gören RPB 800 malzemesinin mikro yapısında serbest ve bir kısım bağlı suyun dışarı atılmasıyla değişim sergilenmiş ve amorf hidratasyon ürünleri kristal ürünlere dönüşmüştür. Numuneler daha sonra oda sıcaklığında saklanmıştır. Malzemenin sünekliği değişik lif oranları kullanılarak test edilmiştir. $L=13 \text{ mm}$ $d=0,15 \text{ mm}$ olan çelik liflerde %2-3

oranının optimum oran olduğunu, lif oranının %3' ü geçmesi durumunda kırılma enerjisinin düştüğünü göstermişlerdir.

RPB'nun mekanik özellikleri ve dayanımı konusu Bonneau ve diğ. [32] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada üç değişik karışımla oluşturulan numuneler basınç dayanımı, elastisite modülü, donma ve çözülme direnci, buz çözücü tuzlarına karşı direnci ve klorür iyonu geçirimsizliği açısından denenmişlerdir. Çalışmada aynı zamanda çelik bir tüp içinde kapalı RPB davranışı da incelenmiştir. Bütün bu çalışmalar sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde etmişlerdir;

- RPB, malzemelerin seçiminde dikkat ve özen gösterilmesi ve karışım düzenlemesinin tane boyut dağılımı açısından optimize edilmesi şartlarıyla, uygun yerel malzemeler kullanılarak yapılabilir.
- RPB hazır bir karıştırma tankında yapılabilir.
- 90° C de sıcak su kürü veya standart alçak basınçlı buhar odasında buhar kürü uygulanan numuneler için 200 MPa ve kapalı çelik tüpteki RPB numuneleri için de 285 MPa basınç dayanımları elde edilmiştir.
- Numuneler donma ve çözülme deneylerinde yüksek dayanım göstermiş ve çok az bir kütle kaybı gözlenmiştir.
- Klorür iyonu geçirimsizliği çelik lifli numunelerde 10 Coulomb'un altında kalmıştır.

V. Matte ve M. Moranville [33] RPB'nun nükleer atıkların saklanması için kullanımının uygun olup olmadığını araştırmışlardır. Çalışmalarında, RPB içinde silis dumanının yararlı etkilerini X ışını difraksiyon analizleri, elektron mikroskobu, trityum yayını ve boşluk dağılımı analizlerini kullanarak göstermişlerdir.

Collepari ve arkadaşları [34] prefabrike yapılar için üretilen RPB'lerinde süperakışkanlaştırıcı (naftalin, melamin ve akrilik polimer) türlerinin RPB performansına su-çimento oranı ve basınç dayanımı açısından etkilerini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Söz konusu çalışmada akrilik polimer (AP) karışımının, naftalin (SNF) veya melamin (SMF) esaslı süperakışkanlaştırıcılara nazaran RPB üretimindeki çimento ve silis dumanı türünden bağımsız daha düşük bir su-çimento oranı sağladığını göstermişlerdir.

Karihaloo ve Vriese [35] kür programının, maksimum kuvars tane boyutunun ve çelik tel hacim oranının RPB mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında aşağıdaki sonuçlara varmışlardır:

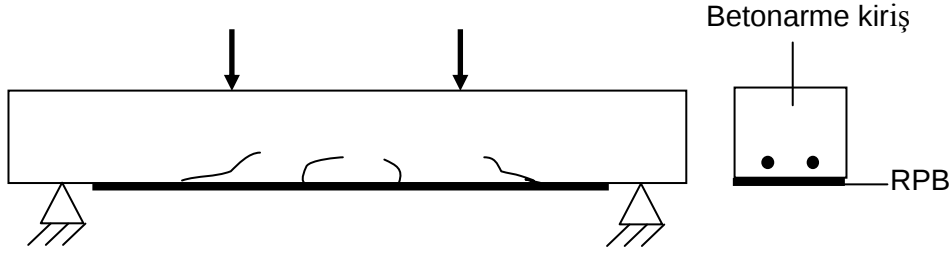
- Kısa bir süre 90°C sıcak su kürü uygulaması birincil çimento hidratasyonunun ürünü ile silisin reaksiyonunu hızlandırırken toplam su kürü süresini 27 günden 16 güne indirmektedir.
- Ortalama tane boyutu 230µm veya 300-1180µm aralığında olan kuvars kumu kullanımı hemen hemen aynı basınç ve çekme dayanımlarını vermektedir.
- Çelik tel hacim oranının artması kırılma enerjisinin de artmasına yol açmaktadır.

Reaktif Pudra Betonu stratejik yapılarda ve onarım-güçlendirme için kullanılabilir. Alae [22], çalışmada betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesinde yüksek performanslı çelik tel takviyeli çimento esaslı kompozitlerin yüksek durabilite özelliklerine sahip olması ve mevcut yapıyla uyumluluk açısından en uygun malzeme olduğunu göstermiş ve bu amaç için hazırlanan uygun bir karışım vermiştir. (Tablo 2.8)

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi eğilme etkisinde çatlatılmış bir betonarme kirişin çekme bölgesi klasik çelik plaka yerine reaktif pudra betonundan yapılmış bir levha ile güçlendirilmiştir. Levhalar çatlamış kirişe polimer esaslı yapıştırıcılar ile yapıştırılmaktadır. Kiriş tekrar yüklendiğinde çok yüksek dayanımlara erişilmiştir [36, 37]. Bu tür güçlendirme kayma bölgesinde de yapılmaktadır [23].

Tablo 2.8. Güçlendirme için üretilen RPB Bileşimi [22].

Bileşen	Birim	RPC
Portland Çimentosu	(kg)	855
İnce Kuvars Kumu (9-300 µm)	(kg)	470
İnce Kuvars Kumu (212-1000 µm)	(kg)	-
İnce Kuvars Kumu (250-600 µm)	(kg)	470
İnce Kuvars Kumu (1-2 mm)	(kg)	-
Silis Dumanı (983)	(kg)	214
Süperakışkanlaştırıcı	(kg)	28
Su	(kg)	188
Çelik tel L=12 mm; Ø=0.16 mm	(kg)	78 (%1)
Çelik tel L=6 mm; Ø=0.16 mm	(kg)	390 (%5)
Su/Çimento		0.22
Su/Bağlayıcı		0.18



Şekil 2.6. Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonuyla güçlendirilmesi [36,37].

Özyurt'da silis dumanı, ince agrega, hiperakışkanlaştırıcı ve % 0, %1,5, %3 ve %4,5 oranlarında çapı 0,15 mm ve boyu 6 mm olan çelik tel kullanarak ürettiği çimento esaslı kompozit malzemelerde en yüksek 118,5 MPa Basınç Dayanımı, 7710 J/m² Kırılma Enerjisi ve 12,78 MPa Net Eğilme Dayanımına ulaşmıştır [38].

2.2. Silis Dumanı, Kimyasal Katkı, Çelik Tel Ve Isıl İşlemin Beton Özelliklerine Etkisi

2.2.1. Silis dumanının beton özellikleri üzerindeki etkisi

2.2.1.1. Silis dumanının özellikleri

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur [39].

Bu malzemenin başlıca özellikleri;

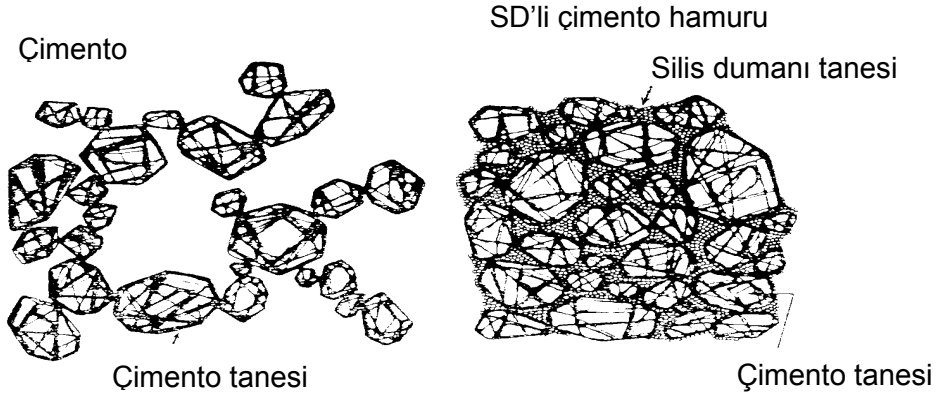
- %85'ten %98'e kadar SiO₂ içeriği,
- 0.1 - 0.2 mikron tane büyüklüğü,
- Küresel tane şekli ve
- Amorf yapısıdır [40].

Yapılan araştırmalar silis dumanlı üretimlerde en iyi sonuçların zirkonyum endüstrisinden sağlanan silis dumanlarının kullanımı ile elde edildiğini göstermektedir. Bunun sebebi bu malzemelerin bütün kirlilik ve tortulaşmadan arınmış olmasıdır [7].

Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde kullanılmaktadır. Uygulama alanları olarak yerinde dökülmüş veya prefabrike yüksek dayanımlı veya erken dayanımı yüksek beton elemanları, ağır aşınmaya maruz döşemeler ve yol kaplamaları, erozyona ve oyulmaya maruz

hidrolik yapılar, zararlı kimyasallara maruz betonlar, beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi, çelik donatının korunması, yüksek performanslı çimento şerbet ve sıvaları sayılabilir [39].

Silis dumanı içeren betonlar üzerine ilk deneyler 1950'li yılların başlarında Norveç Teknoloji Enstitüsü'nde yapılmıştır. Bir ilk uygulama olarak, silis dumanının betonda



Şekil 2.7. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi [41].

kullanımı 1971'de yine Norveç'te gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, betonda silis dumanının pratik kullanımında ve araştırmalarda giderek artış görülmüştür. Silis dumanı içeren bir çimento hamurunda Şekil 2.7.'te görüldüğü gibi sıkı bir diziliş elde edilir.

Silis dumanı (SD) içeren betonların özelliklerini göz önüne alarak SD'nın iki şekilde kullanıldığını akılda tutmak gerekir:

- Dürabilitenin yükseltilmesi ve hidratasyon hızının azaltılması gibi nedenlerle çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak, çimento ile yer değiştiren bir malzeme olarak kullanılması,
- Hem taze ve hem de sertleşmiş halde beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır [42].

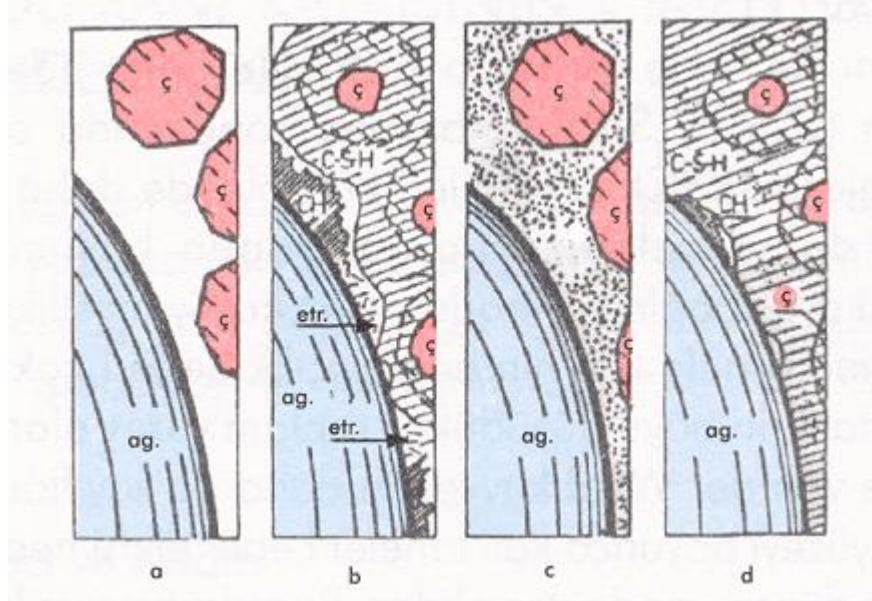
Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi artırır, kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırır, sonuçta da betonun dayanımı ve dürabilitesi artar. Ancak, silis dumanının betonda kullanılmasıdaki problem fiyatıdır; fiyatı, çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır ve her yerde bulunması güçtür. Diğer taraftan, bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performanslarında oluşan gelişme de hesaba katılmalıdır [14, 43]. Yakın zamandaki gelişmelere dayanarak mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin

puzolanik etki kadar önemli olduğu veya bazı araştırmacılara göre boşlukları doldurma etkisinin puzolanik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılabilir [43, 45].

2.2.1.2. Silis dumanının betonun dayanımı ve durabilitesi üzerindeki etkileri

Araştırmacılar silis dumanı katkısının beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisini daha çok agrega-hamur ara yüzeyini kuvvetlendirmesine bağlamaktadır.

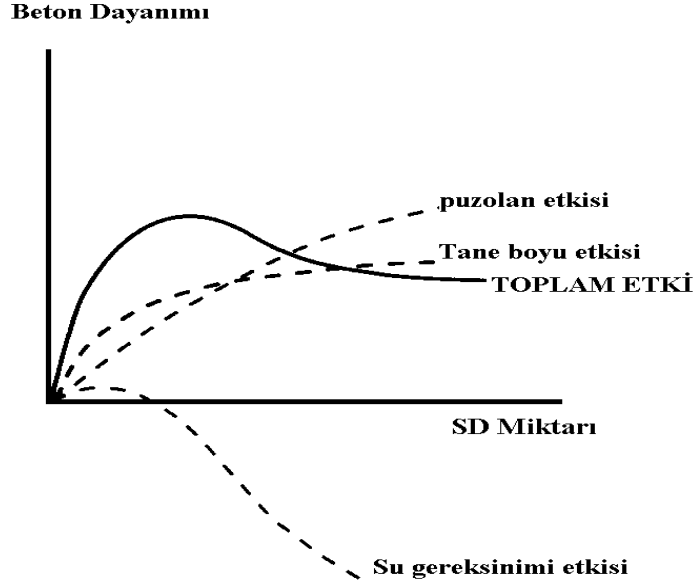
Şekil 2.8.'de katkısız ve silis dumanı katkılı hamurların agrega ile olan ara yüzeyleri gösterilmiştir. a) katkısız hamurdaki ara yüzeyi belirtmektedir. Çimento taneleri (ç) arasında su ile dolu boşluklar görülmektedir. b) de aynı ara yüzey sertleştikten sonra resmedilmiştir. C-S-H ve CH kristalleri, kısmen etrenjit içeren boşluklar görülmektedir. Şeklin c) ve d) bölümlerinde ise silis dumanı katkılı taze ve sertleşmiş hamurlardaki durum gösterilmiştir. Silis dumanı (SD) taneleri boşlukları doldurmakta, CH kristallerini küçülmektedir. Ayrıca ilave puzolanik C-S-H jeli de meydana gelerek boşlukları azaltmakta, dayanımı arttırmaktadır [39].



Şekil 2.8. Silis dumanı katkısının ara yüzeye etkisi [44].

Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan etkisi Şekil 2.9.'daki gibi açıklanabilir. Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları yanı sıra ince silis dumanı taneleri agrega-hamur ara yüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de vardır. Dolayısıyla betondaki optimum silis dumanı miktarı,

bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agrega, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir [39].



Şekil 2.9. Silis dumanının beton dayanımına etkisi [39].

Silis dumanının betonun durabilitesi üzerindeki en önemli etkisi silis dumanı kullanımı ile malzeme içindeki boşlukların azalmasıdır. Boşlukların azalmasına paralel olarak betonun geçirimliliği azalır. Geçirimliliğin azalması ile zararlı kimyasalların malzeme içerisine difüzyonu zorlaşır, dolayısıyla bu kimyasallara karşı dayanım yükselir. Dış ortam koşullarında silis dumanı içermeyen betonlara göre durabilitesi daha yüksek ve uzun ömürlü bir malzeme elde edilir. Bunun yanı sıra betonda çimento ile yer değiştiren silis dumanı miktarı arttıkça alkali-agrega reaktivitesine karşı dayanım da artar.

2.2.2. Kimyasal katkıların beton özelliklerine etkileri

Katkılar betona su, agrega, çimento gibi ana bileşenler dışında ve % 5'den daha az olmak üzere karıştırma işleminden hemen önce veya karıştırma sırasında katılan kimyasal maddelerdir [46].

Katkıların kullanılmaya başlanması ile beton teknolojisindeki gelişmeler hızlandı. Çok yüksek dayanımlı çelik tel donatılı betonların üretilmesi süperakışkanlaştırıcı katkı ile mümkün olmaktadır.

Betonun özelliklerini istenilen yönde iyileştirmeye ve değiştirmeye yönelik çok farklı katkı malzemeleri vardır. Bu katkılar genel olarak betonun reolojik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri, priz ve sertleşmeyi etkileyen katkı maddeleri, betonun

hava içeriğini değiştiren katkı maddeleri, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştiren katkı maddeleri, betonun kimyasal etkilere dayanıklılığını etkileyen katkı maddeleri, betona özel nitelikler kazandıran katkı maddeleri şeklinde sınıflandırılabilir.

Dodsan'a göre [47] sadece dört çeşit katkı malzemesi vardır. Bunlar;

1. Çimento tanelerinin dağılmasını sağlayan,
2. Hidratasyon kinetiğini değiştiren,
3. Hidratasyon reaksiyonunun alt ürünleriyle reaksiyona giren,
4. Sadece fiziksel özelliklere etkiyen katkılardır.

Çok yüksek dayanımlı betonların elde edilebilmesindeki en önemli etken düşük su/çimento oranıdır. Su/çimento oranı ne kadar düşüğe betonun işlenebilmesi de o kadar zordur. Normal akışkanlaştırıcılar ve süperakışkanlaştırıcılardan sonra yeni malzemeler olan hiperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri ile katkısız betona göre su miktarında % 40'a varan azalma sağlanabilmektedir. Böylece beton üretiminde sadece çimentonun hidratasyonu için gereken su miktarını kullanarak yeterli işlenebilmeye sahip beton üretmek mümkün olabilir.

Buna karşın yüksek performanslı betonlarda su/çimento oranını düşürmek için yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı kullanmanın, bazı durumlarda çimento ve süperakışkanlaştırıcıların uyumsuz olduğu ve bu problemi çözmek için süperakışkanlaştırıcıyı çıkarıp karışımına daha fazla çimento ve su eklememin yararsız olduğu anlaşılmıştır [48]. Bu durum bütün çimento ve süperakışkanlaştırıcı türleri için geçerli olmasa da katkı firmalarının ve bazı araştırmacılarının dikkatini çekmiştir.

Süperakışkanlaştırıcıların bütün çimentoyla ve Portland çimentosundaki sülfat fazlarıyla nasıl etkileşime girdiği tam olarak anlaşılmış değilse de bu tür uyumsuzlukları çözmek için süperakışkanlaştırıcının iki dozda karışımına eklenmesi; (birinci doz karışımın başında ve ikinci doz karışımın sonunda veya betonu yerleştirmeden hemen önce) gündeme gelmiştir [2].

Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcıların etki mekanizmaları farklıdır. Geleneksel melamin ve naftalin sülfonatlar gibi süperakışkanlaştırıcılar, çimento taneleri tarafından emilerek, beton karıştırma işleminin erken aşamasında tanelerin yüzeylerini kuşatırlar ve yüzeylerin negatif yükünü arttırarak bu taneleri negatif itme ile dağıtırlar. Yeni kuşak hiperakışkanlaştırıcılarda bu dağıtma etkisinin yanında akışkanlaştırıcı moleküllerin sahip oldukları uzun kenarlı zincirler çimento

partiküllerinin birbirlerine olan uzaklığını koruma yeteneğini arttırlar. Buna sterik etki denilmektedir [49].

Akışkanlaştırıcı katkı malzemeleri, bu malzemelerin kullanım oranları, kullanılacak çimento tipi ve çimento miktarları üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına karşın her yeni üretimde betonda kullanılan malzemeler, bu malzemelerin kaynağı veya kullanım oranları değiştiğinden bu katkılarla ilgili genelleme yapmak mümkün değildir. Akışkanlaştırıcı katkı malzemelerinin kullanım oranlarının ve araştırılması gereken diğer parametrelerin çalışma öncesinde yapılan deneylerle belirlenmesi gerekir.

2.2.3. Çelik telin beton özelliklerine etkileri

Yüksek dayanımlı betonların esas sorunu artan dayanımla gevrekliğin de artması olup çekmede zayıf ve gerekli olan yüksek tokluk ve süneklikten de yoksun olmasıdır. Bilindiği gibi, basınç dayanımı arttıkça süneklik azalmaktadır. Bu iki özeliğin birbiriyle ters orantılı olması önemli bir sakınca sayılmaktadır. Bununla birlikte, az bir miktardaki çelik telin betona katılmasıyla gevreklik sorunu en aza indirilebilmektedir. Bundan dolayı betonun sünekliğinin iyileştirilmesi çok önemlidir.

Çelik telin gevrek matrise eklenmesiyle malzemenin tokluğu, kırılma enerjisi, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, çarpma dayanıklılığı, depreme karşı dayanıklılık, çatlamaya karşı direnç ve süneklik gibi mekanik ve kırılma özelliklerinde de büyük artışlar sağlanmaktadır. Ankraj mekanizmasından dolayı, çelik tellerin kancalı uçlu ve kısa kesilmiş olması ile bu artışlar daha da belirgin olmaktadır. ÇTDB yalın betonla karşılaştırıldığında yüksek enerji yutma kapasitesinden dolayı kırılmadan önce daha çok enerji yutmaktadır.

Beton yapıların kırılma davranışını daha iyi anlamak için, malzemenin çatlama sonrası davranışı ile ilgili bilgiler önemlidir. ÇTDB'da beton matris çatladıktan veya gevrek türde kırıldıktan sonra sünek çelik teller yükü diğer tellere aktarmaya ve taşımaya devam ederek, malzemenin yapısal bütünlük ve kohezyonunun devam etmesine yardımcı olurlar. Rasgele dağılı ve kısa kesilmiş teller, matrisin çatlamasından sonra mikroçatlakların önünü keserek bu çatlakları köprüleyerek çatlak yayılmasını kısıtlarlar. Çelik tellerin sıyrılması ise, daha çok enerji gerektirmekte ve malzemenin tokluğuna, tekrarlı ve dinamik yüklemelere karşı direncine büyük artışlar sağlamaktadır [20].

2.2.4. Isıl işlemin beton özelliklerine etkisi

Üretim sonrasındaki koşullar malzemenin erken ve ileri yaşlardaki dayanım ve dürabilitesini önemli ölçüde etkiler. İyi bir malzeme elde edebilmek için iyi bir bileşim ve iyi bir üretim yeterli olmaz, üretim sonrası koşullarının da elverişli olması gerekir. Uygun bir kür malzemenin döküm sonrasındaki özelliklerini korumasının yanında, özelliklerin iyileştirilmesinde de yarar sağlar.

Betona ısı işlem uygulanmasının nedenleri;

1. Artan sıcaklıkla çimentonun hidratasyonu hızlanır ve beton daha erken dayanım kazanır.
2. Çimento hamuru içyapısı uygulanan ısı işlemlerle daha kararlı hale gelir, bu sebeple zamanla iç yapıda meydana gelebilecek değişiklikler azalır, dolayısıyla beton daha az rötre yapar.
3. Yüksek sıcaklıklarda ısı işlem uygulanması ile silisli agrega içerisindeki kuvars aktif hale gelerek çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girer ve mukavemeti serbest kireçten daha yüksek olan bir ürün (C-S-H) oluşturur.
4. Silisli agrega kullanılarak serbest kireç miktarının azaltılması ve içyapı bakımından daha kararlı bir durumun bulunması ile yüksek sıcaklıkta ısı işlem görmüş betonların durabiliteleri daha yüksek olur.

Çok yüksek dayanımlı betonlar söz konusu olduğunda yüksek sıcaklıkta ısı işlem de üretim işleminin bir aşamasıdır. Isıl işlem programı belirlenirken karışımda kullanılan agrega ve çimentonun özellikleri de dikkate alınmalıdır.

Son zamanlarda RPB üretimi çalışmalarında bulunan çeşitli araştırmacılar üretilen numunelere 90°C'de ısı işlem uygulamanın çimentonun hidratasyonunu hızlandığını ve silisin aktif hale gelerek malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini görmüşlerdir [31, 32].

Özyurt ve diğ. [38], sıcak su kürünün yüksek performanslı çelik lif takviyeli betonların mekanik özelliklerine etkisinin çok belirgin olduğunu göstermiştir. Çalışmalarında, iki farklı kür rejimi kullanılmıştır: i) Sıcak kür rejimi: numuneler ilk 7 günlük sürede 20°C'de kirece doymun su içinde tutuldu ve ardından 2 gün 90°C'de sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde bekletildi. Daha sonra tekrar 20°C'de kirece doymun su içine alınarak burada 13 gün daha bırakıldı, ii) ikinci kür rejiminde ise numuneler 28 gün boyunca sürekli olarak 20°C'de kirece doymun su içinde tutuldu. Çalışma sonucunda

sıcak kür rejiminin açıklık ortasındaki yük-sehim eğrisine, net eğilme dayanımına ve kırılma enerjisine önemli etkisi olduğu saptandı.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışmanın bu bölümünde üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, numuneler üzerinde yapılan deneyler ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmektedir.

3.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Bu çalışmada, Akçansa Çimento A.Ş. üretimi PÇ 42,5 Portland Çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de, kimyasal özellikleri Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.1. Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler:	
Blaine özgül yüzeyi (cm ² /gr)	3520
90 mikronluk elekte kalan (%)	2,7
45 mikronluk elekte kalan (%)	14,5
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3.17
Le Chatelier (mm)	1,0
Priz başlangıcı (saat)	2,25
Priz sonu (saat)	3,00
Mekanik Özellikler:	
Basınç Dayanımı (N/mm ²)	
2 gün	29,4
7 gün	41,0
28 gün	50,1

Tablo 3.2. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler:	Ağırlıkça(%)
MgO	1,12
Cl	0,0280
SO ₃	2,68
Kızdırma Kaybı	0,88
Çözünmez Kalıntı	0,30

3.1.2. Silis dumanı

Bu çalışmada kullanılan silis dumanı, Norveç'ten ithal edilmiş olup Elkem firmasına aittir. Azot adsorbsiyon yöntemi ile ölçülen özgül yüzeyi 22130 cm²/g, çok ince taneli ve gri-mavi renklidir. Silis dumanı beton üretimi sırasında çimento ve silis unları ile beraber kuru olarak karışıma katılmış ve bu kuru karışım bir süre karıştırılarak homojen bir dağılım sağlanmıştır. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.3. Kullanılan silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

	Ağırlıkça (%)
SiO ₂	% 91,80
SO ₃	% 0,36
MgO	% 1,07
CaO	% 0,50
Na ₂ O	% 0,49
K ₂ O	% 1,34
Al ₂ O ₃	% 0,84
Fe ₂ O ₃	% 2,06
Cl	% 0,12
H ₂ O	% 0,19
Yoğunluk	2.25 gr/cm ³

3.1.3. Agregalar

Üretilen 5 karışımda çeşitli optimizasyonlarla kullanılan agregalar Deniz kumu, Podima Kumu, demir oksit içeren Silisli Kum-1 (d=0-0.50mm) ve Silisli Kum-2 (0-0.25mm)'dir. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.4 de verilmiştir. Örnek olarak Karışım 5 için agrega elek analizi sonuçları ve elde edilen değerlere göre bulunan agrega karışımının granülometri eğrisi sırasıyla Tablo 3.5 ve Şekil 3.1 de

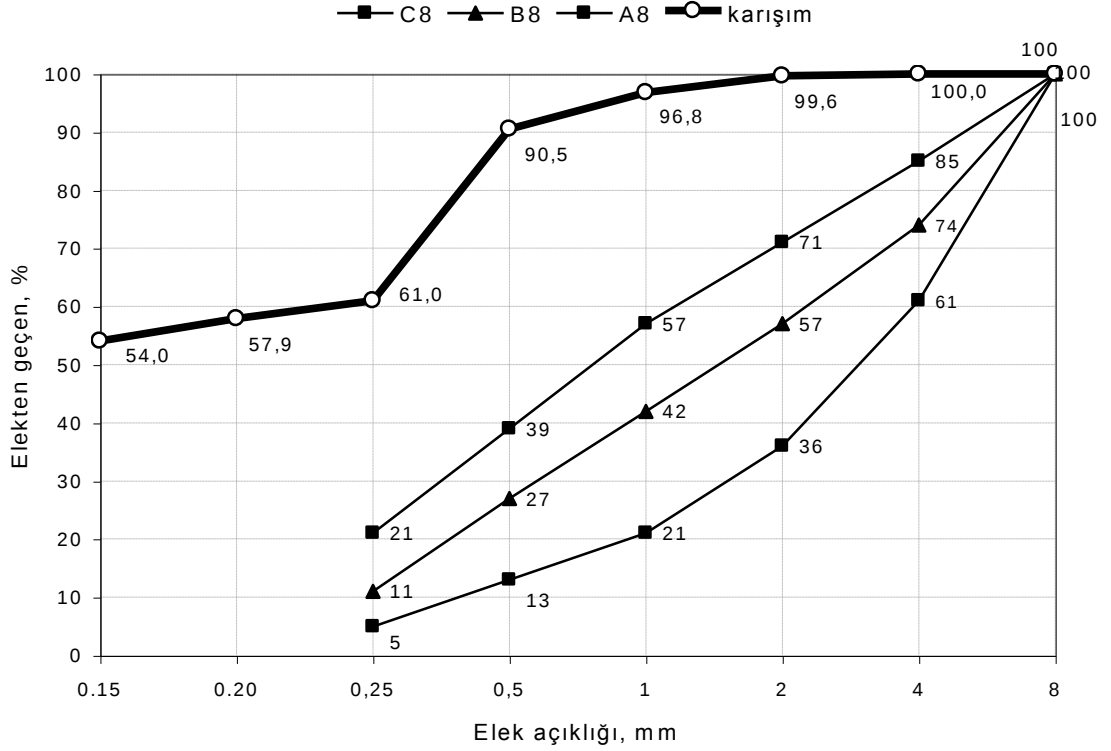
verilmektedir. Bu karışımda toplam agregâ hacminin %60'ı Silisli Kum-2 %40'ı ise Podima Kumu olarak tasarlanmıştır.

