

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**REAKTİF PUDRA BETONUNUN (RPB)
ÖZELLİKLERİNİN MİNERAL KATKILARLA
GELİŞTİRİLMESİ**

Anıl Ş. KARABULUT

Eylül, 2006
İZMİR

REAKTİF PUDRA BETONUNUN (RPB) ÖZELLİKLERİNİN MİNERAL KATKILARLA GELİŞTİRİLMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemesi

Anabilim Dalı

Amr Ş. KARABULUT

Eylül, 2006

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

Anıl Ş. KARABULUT, tarafından Prof. Dr. BÜLENT BARADAN yönetiminde hazırlanan ‘REAKTİF PUDRA BETONUNUN (RPB) ÖZELLİKLERİNİN MİNERAL KATKILARLA GELİŞTİRİLMESİ’ başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....
Prof. Dr. Bülent BARADAN

Yönetici

.....
Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Jüri Üyesi

.....
Doç. Dr. Akın ALTUN

Jüri Üyesi

.....
Prof.Dr. Cahit HELVACI

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince araştırma konularının belirlenmesinde, deney programlarının oluşturulmasında, malzeme teminlerinde yardımcılığı ve bilgilendirici desteklerinden dolayı danışman hocam Prof. Dr. Bülent Baradan'a, literatür araştırması ve yönlendirici bilgilerinden dolayı Dr.İnş.Müh. Halit Yazıcı'ya, deneylerin gerçekleştirilmesi sırasındaki yardımlarından dolayı İnş.Y. Müh. Hüseyin Yiğiter, İnş.Y. Müh. Serdar Aydın, İnş. Y. Müh. Burak Felekoğlu, İnş. Y. Müh. Kamile Tosun ve değerli dostum İnş. Müh. Ahmet Hilmi Aytaç'a ve çalışmada kullanılan malzemelerden mikro silis ve akışkanlaştırıcı katkıyı sağlayan Sn. Okan Duyar ve YKS-Degussa firmasına; öğütülmüş yüksek fırın cürufunu sağlayan Sn.. Selma Cesur ve Karçimsa firmasına; çelik lifleri sağlayan Sn. Mehmet Yerlikaya ve Beksa Çelik Kord San. Ve Tic. firmasına; agrega olarak kullandığımız kuvarsı sağlayan Sn. Ümit Ürün ve Pomza Export firmasına; çimentoyu sağlayan Modern Beton'a ve deneyler sırasında kullanılan özel araçlardan ötürü Tübitak'ın 104 I 085 nolu proje desteğinden dolayı Tübitak'a; tüm çalışmam süresince bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyerek şevkle çalışmamı sağlayan aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Anıl Ş. KARABULUT

Eylül 2006-İzmir

REAKTİF PUDRA BETONUNUN (RPB) ÖZELLİKLERİNİN MİNERAL KATKILARLA GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Basınç dayanımları 200-800 MPa aralığında olan çok yüksek dayanımlı çimento matrisli kompozit malzemeler, reaktif pudra betonu (RPB) adıyla son yıllarda beton teknolojisinde yer almaya başlamışlardır. Söz konusu betonlarda genellikle yüksek oranda silis kullanılarak (SiO_2) sistemdeki CaO/SiO_2 oranı azaltılmakta, agrega maksimum tane çapı düşürülerek daha homojen bir karışım elde edilmekte, uygun bir granülometri ile oldukça sıkı bir içyapı oluşturulmakta, süper akışkanlaştırıcılar kullanılarak su/bağlayıcı oranı oldukça düşük seviyelere çekilmektedir. Ayrıca, yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav) ve yüksek basınç altında sıkıştırılarak kalıplara yerleştirilmesiyle güçlü bir mikroyapı ile dayanımları oldukça yüksek seviyelere çıkartılabilmektedir. Çok yüksek dayanım seviyelerine ulaşan malzemenin aşırı gevrek davranış göstermesi sebebiyle, bu sorunu gidermek için genellikle kısa kesilmiş çelik lifler kullanılmaktadır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, öncelikle RPB karışımları oluşturacak agreganın tipi ve tane dağılımı üzerine ön çalışmalar yapılarak başlanmıştır. Bu çalışmalar devamında kullanılacak kürleri tiplerin, süreleri ve karışımlar için optimum mikro silis oranı belirlenmiştir. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bağlayıcı yerine öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkıları, tek tek ya da kombinasyonlarıyla ikamesi incelenmiştir. Alternatif silis kaynakları ile sistemin silis ihtiyacı karşılanarak mikro silis miktarında azaltmaya gidilmiştir. Sonuçta aynı dayanımı verebilecek ancak bünyesinde bağlayıcı yerine atık mineral katkıların ikame edilmiş ve daha az mikro silis bulunan karışımlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada son olarak mineral katkıları geliştirilen karışımlara priz aşamasında sıkıştırma uygulamanın basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Çalışma sonuçları, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi puzolanik özellikleri nispeten düşük atık mineral katkılarıyla da daha ekonomik RPB üretilebileceğini göstermiştir.