Tablo 3.4. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega tipi ve özelliği	En büyük tane çapı	Yoğunluk (gr/cm ³)
Deniz Kumu	0.25 mm	2,63
Podima Kumu	2.00 mm	2,65
Silisli Kum -1	0.50 mm	2,65
Silisli Kum -2	0.25 mm	2,65

Tablo 3.5. Karışım 5 de kullanılan agregaların granülometrileri

Elek göz boyutu, mm.	Elekten geçen malzeme (%)		
	Silisli Kum -2 (0-0.25mm)	Podima kumu (0-2mm)	Karışım
0,15	90,1	0	54
0,20	96,6	0	57,9
0,25	96	8,5	61,0
0,5	100	76,3	90,5
1	100	92,1	96,8
2	100	99,1	99,6
4	100	100	100
8	100	100	100



Şekil 3.1. Karışım 5 üretiminde kullanılan agrega karışımının granülometri eğrisi

3.1.4. Çelik tel.

Bu çalışmada Beksa Çelik Tel ve Kord Sanayi ve Ticaret A.Ş. üretimi olan OL 6/15 çelik teller kullanılmıştır. Düz şekilli kısa kesilmiş çelik lifler TS 10513'e [17] uygun, üstü pirinç kaplı ve sarı renkte olup, özellikleri Tablo 3.6'de verilmektedir.

Tablo 3.6. OL 6/15'nin teknik özellikleri

Teknik Özellikler :

Boy (mm)	: 6
Çap (mm)	: 0.15
Narinlik	: 37.5
Özgöl Ağırlık (kg/dm ³)	: 7,85
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	: 2250

3.1.5. Süperakışkanlaştırıcı

Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak Yapı Kimyasal Sanayi A.Ş. (YKS) firmasından temin edilen Polikarboksilik Eter esaslı Glenium 51, Glenium ACE 30 ve Modifiye Glenium ACE 30 tipi süperakışkanlaştırıcılar kullanılmıştır. Bu süperakışkanlaştırıcı tiplerinin seçilmesinin nedeni; yüksek performanslı beton üretmeye elverişli olması ve düşük su/çimento oranında işlenebilirliği artırmasıdır. Farklı karışımlarda

yukarıda isimleri verilen süperakışkanlaştırıcılar kullanılarak akışkanlaştırıcı tipinin etkisi de göz önüne alınmıştır.

Polikarboksilik eter esaslı olan bu yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılardan Glenium 51 ve Glenium ACE 30 $1.05 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$ özgül ağırlığında olup kahverengi renkte ve sıvı haldedir. Beton üretiminde kullanılan süper akışkanlaştırıcıların özellikleri Ek A bölümünde verilmektedir.

3.2. Beton Üretimi

Bu çalışmada 5 farklı karışım hazırlanmıştır. Üretimler İSTON A.Ş. de gerçekleştirildi. Yapılan bu 5 karışımda 1 karışım hariç nominal çimento dozajı 1000 kg/m^3 'te sabit tutuldu. Çalışmada betonun homojenliğinin sağlanması için agrega boyutu azaltılarak her bir karışım da farklı miktarlarda agrega türleri kullanılarak optimum yoğunlukta matris elde edilmeye çalışıldı. 5 değişik deneme betonu üretmenin amacı 200 MPa üzeri basınç dayanımı elde etmek olmuştur.

Üretilen 5 farklı bileşime sahip betonlarda çelik tel oranı hacimce % 5 ile %7.8 arasında kullanıldı. Silis dumanı çimento ağırlığının % 25'i oranında kullanıldı, su/çimento oranı 0.21-0.23'de ve su/bağlayıcı oranı da 0.17-0.18 aralığında tutuldu. Bütün bileşim hesaplarında hava boşluğu oranı % 2 olarak öngörüldü. Katkı miktarı bütün bileşimlerde aynı işlenebilmeyi sağlayabilmek amacıyla farklı oranlarda kullanıldı. Süperakışkanlaştırıcının etkinliği düşük olduğundan bütün karışımlarda yüksek dozaj kullanıldı. Hedeflenen dayanım değerlerine ulaşmak amacıyla çimento ve silis dumanı miktarı ve çelik tel hacmi düşük oranda artırılırken su/bağlayıcı oranı düşürüldü. Süperakışkanlaştırıcının içeriğinin %60 su olduğu düşünülerek su/çimento ve su/bağlayıcı oranları tekrar hesap edilerek Tablo 3.8'de toplam su/çimento ve toplam su/bağlayıcı oranları olarak verilmektedir.

3.2.1. Üretimde izlenen sıra

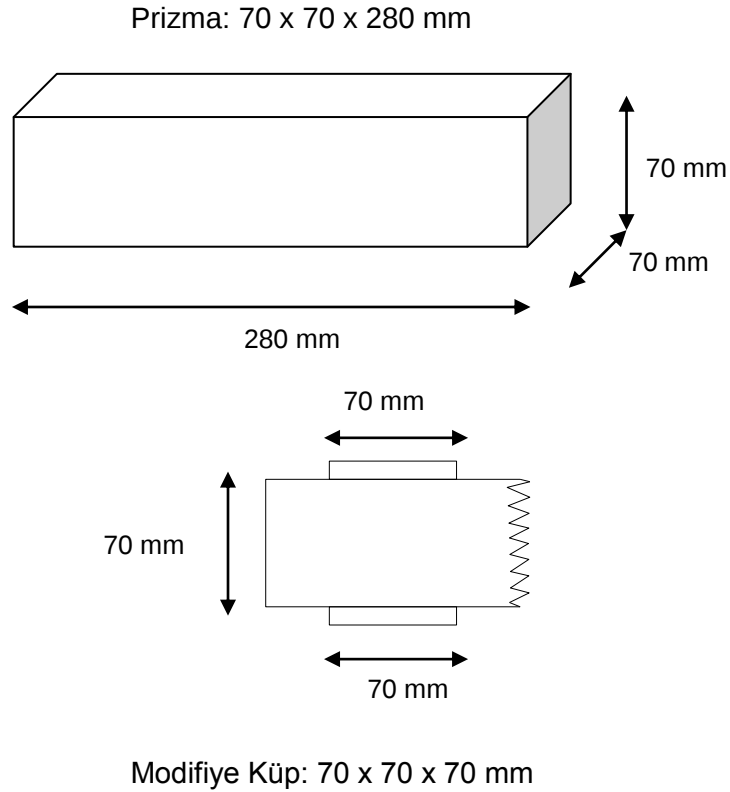
- Beton üretiminde önce çimento, silis unları, deniz kumu / podima kumu kuru olarak karıştırıldı.
- Daha sonra karışım suyunun ve hiperakışkanlaştırıcının yarısı bir kapta karıştırıldıktan sonra eklenerek karıştırma yapıldı.
- Karışım kıvamının homojenliğinin sağlanması kalan su ve hiperakışkanlaştırıcıyı azar azar katarak ve karışıma devam ederek elde edildi.

- Çelik teller betona homojen dağılması için serpiştirilerek katıldı.
- Üretilen numuneler çelik kalıplara döküldü ve vibrasyon masasında sıkıştırılarak yerleştirildi.
- Yaklaşık 24 saat sonra kalıplar açıldı ve numuneler daha önceden belirlenen kür ortamına alındı.

Üretim sırasını gösteren şekiller Ek B bölümünde Şekil B.1 – Şekil B.10’da verilmektedir.

3.2.2. Numune boyutları ve şekilleri

Her bir karışımdan 3 adet prizma numunesi üretildi. Numuneler üretimden 24 saat sonra kalıplarından alınarak $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ’deki kür havuzuna kondu. Numune boyutları ve şekilleri Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Numune boyut ve şekilleri

3.3. Üretilen Numunelerin Kodlarının Belirlenmesi

Üretilen betonlardan ilk dördünde yaklaşık %5 oranında çelik tel kullanıldı. Sadece 5. numunede bu oran %7.8’e çıkarıldı. Kodlamaya esas olan parametre kullanılan agrega cins ve/veya miktarlarıdır. Buna göre numunelerin kodlanması aşağıda (Tablo 3.7) verilmektedir.

Tablo 3.7. Numune Kodlaması

Numune Kodu / Kullanılan Agregalar	K1	K2	K3	K4	K5
Silisli Kum -1 (0-0.50 mm)	X	X	X	X	
Silisli Kum -2 (0-0.25 mm)	X	X	X	X	X
Deniz Kumu (0-0.25 mm)		X	X	X	
Podima Kumu (0-2 mm)					X

Taze Beton Özellikleri Tablo 3.8' de verilmektedir.

Tablo 3.8. Taze Beton Özellikleri

Bileşen	birim	K1	K2	K3	K4	K5
Portland Çimentosu (kg)	kg/m ³	945	889	839	865	1015
Silis Dumanı (kg)	kg/m ³	236	222	210	217	254
Kum 1 (Silisli Kum-1: 0-0.50mm)	kg/m ³	331	311	182	146	-
Kum 2 (Silisli Kum-2: 0-0.25mm)	kg/m ³	331	222	297	319	345
Kum 3 (Deniz Kumu: 0-0.25mm)	kg/m ³	-	89	242	319	-
Kum 4 (İri Podima Kumu: 0-2mm)	kg/m ³	-	-	-	-	230
Glenium 51	kg/m ³	-	85	131	-	93
Glenium ACE 30	kg/m ³	86	-	-	-	-
Modifiye Glenium ACE 30	kg/m ³	-	-	-	96	-
Süperakışkanlaştırıcı	%	8,2	8,1	12,5	9,1	9,4
Su	kg/m ³	211	273	181	184	228
Çelik -Tel (OL6/15)	kg/m ³	444	418	394	428	609
Çelik -Tel (OL6/15)	%	5,7	5,3	5,0	5,4	7,8
Su / Çimento		0,22	0,31	0,22	0,21	0,22
Toplam Su / Çimento		0,28	0,36	0,31	0,28	0,28
Su / Bağlayıcı		0,18	0,25	0,17	0,17	0,18
Toplam Su / Bağlayıcı		0,22	0,29	0,24	0,22	0,23
Hava Boşluğu	%	0,59	1,11	1,33	0,81	0,01
Gerçek Birim Ağırlık	kg/m ³	2584	2509	2476	2574	2780

3.4. Isıl İşlem Programı

Uygulanan ısı işlem programına göre; üretilen numuneler ilk 7 günlük sürede 20 °C ± 2°C'de kirece doymun su içerisinde tutuldu. Ardından 2 gün 90°C ± 2°C'de sıcaklıkta kirece doymun su içerisinde bekletildi. Daha sonra tekrar 20°C ± 2°C'de kirece doymun su içine alınarak burada 30 ± 2 gün bekletildi.

3.5. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.5.1. Küp basınç deneyi

Basınç deneyleri (7x7x7 cm'lik) eğilme deneyinden kalan parça üzerinde modifiye küp tek eksenli basınç deney yöntemine göre yapıldı. Basınç deneyleri 300 ton kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak gerçekleştirildi. Numunelerin kırılma (maksimum) yükleri kesit alanına bölünerek basınç dayanımları hesaplandı. Basınç dayanımı deney düzeneği Ek C bölümünde Şekil C.1'de verilmektedir. Basınç dayanımları (f_c) hesaplanırken :

$$f_c = P / (a * b) \quad (3.1)$$

bağıntısı kullanıldı. Bu bağıntıda f_c ; basınç dayanımı (MPa), P; yük (N) ve ($a*b$); numunenin yüzey alanı (mm²)'dır.

3.5.2. Küp yarma çekme dayanımı deneyi

Eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılan numuneler yarma deneyine tabi tutuldu. Yarma çekme dayanımı en büyük yük kullanılarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$f_{pst} = 2 * P / (\pi * A) \quad (3.2)$$

burada P ve A sırasıyla, en büyük yük ve prizmatik numunenin alanıdır (70x70 mm²).

3.5.3. Üç noktalı eğilme deneyi ve kırılma enerjisinin belirlenmesi

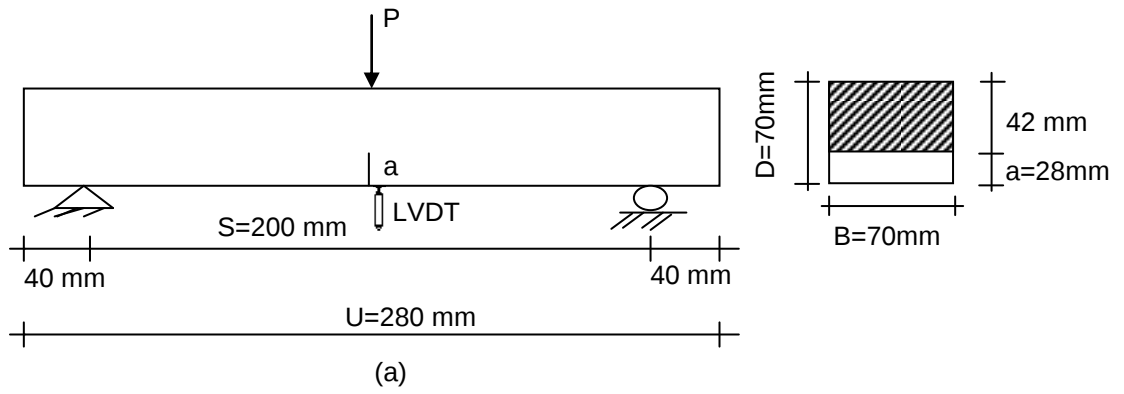
Kırılma enerjisinin belirlenmesi için çentikli 70x70x280 mm'lik kiriş numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi (Şekil 3.3) gerçekleştirildi. Numuneler elmas testere ile kesilerek 28mm'lik bir çentik açıldı ve etkin kesit alanının 42x70mm olması sağlandı. Kiriş numuneler yaklaşık 45 günde eğilme deneyine tabi tutuldu. Beton kiriş numunelere yük, maksimum kapasitesi 100 kN olan Instron 5500 R kapalı çevrimli deplasman kontrollü deney makinesi ile uygulandı. Yükleme hızı 0,5 mm'lik bir sehime kadar 0,075 mm/dak. ve numune kırılıncaya kadar 0,25 mm/dak.'da sabit tutuldu. Kirişin ortasına yerleştirilen 1 adet LVDT ile sehim ölçüldü ve her bir kiriş numune için yük–açıklığın ortasındaki sehim eğrisi elde edildi. Üç noktalı eğilme deney düzeneği Ek D bölümündeki Şekil D.1'de, numunenin kırılma

sonrası hali ise Şekil D.2'de verilmektedir. Tipik olarak çentikli kiriş numune için eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.3a.'da, elde edilen yük-sehim eğrisi ise Şekil 3.3.b'de gösterilmektedir.

Yük-sehim eğrisinin altındaki alan (W_0) yardımıyla betonun kırılma enerjisi RILEM TC 50-FMC'nin önerdiği denklem (3.3) ile hesaplanır:

$$G_F = \frac{W_0 + m \frac{S}{U} g \delta_0}{B(D - a)}, \text{ N/m veya J/m}^2 \quad (3.3)$$

Burada, B, D, a, m, S ve U sırasıyla, kiriş numunenin genişliği, derinliği, çentik uzunluğu, numunenin mesnetler arasındaki ağırlığı, mesnetler arası uzaklığı ve kirişin uzunluğudur. g yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m/sn.}^2$), δ_0 ise göçme anında açıklığın ortasındaki ölçülen sehimdir.



Şekil 3.3. Üç noktalı eğilme deney düzeneği (a) ve elde edilen yük-sehim eğrisinin şematik gösterimi (b).

3.5.3.1 Net eğilme dayanımının belirlenmesi

Net eğilme dayanımı, çentikli kiriş numune üzerinde yapılan üç noktalı eğilme deneyinden elde edilen en büyük yük kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$f_{net} = \frac{3PS}{2B(D-a)^2}, \text{ MPa} \quad (3.3)$$

Burada, P, S, B, D, ve a, sırasıyla, en büyük yük, mesnetler arası uzunluk, numunenin genişliği, numunenin yüksekliği, ve çentik uzunluğu olup, $a/D=0,4$ ve $S/D=2,86$ 'dır. (Şekil 3.3)

Sertleşmiş beton deneylerinden elde edilen sonuçlar Tablo 3.9.'de verilmektedir.

Tablo 3.9. Sertleşmiş beton özellikleri

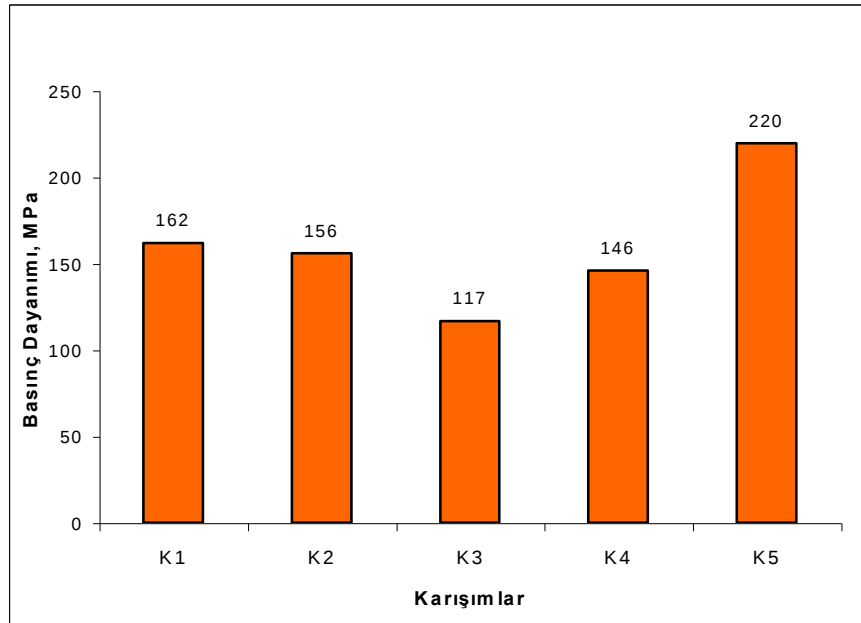
Numune Kodları	K1	K2	K3	K4	K5
Basınç Dayanımı- f_c (N/mm ²)	162	156	117	146	220
Eğilmede maksimum yük, P_{maks} (kN)	22.3	21.3	10.7	8.9	13.7
Yarma Çekme Dayanımı - f_{st} (N/mm ²)	30	24	20	21	38
Net Eğilme Dayanımı- f_{net} (N/mm ²)	54	49	30	22	37
Kırılma Enerjisi- G_F (J/m ²)	23507	18744	9851	8571	17228

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Modifiye Küp Basınç Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Küp basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 3.8’de ve Şekil 4.1’de verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde ilk dört karışım için basınç dayanımı değerleri birbirine yakın değerler vermiştir. Fakat, beşinci karışımın basınç dayanımı diğer karışımlardan daha yüksek olarak 220 MPa değerine ulaşmıştır. Bu çalışmada yüksek performansla beraber yüksek dayanımlı bir beton üretmek amaçlandığından bu karışımla bu sonuca erişildiği açıkça görülmektedir. Buna sebep olarak aşağıdaki yorumlar yapılabilir;

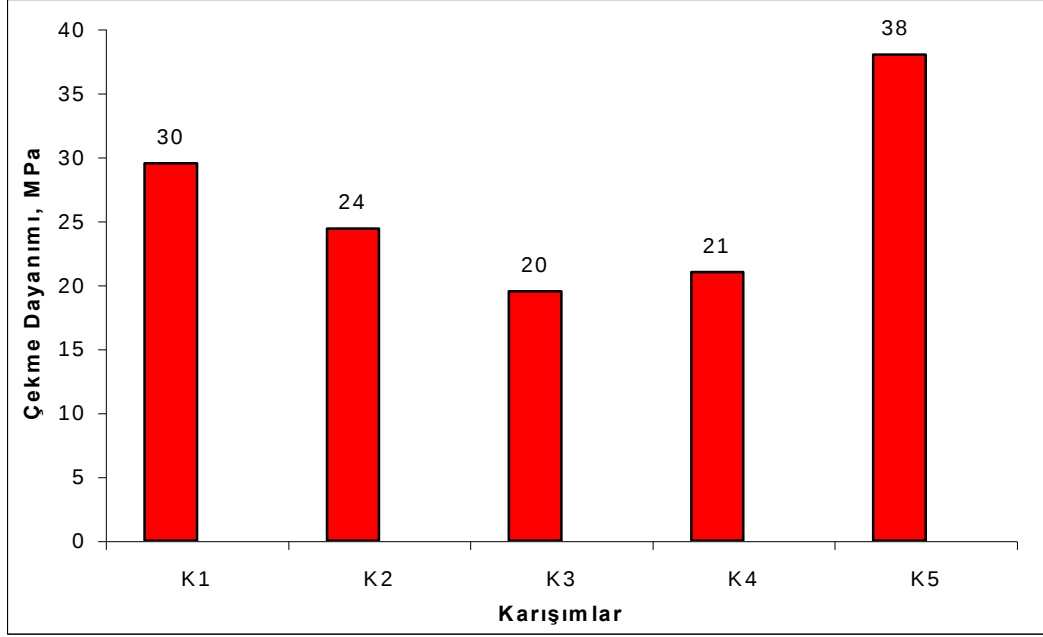
- Çelik tel miktarı - kullanılan çelik tek miktarının diğer karışımlarda yaklaşık %5-5.7 iken K5’te %7.8 oranında kullanılmış olması,
- Agrega optimizasyonu – K5’de diğer karışımlardan farklı olarak en büyük tane çapı 2 mm olan Podima Kumu kullanılmıştır. Buradan Silisli Kum-2 ile Podima kumu karışımının granülometresinin kesikli olarak daha sıkı bir diziliş gösterdiği sonucuna varılabilir.



Şekil 4.1. Küp Basınç Dayanımları

4.2. K p Yarma- ekme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

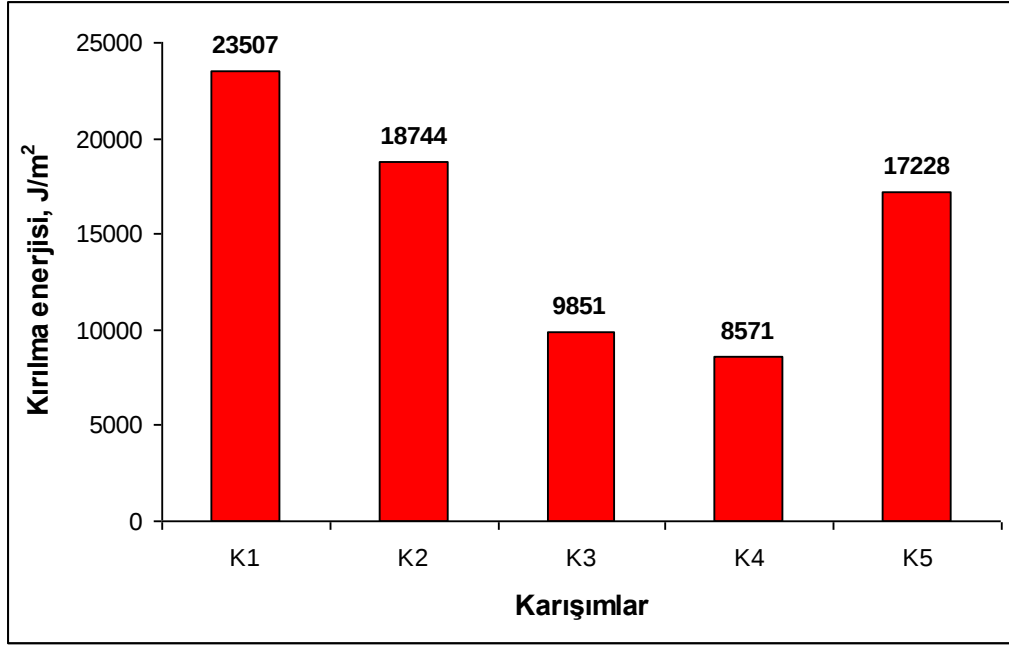
K p yarma-çekme deneylerinden elde edilen yarma çekme dayanımı değerleri Tablo 3.8’de ve  ekil 4.2’de verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde, yalın betona kıyasla YP TD Betonun  ekme dayanımları belirgin bir şekilde artmıştır; bu artış son karışımda  elik tel miktarının artmasına paralel elde edilen en yüksek çekme dayanımı değerini vermiştir.



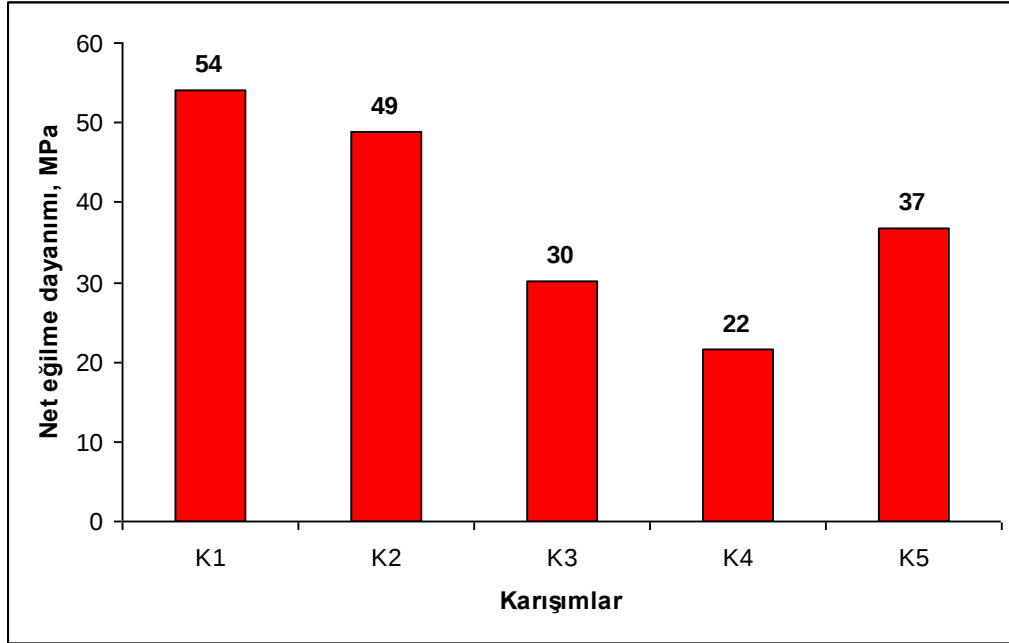
Şekil 4.2. K p Yarma- ekme Dayanımları

4.3. Eğilme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

3 noktalı eğilme deneylerinden hesaplanan kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımı değerleri Tablo 3.8 ve sırasıyla  ekil 4.3 ve  ekil 4.4.’de verilmiştir.