Anahtar sözcükler: RPB, mikro silis, uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, kuvars, çelik lif, kür koşulları

IMPROVEMENT OF THE REACTIVE POWDER CONCRETE PROPERTIES BY INCORPORATION OF THE MINERAL ADDITIVES

ABSTRACT

Ultra high performance concrete, which has a compressive strength value in the range of 200-800 MPa, is called Reactive Powder Concrete (RPC). RPC is generally produced by lowering the CaO/SiO₂ ratio with the incorporation of silica components, by reducing the maximum size of aggregates, improving the compacted density by optimization of the granular skeleton of mixture and using superplasticizer to minimize the water / cement ratio. Application of pressure before and during setting and high pressure steam curing (autoclave curing) are additional methods to increase the strength level. Furthermore, to improve the ductility, generally short steel fibers are introduced into the RPC mixtures.

In this study, initially aggregate types and grading, silica fume content and heat treatment conditions optimized to obtain superior compressive strength. In the second stage The main bindery ingredients were pulverized fly ash (PFA), pulverized granulated blast furnace slag (PS), binary and ternary combinations were replaced with Portland cement (PC) at specified ratios. PFA and PS were alternatives reactive silica sources and determined optimum CaO/SiO₂ ratio which give max compressive strength in autoclaved curing. So some of silica fume can be taken out to the mixtures. And then Class C fly ash and granulated blast furnace slag can also supply silica to the system. And then created new mineral additives mixes which have less SF but same compressive strength value in autoclaved curing. In the third stage, three different curing methods (standard, autoclave curing and steam curing) were applied to the new mineral additives mixes and control mix. Mineral additives test results were presented comparatively with the control mix which has only cement and SF as a binder. In the last stage, application of pressure before and during setting with high pressure steam curing is additional methods to increase the strength level. These results indicate that the reactive powder concrete can also be produced with the incorporation of PFA and PS besides combinations of powerful binders SF and PC.

Keywords: RPC, micro silica, fly ash , blast furnace slag, quartz, short steel fibers, curing conditions

İÇİNDEKİLER

TEZ TESLİM FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR – GİRİŞ 1

BÖLÜM İKİ - REAKTİF PUDRA BETONLARININ GENEL TANITIMI VE ÖZELLİKLERİ 5

2.1 Reaktif Pudra Betonların Genel Tanımı	5
2.2 Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Özellikleri.....	7
2.2.1 Basınç ve çekme dayanımı	7
2.2.2 Eğilme dayanımı.....	8
2.2.3 Kırılma enerjisi	9
2.2.4 Elastisite modülü ve elastisite modülünün belirlenmesinde izlenen yöntemler	11
2.3 Reaktif Pudra Betonun Özelliklerini Etkileyen Faktörler	15
2.3.1 Çimento tipinin etkisi	15
2.3.2 Su içeriği.....	16
2.3.3 Agrega tipi ve en uygun tane dağılımı	18
2.3.4 Mineral katkıların etkisi	27
2.3.4.1 Silis dumanı	28
2.3.4.2 Uçucu kül.....	36
2.3.4.2.1 Uçucu külleri sınıflandırılması	37
2.3.4.2.2 Uçucu küllerin fiziksel özellikleri	38
2.3.4.2.3 Uçucu küllerin kimyasal bileşenleri ve özellikleri:.....	38
2.3.4.3 Yüksek fırın Cürufu.....	38
2.3.5 Süper akışkanlaştırıcıların etkisi	39
2.3.6 Çelik liflerin etkisi.....	41