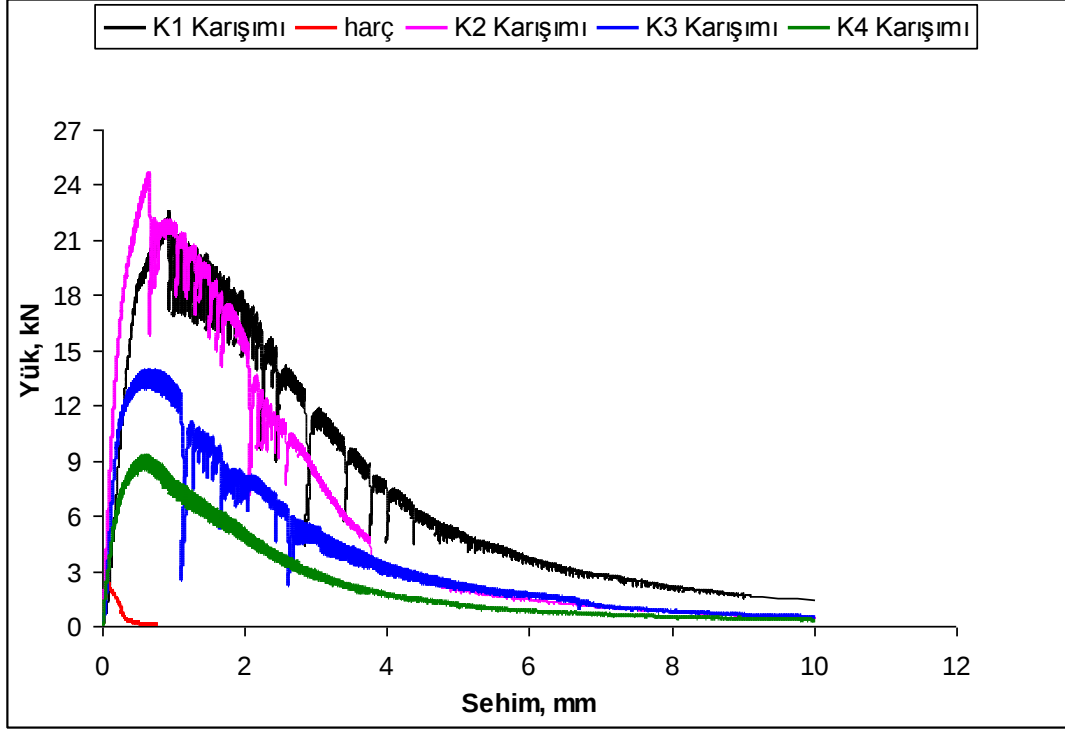
Şekil 4.3. Kırılma Enerjileri



Şekil 4.4. Net Eğilme Dayanımları

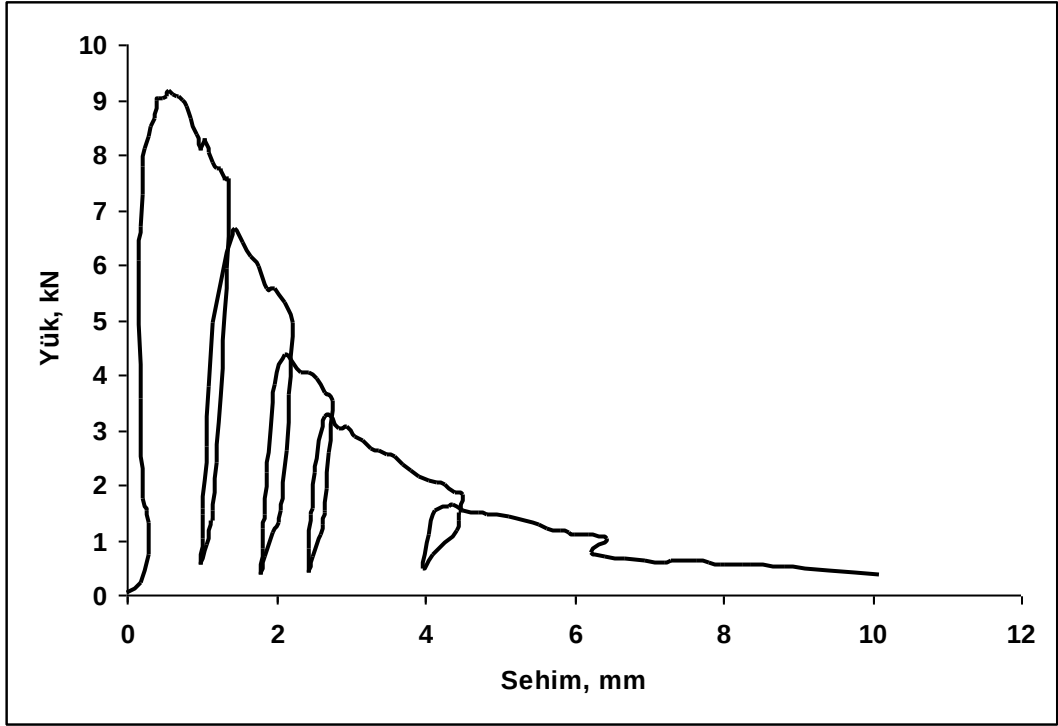
Yukarıdaki şekiller incelendiğinde 1, 2 ve 5. karışımlar sırasıyla en yüksek kırılma enerjileri ve net eğilme dayanım değerlerini vermiştir. Şekillerden de görüldüğü üzere çelik tel eklenmesi 22 – 54 MPa eğilme dayanımları ve 8560 – 23500J/m² kırılma enerjileri elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 4.5.'de ise ilk dört karışımın yük-sehim diyagramları yalın harcla karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Kırılma sırasında harcanan enerji, dolayısıyla sünekliği ifade eden kırılma enerjisi değerleri yük-sehim eğrilerinin altında kalan alana bağlıdır. Şekil 4.5'den de görüldüğü üzere normal

harcla karşılaştırıldığında YPÇTD Betonların enerji yutma kapasiteleri harca oranla oldukça yüksektir. Buradan YPÇTD Betonunun kırılma enerjisinin yalın harça göre 220 kat yüksek bir değer olduğu sonucuna varılır. Bu da üretilen YPÇTD Betonların oldukça sünek bir yapıya sahip olduklarını gösterir.

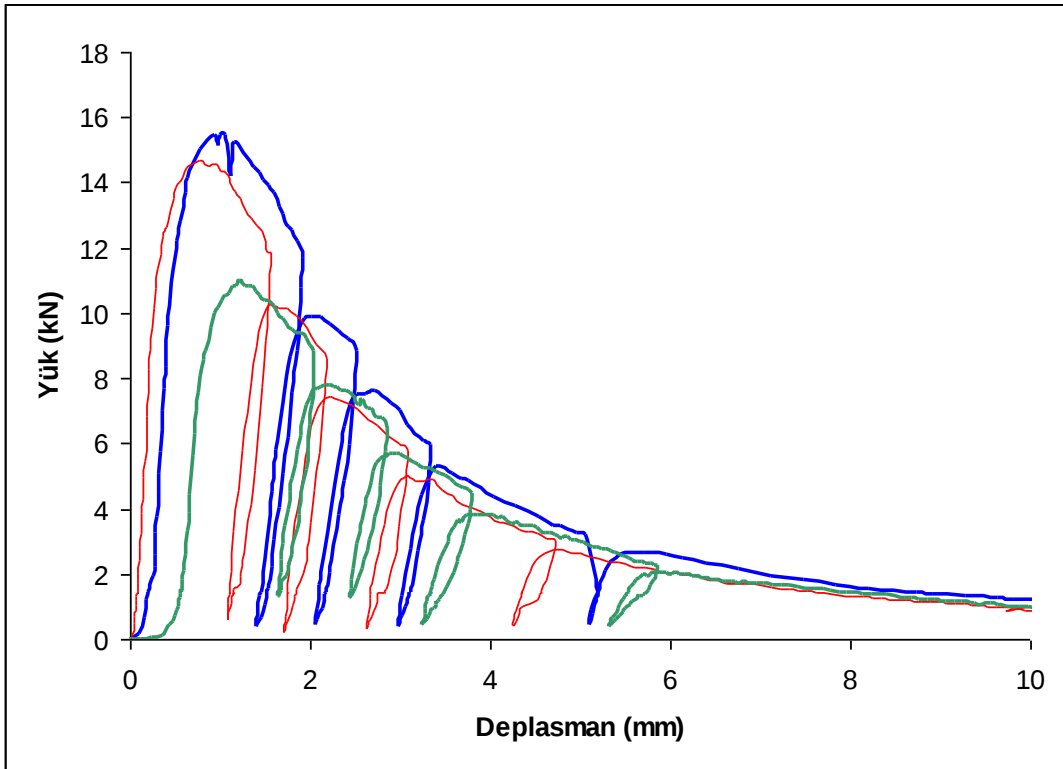


Şekil 4.5. İlk 4 karışımla harcın Yük-Sehim Diyagramlarının Karşılaştırılması

4. ve 5. karışım numunelerinin tekrarlı yükler altında davranışı incelenmiştir. Bu karışımların tekrarlı yüklemeler altında oluşan yük sehim eğrileri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yükleme boşaltma çevrimlerinde, döngülerin eğimi yük-sehim eğrisinin başlangıçtaki eğimine hemen hemen paraleldir. Bu da YPÇTD Betonun rijitliğinde bir azalma olmadığını ve oldukça sünek bir yapıya sahip olduğunun bir göstergesidir. Tekrarlı yükler altında çelik teller çatlakları etkin biçimde köprülemiş ve yüksek sehim değerlerinde bile rijitlikte bir azalma görülmemiştir. Her bir karışım numunelerinde yapılan eğilme deneylerinden elde edilen yük-sehim şekilleri Ek E'de verilmektedir.



Şekil 4.6. Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (4. karışım)



Şekil 4.7. Tekrarlı yükleme altında Yük-Sehim Diyagramı (5. karışım 3 numune için)

5. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, çok ince kumlar, süperakışkanlaştırıcı, $D=0,15$ mm ve $L=6$ mm çelik tel, ve silis dumanı kullanarak üretilen ve 2 gün süreyle $90^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtıl işlem uygulanan Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin (YPLDÇEK) 28. günde elde edilen mekanik davranışı ve kırılma parametreleri hakkında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

- 200 MPa'ı aşan basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Karışımlarda iri agregaların çıkarılmasıyla betonun homojenliğinin artırılması ve puzolonik reaksiyonların hızlandırılması için 2 gün süreyle $90^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtıl işlem uygulanmıştır. Böylece hem dayanım hem de enerji artışı sağlanmıştır.
- Üretilen Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin kırılma enerjisi normal harcının yaklaşık 220 katı kadar çıkmıştır.
- Yalın betona kıyasla Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin net eğilme ve çekme dayanımları belirgin biçimde artmıştır.
- Tekrarlı yükler altında, yükleme - boşaltma döngülerinden sonra rijitlikte azalma görülmemiştir. Döngülerin eğimi yük-sehim eğrisinin başlangıçtaki eğimine hemen hemen paraleldir. Bu da Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin çok rijit ve sünek bir davranış sergilediğini anlamına gelmektedir. Çelik tel donatısız yüksek dayanımlı betonlarda (YDB) odak noktası gevrekliğin bir ölçüsü olarak alınabilir. YDB'lerle karşılaştırıldığında, YPLDÇEK malzemeler için bu nokta orijinden çok uzakta oluşmakta veya oluşmamaktadır.
- Yüksek performanslı betonlar, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı normal betonlardan daha dirençlidir. Bu açıdan bazı stratejik yapılarda ve sanayi atıklarının depolandığı yapılarda da kullanılabilirler. Birçok yapıda kullanılan betonun dayanımından çok dürabilitesi önemli olduğundan, yüksek performanslı betonların tasarımı ve uygulamada kullanımı giderek gelişecektir. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesinde yüksek performanslı çelik tel takviyeli çimento esaslı kompozitlerin yüksek dürabilite

özelliklerine sahip olması ve mevcut yapıyla uyumluluk açısından en uygun malzeme olduğu yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Depremler veya beklenmedik yükler sonucu oluşan hasarların onarımında, bu yeni kuşak çimento esaslı kompozitler yararlı olacaktır.

REFERANSLAR

- [1] **Kmita, A.**, 2000, A new generation of concrete in civil engineering, *Journal of Materials Processing Technology* 106, 80-86
- [2] **Aitcin, P.C.**, 2000, Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research* 30, 1349-1359
- [3] **SHRP- C/FR - 91-103**, 1991, High Performance Concretes, A State of the Art Report, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington DC.
- [4] **Matte, V. and Moranville, M.**, 1999. Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 1-9.
- [5] **Bouygues**, Les Bétons de Poudres Réactive, Challenger-1 Avenue Eugène Freyssinet 78061 Saint-Quentin-en-Yvelines Cedex-France
- [6] **Richard, P. and Cheyrezy, M.H.**, 1994. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Internal Report*, 15p., Bouygues.
- [7] **Richard, P. and Cheyrezy, M.**, 1995. Composition of reactive powder concrete, *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511.
- [8] **Bache, H.H.**, 1981. Densified cement ultra-fine particle-based materials, Report 40, 35p, Aalborg Portland, Denmark.
- [9] **Karihaloo, B.L.**, 1995. Fracture Mechanics and structural concrete, Longman Group Ltd., Essex, England.
- [10] **Jennings, H. M.**, 1991. Advanced Cement – Based Matrices for Composites, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites *Proceedings of the International Workshop High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, E&FN SPON.
- [11] **Birchall, J.D., Howard, A.J. ve Kendall, K.**, 1981. Flexural strength and porosity of cements, *Nature*, **289**, 388-390.
- [12] **Alexander, M.G.**, 1993. From Nanometres to Gigapascals Cementing Future, A University of Cape Town Publication, *Inaugural Lecture*, 23p.
- [13] **Regourd, M.M.**, 1992. Microstructure of High Performance Concrete High Performance Concrete From Material to Structure, E&FN SPON, London, 3-14.

- [14] **Massazza, F.**, Evaluation of Cements and Cementitious Systems: History and Prospects, Cements and Concrete Technology in the 200s, *Second International Symposium*, 6-10 September 2000, TCMA, İstanbul, 3-28
- [15] **Lawrance C. D.**, The Properties of Cement Paste Compacted Under High Pressure, *Cement and Concrete Association*, Research Report No.19, June 1969, London, 21
- [16] **Roy, D. M., and Gouda, G. R.**, Porosity – Strength Relation in Cementitious Materials with Very High Strength, *Journal of the American Ceramic Society*, Vol:56, 1973, pp.549-550
- [17] **Taşdemir M.A., Karihaloo B. L., Bayramov F., Yerlikaya M. and Sönmez R.**, “HS/HPC, and SCC for Repair and Retrofitting of Concrete Structures”, The 14th ERMCO, European Ready Mixed Concrete Organisation Congress, 12-18 June 2004, Helsinki, Finland
- [18] **ACIFC**, 1999. Steel fibre reinforced concrete industrial ground floors, *Association of Concrete Industrial Flooring Contractors*, Warwickshire, 24pp.
- [19] **Taşdemir, M.A., Bayramov, F., İlki, A. ve Yerlikaya, M.**, 2002. Prefabrik elemanlar için çelik tel donatılı betonlar, *Beton Prefabrikasyon*, Temmuz, Sayı **63**, 5-12.
- [20] **Barros, J.A.O. and Figueiras, J.A.**, 1999. Flexural behaviour of SFRC: Testing and modelling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11(4)**, 331-339.
- [21] **Li, V.C.**, 2002. Large volume, high-performance applications of fibers in Civil Engineering, John Wiley & Sons, Inc., *Journal of Applied Polymer Science*, **83**, 660–686.
- [22] **Alaee, F.J.**, 2002. Retrofitting of concrete structures using high performance fibre reinforced cementitious composite, *PhD Thesis*, Department of Civil Engineering, Cardiff University.
- [23] **Bayramov, F.**, 2004, Çimento esaslı Kompozit Malzemelerin Optimum Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] **Balaguru, P., Narahari, R. and Patel, M.**, 1992. Flexural toughness of steel fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **89(6)**, 541-546.
- [25] **Emerging Construction Technologies**, <http://www.new-technologies.org/ECT/Civil/reactive.htm>
- [26] **Taşdemir M.A., ve Bayramov F.**, “Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı”, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, Cilt 1, Sayı 2, 125-144, Ekim 2002

- [27] **Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W.**, 1995. Characterization of high performance fiber reinforced cement composites-HPFRCC, Pre-Proceedings: *2nd International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-95)*, 2, 1-23. Michigan.
- [28] **HDR**, www.hdrinc.com
- [29] **Walraven, J.**, 1999. The evolution of concrete, *Structural Concrete, Journal of fib*, **P1, 1**, 3-11.
- [30] **Blais, P. Y., and Couture, M.**, 1999, Precast, Prestressed Pedestrian Bridge — World's First Reactive Powder Concrete Structure, *PCI Journal*
- [31] **Dugat, J., Roux, N. and Bernier, G.**, 1996. Mechanical properties of reactive powder concretes, *Materials and Structures*, **29**, 233-240.
- [32] **Bonneau, O., Lachemi, M., Dallaire, E., Dugat, J. and Aitcin, P-C.**, 1997. Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes, *ACI Materials Journal*, **94(4)**, 286-290.
- [33] **Matte, V. and Moranville, M.**, 1999. Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes, *Cement and Concrete Composites*, **21**, 1-9.
- [34] **Colleparidi, s., Coppola, L., Troli, R., Zaffaroni, P.**, Influence of the Superplasticizer Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete For Precast Structures
- [35] **Karihaloo, B. L. and De Vriese K. M. B.**, 1999. Short fibre-reinforced reactive powder concrete, *Proceedings Concrete Communication Conference, British Cement Association*, 67-78.
- [36] **Karihaloo, B.L.**, 2000. Retrofitting damaged RC beams with high-performance fiber-reinforced concrete, *Proceedings Concrete Communications Conference*, 153-164, British Cement Association.
- [37] **Alaee, F.J., Benson, S.D.P. and Karihaloo, B.L.**, 2001. High-performance fiber-reinforced cementitious composites for retrofitting, *Proceedings 3rd Int. Conference on Technology Convergence in Composites Application*, 1-10, Sydney.
- [38] **Özyurt, N.**, 2000. Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [39] **Yeğınobalı, A.**, 2002. Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- [40] **Sellevoid, E. J., Nilsen, T.**, 1987 Condensed Silica Fume In Concrete : A world review, *Supplementary Cementing Materials for Concrete*, CANMET, Canadian Government Publishing Center, pp167-229

- [41] **Hijorth, L.**, 1983. Development and Application of High Density Cement - Based Materials, Phill. Trans. Roy. Soc., A310, 167-173, London
- [42] **FIP.** (1988). Condensed Silica Fume in Concrete, State of Art Report, 37p, Thomas Telford, London.
- [43] **Goldman, A. ve Bentur, A.** (1992). Effects of Pozzolanic and Nonreactive Microfillers on Transition Zone in High-Strength Concretes. *Proceedings, Interfaces in Cementitious Composites*, J.C. Maso, ed., RILEM, E and FN Spon, London.
- [44] **Khayat, K.H. ve Aitcin P. C.**, Silica fume in concrete: an overview, ACI SP-132, 835-865, American Concrete Institute, Detroit, 1992
- [45] **Taşdemir, C., Taşdemir, M. A., Lydon, F. D. Ve Barr, B. I. G.** (1996). Effects of Silica Fume and Aggregate Size on the Brittleness of Concrete, *Cement and Concrete Research*, **26**, 63-68.
- [46] **ACI Committee 212**, 1989, Chemical Admixtures for Concrete, *ACI Materilas Journal /May-June*.
- [47] **Dodson V. H.**, Concrete Admixtures, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1990.
- [48] **Aitcin, P. C., Jolicoeur, C., MacGregor J.**, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't, *Concr Int* 16 (5) (1991) 45-52
- [49] **YKS**, Yüksek Performanslı Beton İçin Yeni Kuşak Hiper Akışkanlaştırıcı, GLENİUM Tanıtım Broşürü, YKS.

EK A

KULLANILAN SÜPER AKIŞKANLAŞTIRICI ÖZELİKLERİ

EK B

BETON ÜRETİM SIRASI



Şekil B.1 Karışımında Kullanılan Malzemeler



Şekil B.2 Kuru Karışım



Şekil B.3 Agregalar, çimento ve silis dumanının kuru karıştırılması



Şekil B.4 Süperakışkanlaştırıcı ve suyun ilk yarısının eklenmesi



Şekil B.5 Karışıma Çelik Tel Eklenmesi



Şekil B.6 Karışımın Yeterli İşlenebilirliği Sağlanmış Hali



Şekil B.7 Karışımın Kalıplara Alınmadan Önceki Hali



Şekil B.8 Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması - 1



Şekil B.9 Kalıba alınmış numunelere vibrasyon uygulanması –2



Şekil B.10 Numunelerin Vibrasyondan Sonraki Hali

EK C

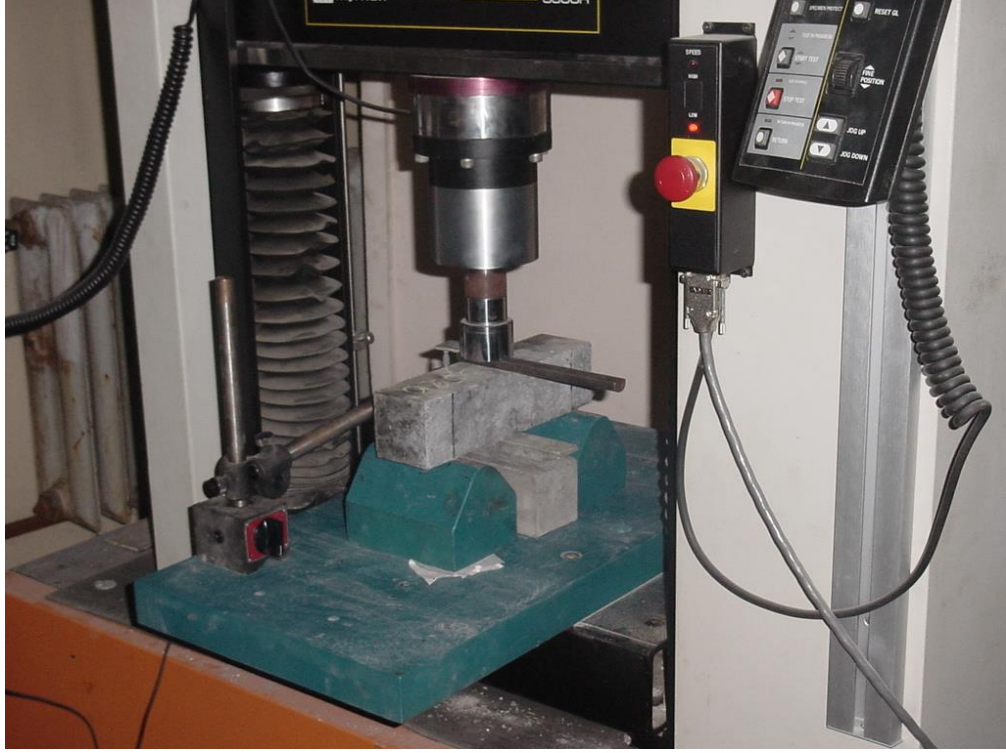
KÜP BASINÇ DAYANIMI DENEY DÜZENEGİ



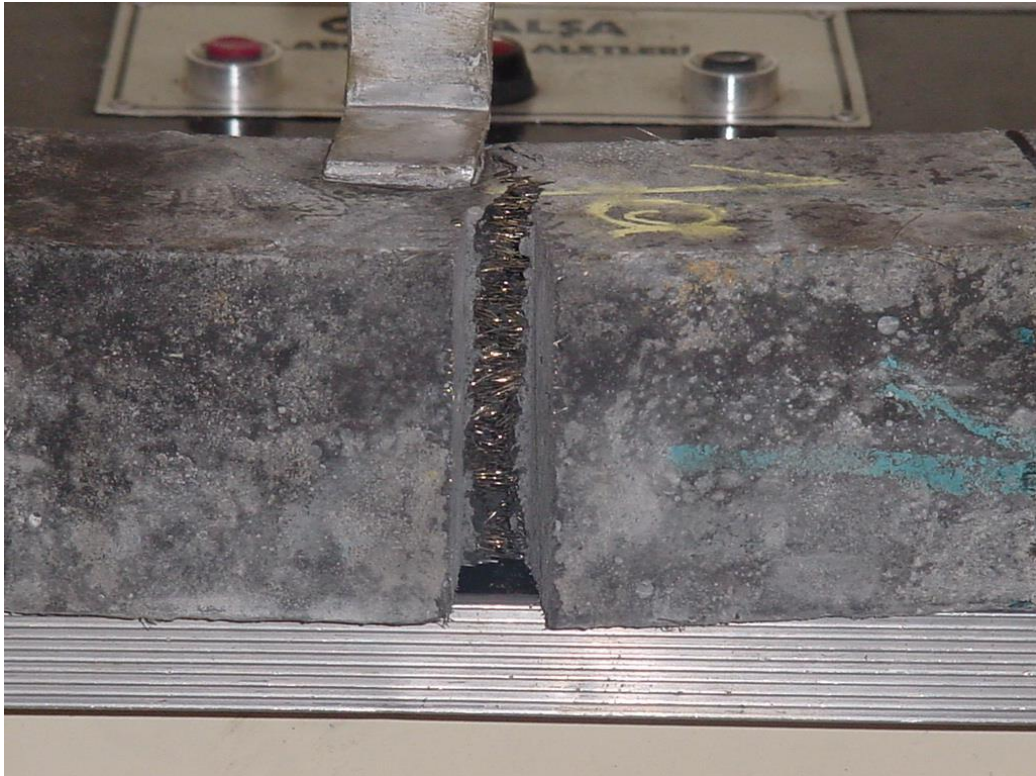
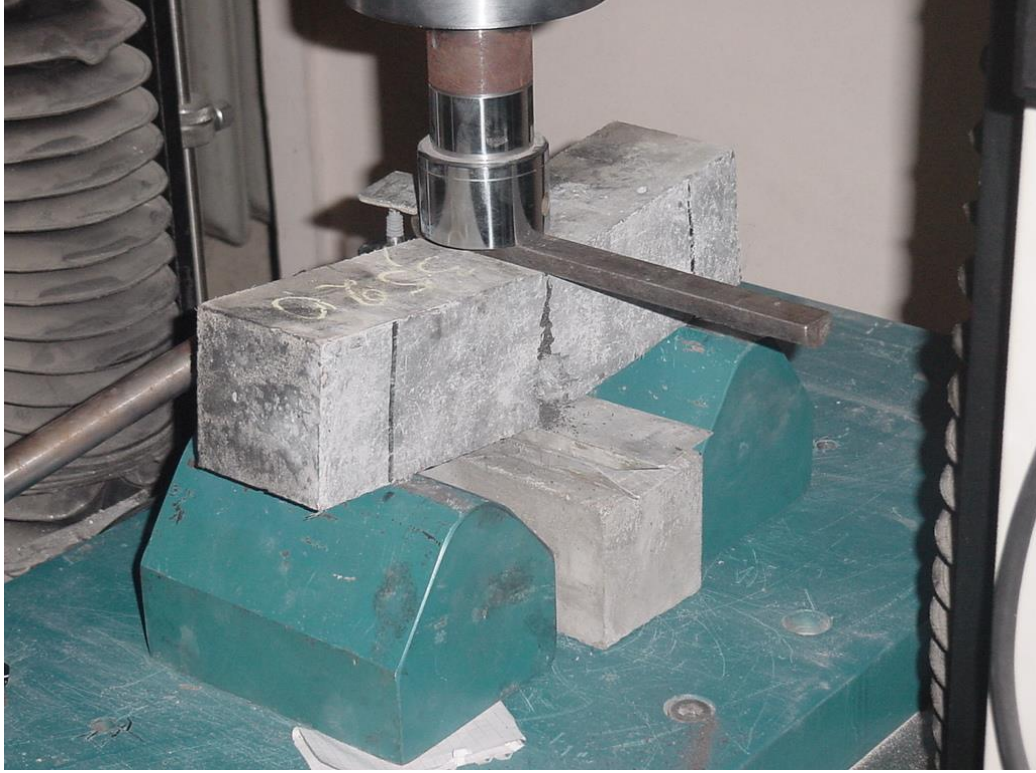
Şekil C.1. Küp Basınç Dayanımı Deney Düzeneği

EK D

ÜÇ NOKTALI EĞİLME DENEYİ DÜZENEGİ



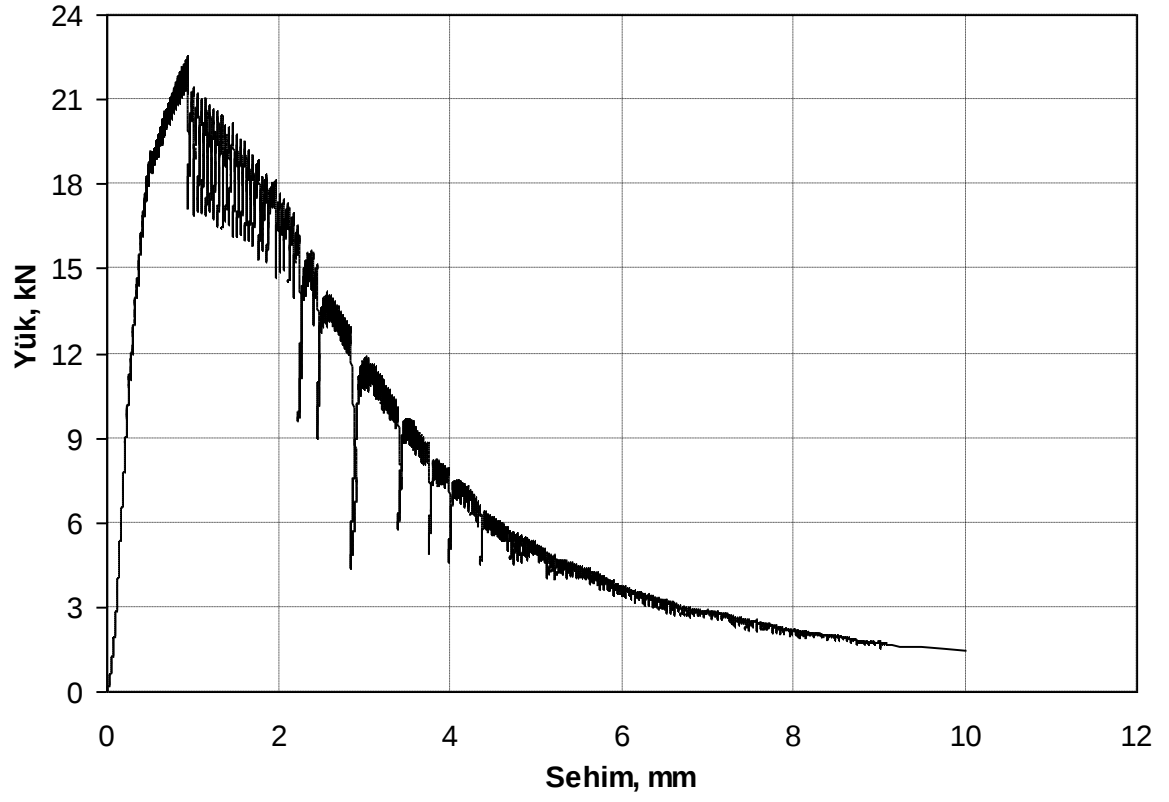
Şekil D.1. Üç noktalı Eğilme Deneyi Düzeneği