2.3.7 Priz aşamasında sıkıştırma uygulamasının etkisi	45
2.4 Reaktif Pudra Betonlarının Kullanım Alanları	45

BÖLÜM ÜÇ - BETONUN FARKLI YÖNTEMLER İLE KÜR EDİLMESİ ... 50

3.1 Beton Üretiminde Kürün Genel Tanımı:	50
3.2 Isıl İşlemler İle Yapılan Kürler	52
3.2.1 Betonun kalıba yerleştirilmeden ısıtılması	53
3.2.2 Betonun yerleştirilmesinden sonra ısıtılması	53
3.2.2.1 İç ısıtma	54
3.2.2.2 Dış ısıtma:	55
3.2.2.2.1 Yüksek basınç altında buhar kürü (otoklav) tekniği	55
3.2.2.2.2 Atmosfer basıncı altında buhar kürü tekniği	59
3.2.2.2.2.1 Hızlı (sert) buhar kürü çevrimleri	61
3.2.2.2.2.2 Orta (ılımlı) buhar kürü çevrimleri	61
3.2.2.2.2.3.Yavaş (yumuşak) buhar kürü çevrimleri	61

BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMALAR 66

4.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler	66
4.1.1 Çimento	66
4.1.2 Mineral katkıları	67
4.1.2.1 Mikro silis	67
4.1.2.2 Uçucu kül	68
4.1.2.3 Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	69
4.1.3 Agrega	70
4.1.4 Süper akışkanlaştırıcı katkı	74
4.1.5 Çelik lifler	74
4.1.6 Karışım suyu	75
4.2 Beton Üretimi	75
4.3. Agrega Tipi ve Tane Dağılımının İncelenmesi	80
4.3.1 Kuvars agregası	81
4.3.2 Bazalt agregası	83
4.4 Kür Koşullarının İncelenmesi	85

4.4.1 Yüksek Basıncılı Buhar Kürü (otoklav kürü) Süresinin İncelenmesi	86
4.4.2 Buhar Kürü Süresinin İncelenmesi.....	89
4.5 Mekanik Özelliklerin Gelişimine Karışımdaki Silis Dumanı içeriğinin Etkisi.....	93
4.6 Mekanik Özelliklerin Gelişimine Puzolanik Bağlayıcı İkamesinin etkisi	96
4.6.1 Puzolanik bağlayıcıların ayrı ayrı ikamesi	97
4.6.2 Puzolanik bağlayıcıların birlikte ikamesi	100
4.7 YFC Ve/Veya UK İkamesinde Mikro Silisin Azaltılmasının Mekanik Özelliklere Etkisi	104
4.8 Mineral Katkılarla Geliştirilen Reaktif Pudra Betonlarının Farklı Kürler Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi.....	111
4.8.1 Eğilme dayanımlarının ve tokluk değerlerinin belirlenmesi	112
4.8.2 Eğilme sonrası basınç dayanımlarının belirlenmesi	135
4.9 Mineral Katkılarla Geliştirilen Reaktif Pudra Betonların Elastisite modüllerinin karşılaştırılması:	141
4.10 Mineral Katkılarla Mekanik Özellikleri Geliştirilen RPB'lere Priz Aşamasında Sıkıştırma Uygulanması	147
BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	153
KAYNAKLAR	157