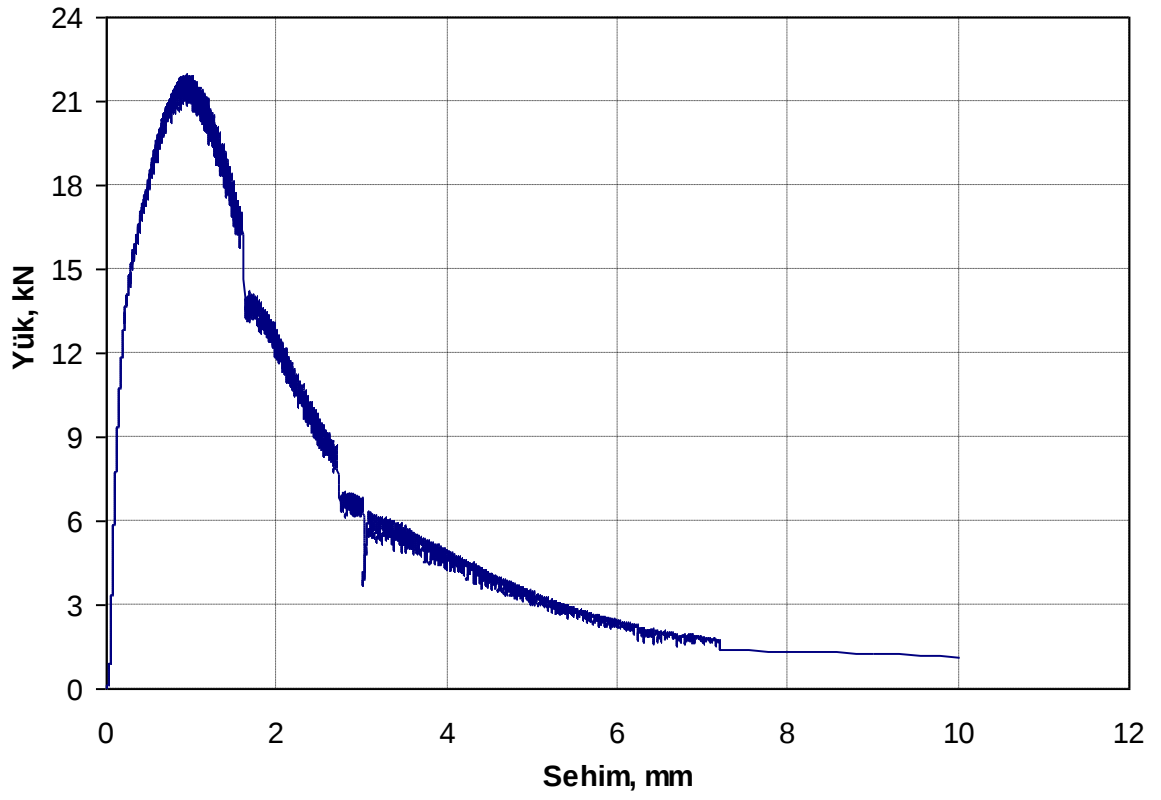
Şekil D.2. Üç noktalı Eğilme Deneyi Sonrası K1 Numunesi

EK E

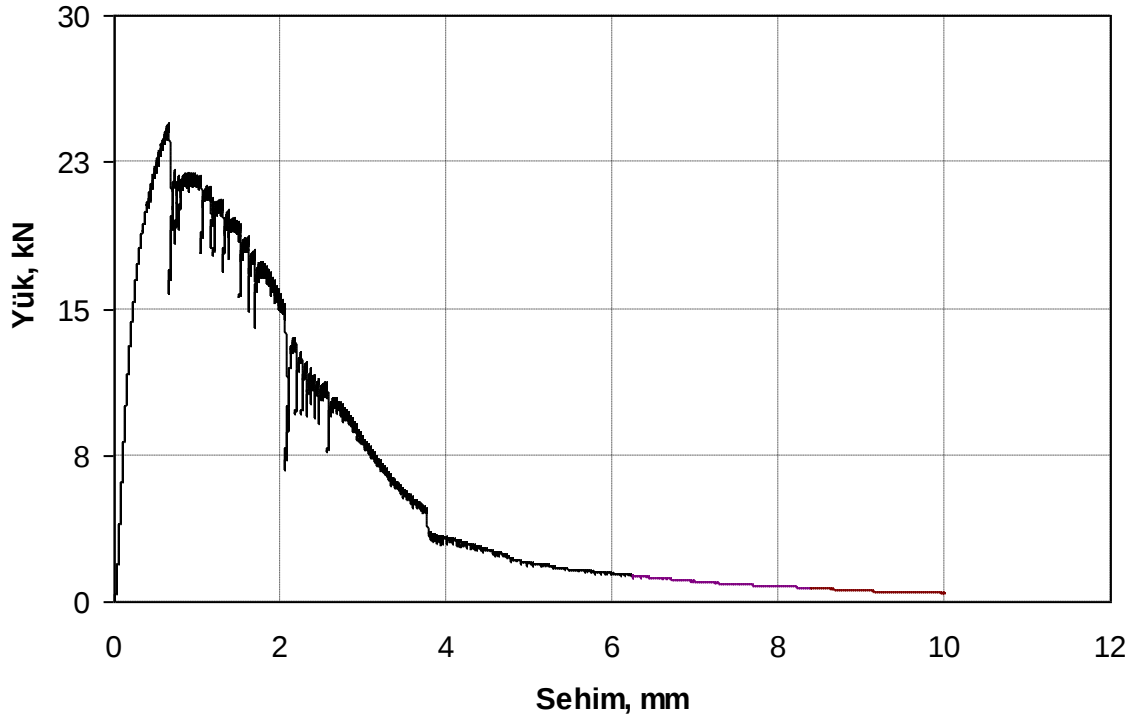
YÜK-SEHİM DİYAGRAMLARI



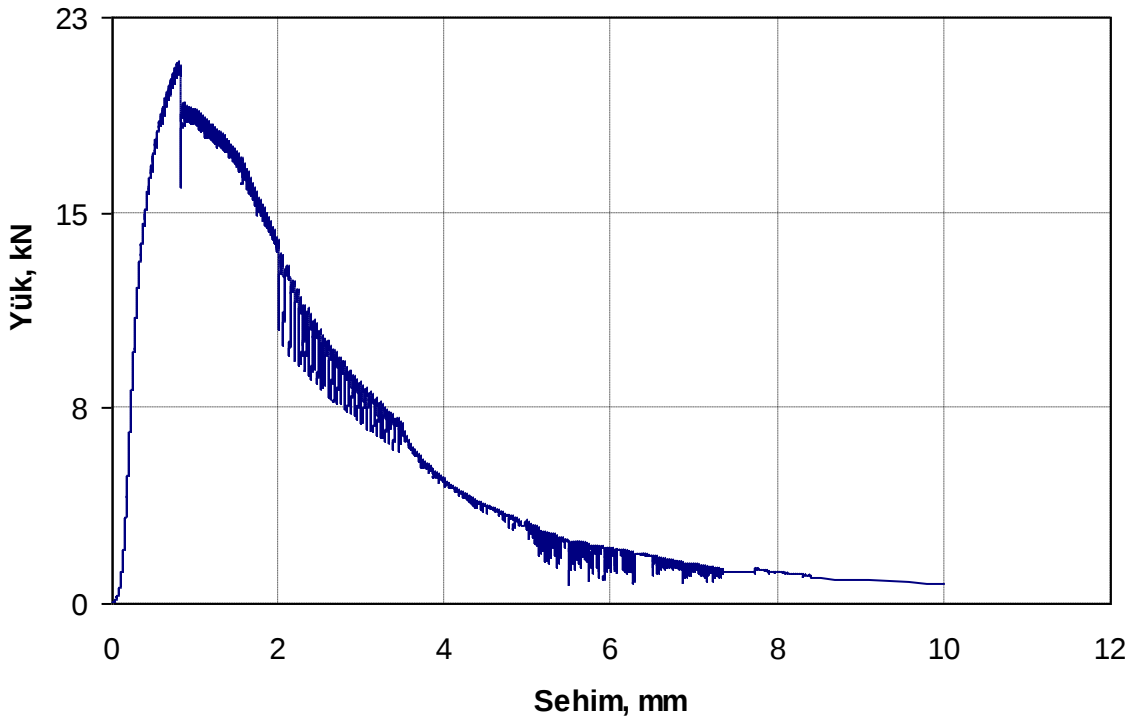
Şekil E.1. K1 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1a Numunesi)



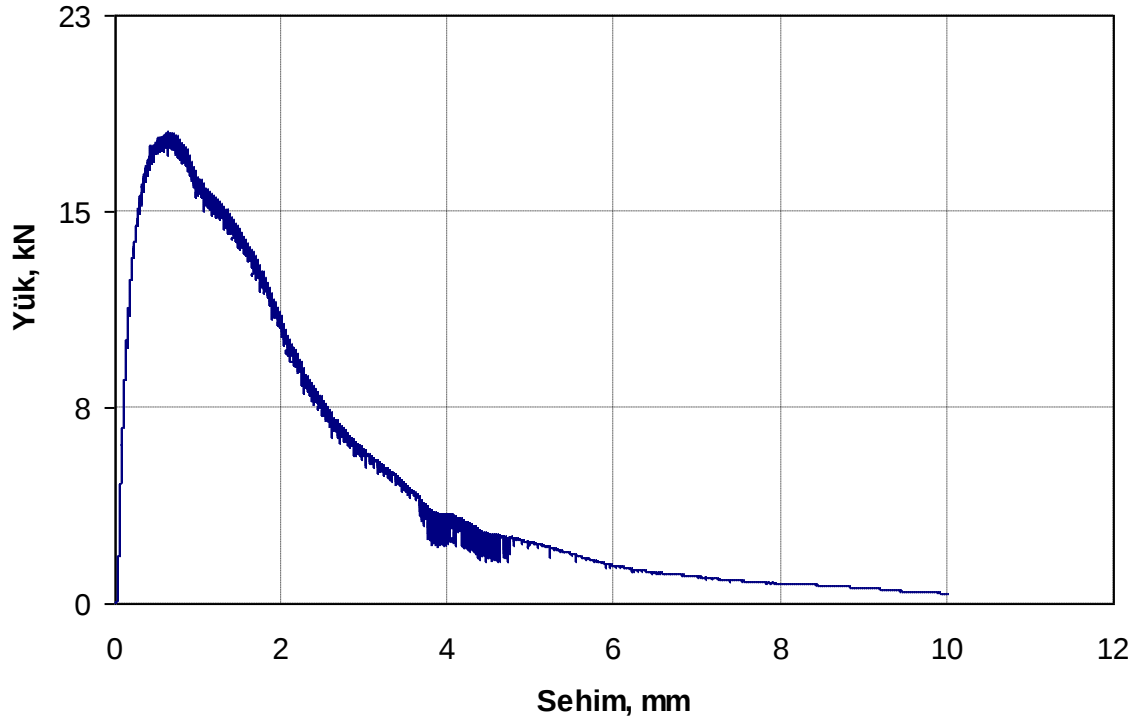
Şekil E.2. K1karışımı Yük-Sehim Diyagramı (1c Numunesi)



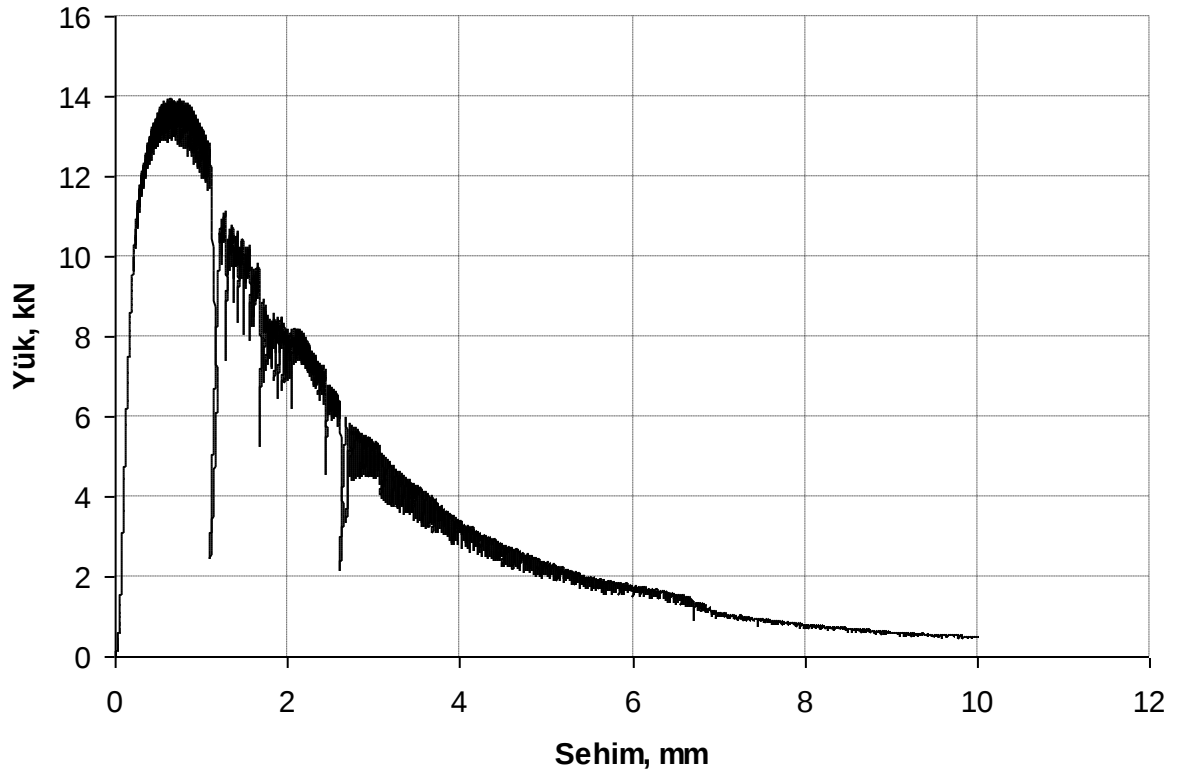
Şekil E.3. K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2a Numunesi)



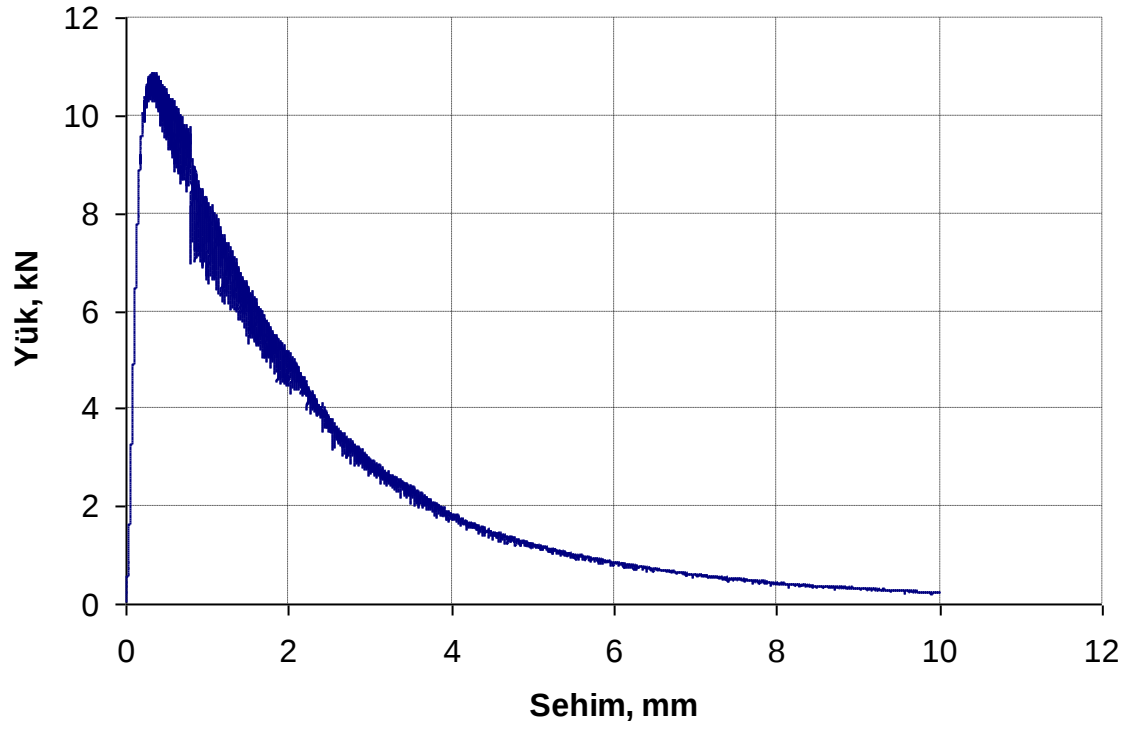
Şekil E.4. K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2b Numunesi)