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

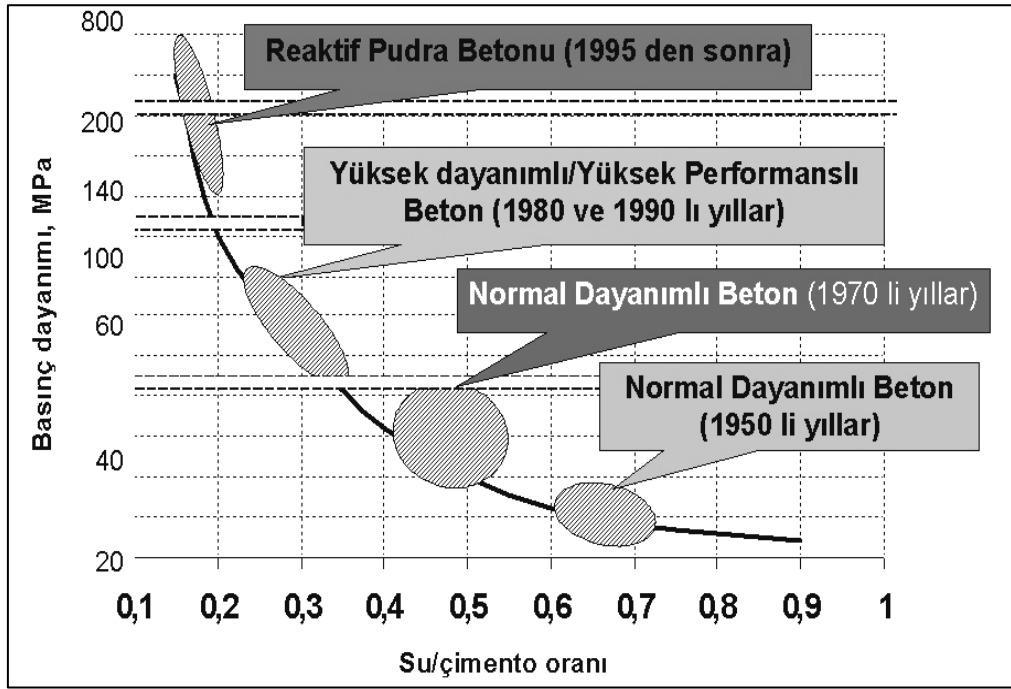
Günümüzde beton teknolojisindeki gelişmeler büyük ölçüde hızlanmıştır. Gerek malzemedeki nano teknoloji ürünler, gerekse yapım teknolojisindeki gelişmeler sayesinde betonun yapı malzemesi olarak yerini gitgide güçlendirmekte ve ileri bir teknoloji ürünü haline getirmektedir.

Beton teknolojisindeki hızlı gelişmelere paralel olarak, yüksek dayanımlı betonların tanımı da zamanla değişime uğramaktadır. 1950'lerde 35 MPa yüksek dayanım olarak kabul edilirken, 1960'larda bu rakam 40–50 MPa'ya 1970'lerde ise 60 MPa'ya yükselmiştir.

Şekil 1.1'den de görüleceği üzere ihtiyaçlar doğrultusunda yıllar geçtikçe betondan istenen dayanım ve dayanıklılık değerleri süratle artmıştır. Reaktif Pudra Betonları (RPB), basınç dayanımları 20 -60 MPa olan geleneksel betonlar sonrasında 60–115 MPa olan yüksek dayanımlı betonlar ve sonrasında 200 MPa aşan değerleri ile beton sınıflandırmasında yeni bir yeri oluşturmaktadır (Taşdemir, 2005).

Reaktif pudra betonlarının basınç dayanımının yüksek olmasının yanında eğilme ve tokluk değerleri de yüksek dayanımlı betonların üzerindedir. Bu malzemelerin genel performansları da yüksektir. Bugüne kadar yapılan araştırmaların ışığında, RPB'lerin normal dayanımlı betonlara göre; boşluk oranlarının, porozitelerinin ve geçirimsizliklerinin düşük olduğu durabilite özelliklerinin de yüksek olduğu bilinmektedir.

Basınç dayanımları yanında çekme, eğilme ve tokluk değerlerinin yüksek olması aynı yük altında daha küçük kesitlerle yapı dizaynına imkân verdiği gibi, deprem sonrası yapıların iyileştirmelerinde, güçlendirmelerinde RPB yakın gelecekte kullanım alanı bulacak bir malzemedir.



Şekil 1.1 Betonun gelişim sürecinde basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi

Reaktif pudra betonlarında yüksek mekanik dayanımların sağlanmasında üretim aşamasında; akışkanlaştırıcı katkılar, çelik lifler ve mineral katkıları gibi ek malzemeler ihtiyaç duyması sebebiyle, üretiminde titiz kalite kontrolü gerekmektedir. Bu yüzden yerinde imalattan ziyade, prefabrik tesislerde, laboratuvar ortamında kontrollü üretimi sağlanabilecek bir malzemedir.

Reaktif Pudra Betonu (RPB) üstün dayanımı, çok yüksek sünekliği gibi gelişmiş mekanik özelliklere sahip çimento esaslı bir kompozit malzemedir. Bu malzeme ilk olarak 1990'larda Fransa'da Bougues Laboratuvarında geliştirilmiştir. Reaktif Pudra Betonun üretiminde ana ilkeler şu şekildedir:

- İri agreganın elimine edilerek homojenliğin artırılması,
- Tane yapısının optimize edilmesi ve kalıba yerleştirme sırasında iyi bir sıkıştırma uygulanması
- Priz sonrasında ısı işlemi uygulayarak mikroyapının güçlendirilmesi,
- Karışımda kısa çelik lifler kullanılarak düktilitenin artırılması,
- Silis dumanı gibi güçlü puzolanik özelliklere sahip mineral katkıların kullanılmasıdır.