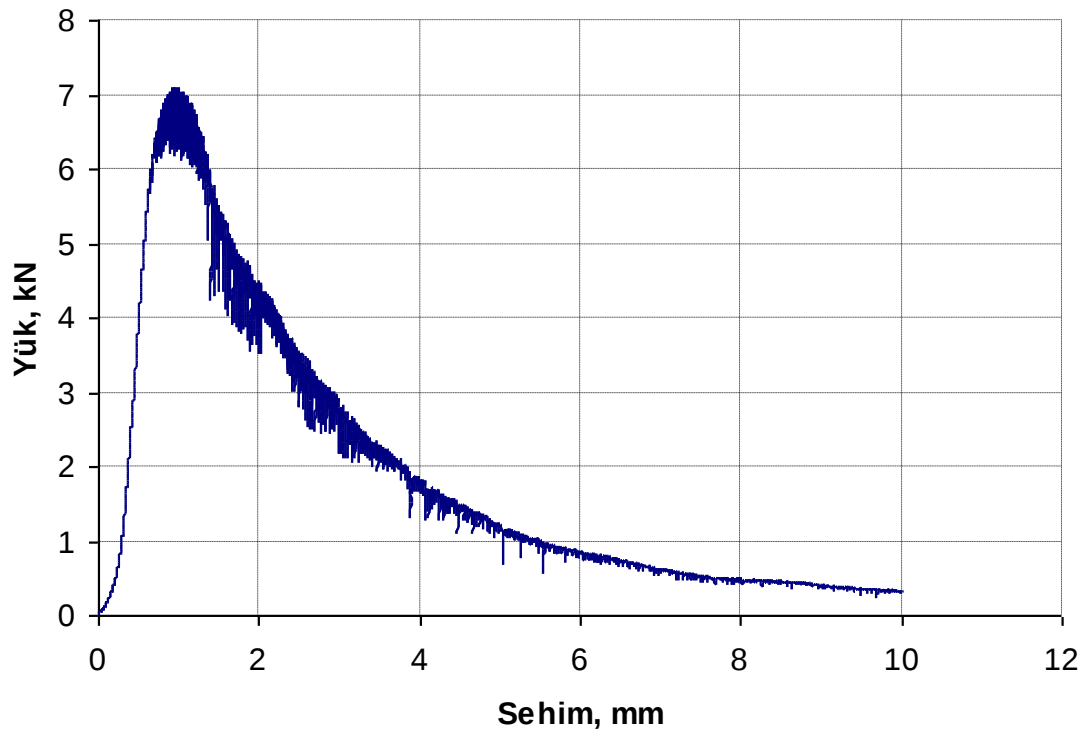
Şekil E.5. K2 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (2c Numunesi)



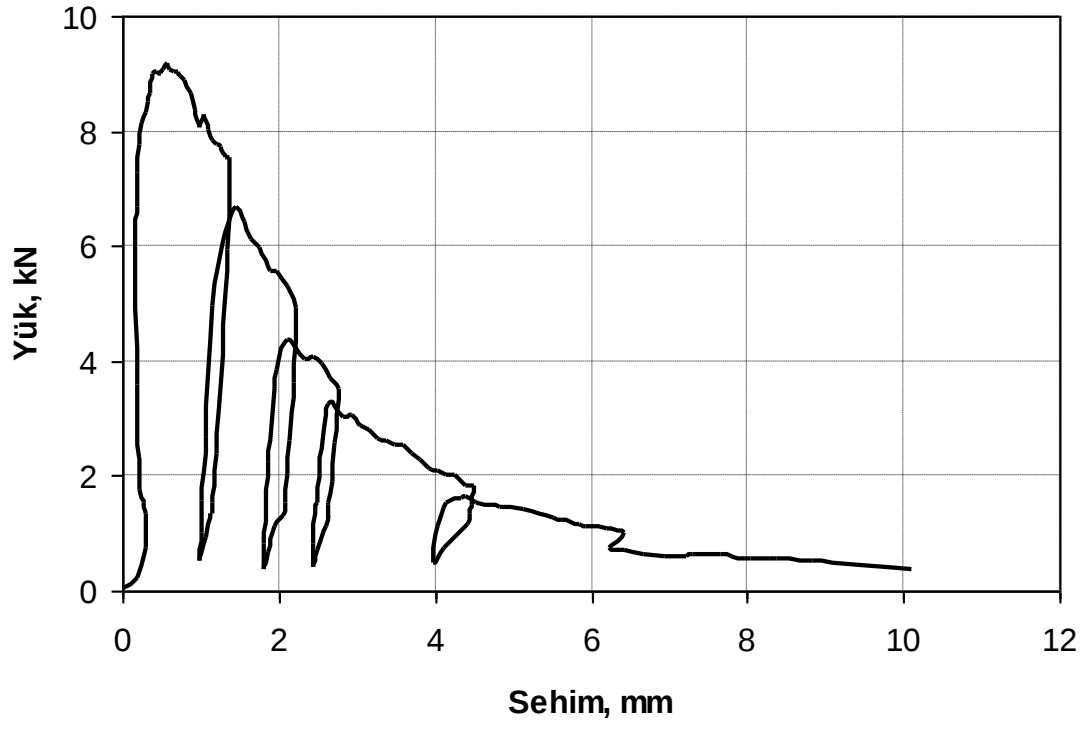
Şekil E.6. K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3a Numunesi)



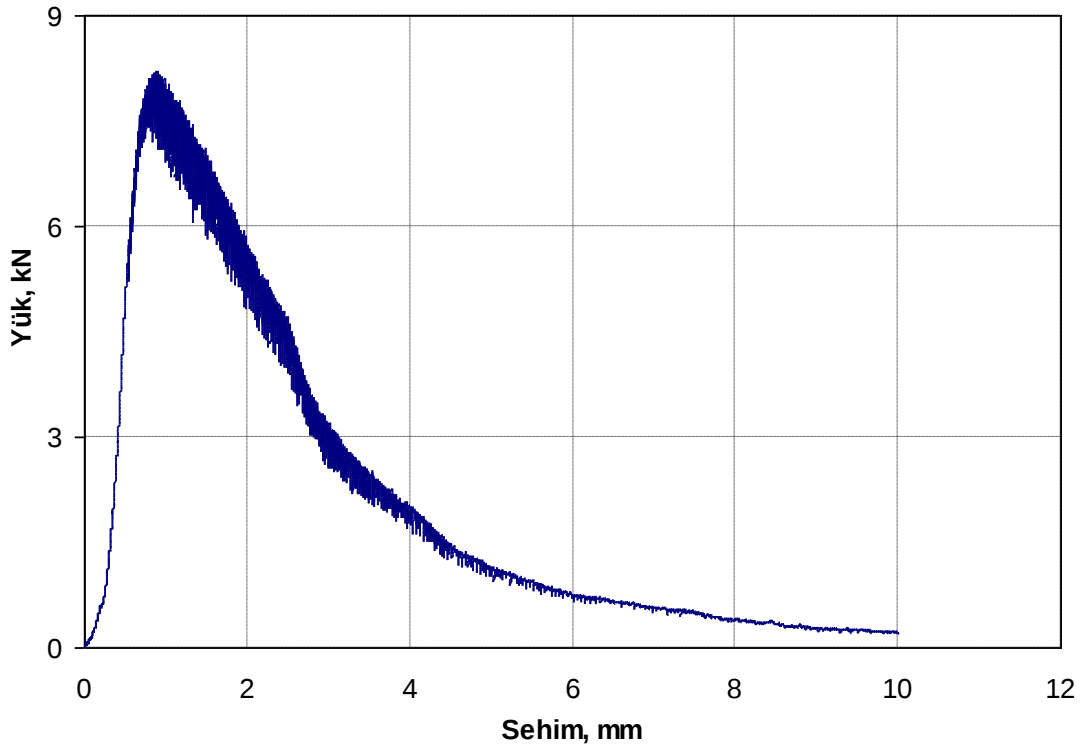
Şekil E.7. K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3b Numunesi)



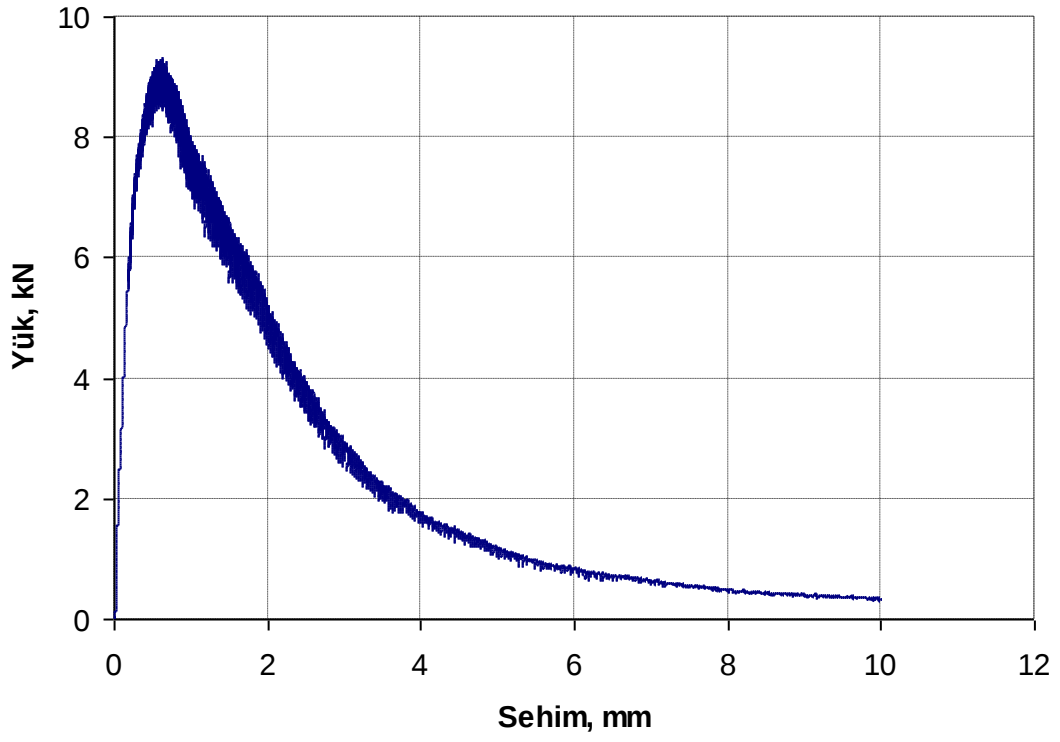
Şekil E.8. K3 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (3c Numunesi)



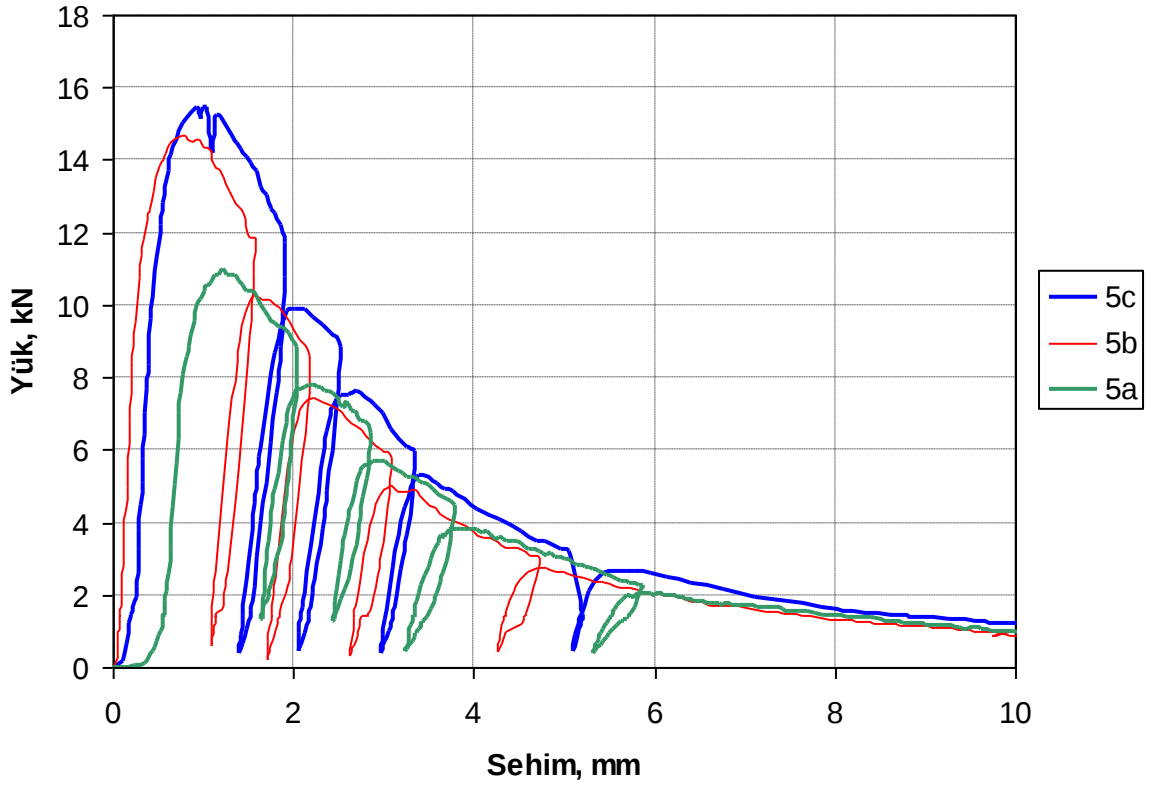
Şekil E.9. K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4a Numunesi)



Şekil E.10. K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4b Numunesi)



Şekil E.11. K4 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (4c Numunesi)



Şekil E.12. K5 karışımı Yük-Sehim Diyagramı (5a,5b,5c Numuneleri)

ÖZGEÇMİŞ

Gözde Güvensoy, 1975 yılında Ankara'da doğdu. 1993 yılında Ayazağa Işık Lisesi'nden mezun oldu ve aynı yıl, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümüne girdi. 1997 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak aynı sene İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans çalışmasına başladı. 2000 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. 1997-2000 yılları arasında UBM Uluslararası Birleşmiş Müşavirler A.Ş. and ESSU Arıtma Tesisleri A.Ş.'de Çevre Mühendisi olarak görev aldı. 2001 yılı bahar döneminde İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2000 yılında inşaat mühendisliği alanında çalışmaya başladığı Seza Mühendislik İnşaat Tic. Ltd. şirketindeki görevine devam etmektedir.