Bu çalışmada atık mineral katkıların (uçucu kül, öğütölmüş yüksek fırın cürufu) reaktif pudra betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada izlenen yol Şekil 1.2'de verilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında agrega tipi ve tane dağılımının basınç dayanımına etkisi otoklav kürü altında incelenmiştir. Bu çalışmanın devamında uygulanacak buhar kürü ve yüksek basınçlı buhar kürü (otoklav kürü) gibi hızlandırılmış kür yöntemlerini en uygun uygulama süreleri incelenmiştir.

Yüksek oranda puzolanik özelliği olan silis dumanının, (mikro silika, MS) karışımındaki kullanım oranlarının basınç dayanımına etkisi otoklav kürü altında incelenmiş ve en yüksek basınç dayanımını değerini veren en uygun mikro silika yüzdesi belirlenmiştir.

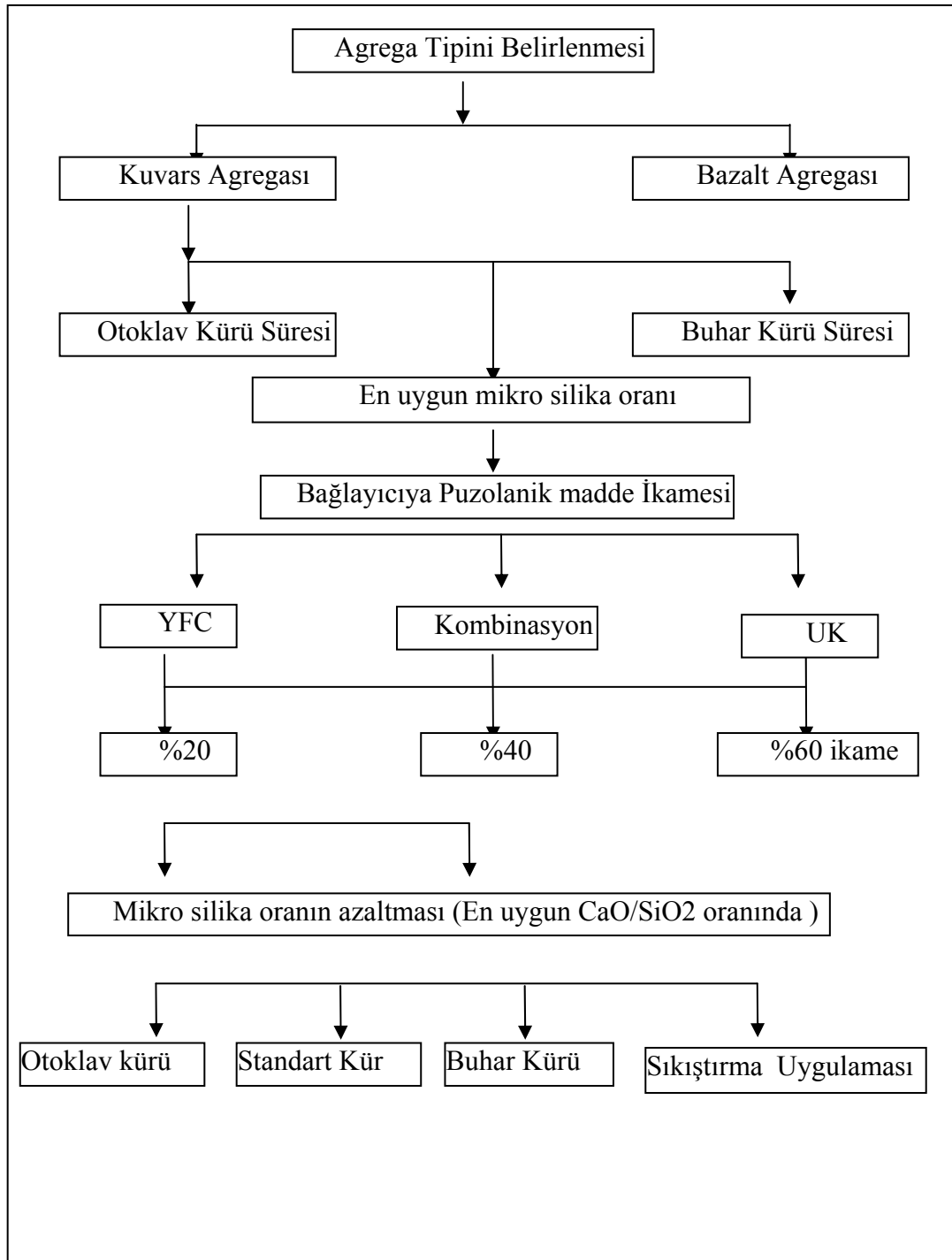
En uygun silis dumanı içeriğinin belirlenmesinden sonra, yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi atık mineral katkıların ayrı ayrı ve kombinasyonları çimento yerine ikame edilerek, reaktif pudra betonunun basınç dayanımına ve davranışına etkisi incelenmiştir.

Bağlayıcı yerine ikame edilen mineral katkıları ile sisteme sağlanan alternatif silis kaynaklarıyla (YFC ve UK), en yüksek basınç değerini verecek olan CaO/SiO₂ oranı sağlanacak şekilde, üretim malzemelerinden maliyeti en yüksek olan mikro silika karışımdan çekilerek mineral katkıları yeni RPB karışımları hazırlanmıştır.

Çeşitli ikame yüzdelerinde uygun bulunan mineral katkıları karışımları seçilerek değişik kür koşullarının (standart kür, buhar kürü, yüksek basınçlı buhar kürü) mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Çalışmada son olarak mineral katkıları geliştirilen karışımlara priz aşamasında sıkıştırma uygulamanın basınç dayanımına etkisi incelenmiştir.

Çalışma sonuçları mineral katkı kullanımı ile reaktif pudra betonunda çimento ve silis dumanı miktarlarının azaltılabileceği, priz aşamasında uygulanan basınçlı sıkıştırma uygulayarak, daha yüksek dayanımlarda daha az süper akışkanlaştırıcı katkı maddesiyle uygun karışımları elde edilebileceği göstermiştir.



Şekil 1.2 Çalışmadaki araştırmaların akış şeması

BÖLÜM İKİ

REAKTİF PUDRA BETONLARININ

GENEL TANITIMI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Reaktif Pudra Betonlarının Genel Tanımı:

Son yıllarda hem dünyada hem de ülkemizde yüksek mukavemetli betonlara ihtiyaç giderek artmaktadır. Artan ihtiyaçlar doğrultusunda, yıllar geçtikçe betondan beklenen dayanım ve dayanıklılık isteği artmaktadır. TS500, C50'ye (28 günlük silindir basınç dayanımı 50 MPa) varan beton dayanımı öngörmekle birlikte TS EN 206-1, C100'e kadar beton sınıfını hedeflemektedir. Buna karşın, Eurocode 2'de normal beton sınıfları C80 ve altıdır. Avrupa'da Almanya'nın öncülüğünde C60-C100 arasındaki beton sınıfları için yeni tasarım ilkeleri ve hesap yöntemleri geliştirilmektedir.

Günümüzdeki büyük gelişmelerin sonucu olarak hem üretim teknolojisi hem de deneysel tekniklerdeki gelişmeler betonun dayanımına da yansımıştır. Özellikle betonun içyapısı ve mekanik davranışlarının birlikte incelenmesi ve değerlendirilmesi araştırmalara yeni boyutlar kazandırmıştır. Yeni gelişmelerin ışığında beton davranışının daha iyi anlaşılacağı, içinde bulunduğumuz 21. yüzyılda mühendislik yapılarının projelendirilmesinde daha gerçekçi ilkelerin ve daha gelişmiş yöntemlerin kullanılması beklenmektedir. Bu yüzden betonun daha etkin bir biçimde yerinde kullanılması oldukça önemlidir. Yüksek dayanımlı betonların; reaktörler, açık deniz yapıları, savunma amaçlı depolama binaları gibi uzun servis ömrü istenen yapılarda kullanması artan bir ilginin oluşmasına neden olmaktadır (Malhotra, 1992; Taşdemir 1995).

RPB ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliliğe ve çok düşük geçirimsizliğe sahip ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerdir (Walraven, 1999; Matte ve Moranville, 1999). Bu malzemeler ilk kez 1990'lı yılların başlarında Paris'te Bouygues Laboratuvarındaki araştırmacılar

tarafından geliştirilmiştir. Reaktif pudra betonları ile ilgili ilk çalışmalar Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır. Bu çalışmalarda betonların tasarımı yapılmış ve üretimi ile mekanik özellikleri açıklanmıştır. Yapılan çalışmalarda RPC 200 ve RPC 800 olmak üzere esasta aynı fakat üretiminde ve ısıl işlemlerinde bazı farklılıklar bulunan iki değişik malzeme üretilmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Reaktif pudra betonu üretmenin amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelikle yarışacak bir potansiyele sahiptir.
- 2) Üstün basınç dayanımı, yüksek kesme dayanımı kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve çok sayıda narin prefabrik üretimine olanak verir.
- 3) Daha hafif elemanlarla, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehim ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak depreme dayanıklılıkta gelişim sağlar.
- 4) Düşük ve birbirine bağlı olmayan kılcal boşlukları, porozite yapısını önemli oranda geliştirir. Bu da durabilitesi yüksek bir malzeme özelliği olduğunu göstermektedir.
- 5) Düktil çekme kırılması mekanizması ile RPB doğrudan ana çekme gerilmeleri dışındaki çekme gerilmelerine karşı yeterli dayanıklılıktadır. Bu durum ilave kesme donatısını ve diğer ek donatı ihtiyacını ortadan kaldırır.
- 6) Yüksek kırılma enerjisi, daha tok ve daha fazla oranda enerji yutabilen yapısal elemanların üretilmesine olanak sağlar.

Reaktif pudra betonlarının içyapısı daha sıkı tane düzenine sahip olup, mikroyapısı yüksek performanslı betonlara kıyasla en kuvvetli çimentolu hidrate ürünlerin varlığı ile güçlendirilmektedir (Walraven, 1999; Richard ve Cheyrezy, 1995).

Bu dikkate değer özelliklere aşağıdaki aşamalarla erişilmektedir:

- 1) Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas bir biçimde ayarlanması,
- 2) Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- 3) Betondaki su miktarının azaltılması,

- 4) Yüksek inceliğe sahip silis dumanın puzolanik özelliklerinin yoğun bir biçimde kullanılması,
- 5) Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
- 6) Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- 7) Çok yüksek dayanımlara erişmek için basınç altında ve yükseltilmiş sıcaklık koşullarında kür edilmesi (Walraven, 1999; Richard ve Cheyrezy, 1995).

Gelişen teknolojik imkânlarla gerek malzeme, gerekse deneysel imkânların artması bu tip betonları ileri teknolojinin bir ürünü haline getirmiştir. Servis ömrü uzun, özel yapılarda gerekli dayanımı ve dayanıklılığı en ekonomik şekilde elde etmek detaylı bir araştırmayı ve titiz bir üretimi gerektirmektedir. Bu çalışmalar sonucunda ortaya çıkan bu özel betonlar ile ilgili literatürdeki araştırmalar aşağıda bölümler halinde özetlenmiştir.

2.2 Reaktif Pudra Betonlarının Mekanik Özellikleri

2.2.1 Basınç ve Çekme Dayanımı

Son yıllarda beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa mertebesindeydi (Alexander, 1993). RPB'lar da ise, küp basınç dayanımları 200 – 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 – 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m² ve birim ağırlıkları 2500–3000 kg/m³ (Richard ve Cheyrezy, 1995) civarındadır. Yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, RPB şu anda gerçekten oldukça üstün özellikli bir malzeme olarak kabul edilebilir (Walraven, 1999).

RPB'lar dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla 300 kat daha fazladır (Bonneau, 1997; Richard ve Cheyrezy, 1995; Dugat. 1996). Düşük porozite değerleri bu betonlara önemli durabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırır. Bunlar çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı özel yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme

niteliği sağlar (Feylessoufi 1996; Matte ve Moranville, 1999).

RPB'nun mekanik özellikleri Pierre Richard ve Marcel Cheyrezy tarafından hazırlanan 'Composition of Reaktive Powder Concretes' çalışmasında RPC200 ve RPC800 olmak üzere mekanik özellikleri Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de şu şekilde özetlenmiştir.

Tablo 2.1 RPB 200've RPB800'ün üretim ve mekanik özellikleri

	RPB 200	RPB 800
Priz sırasında sıkıştırma	Yok	50 MPa
Isıl işlem	90 °C	250–400 °C
Basınç dayanımı (kuvars agregalı)	170–230 MPa	490–680 MPa
Basınç dayanımı (çelik tozu agregalı)	-	650–810 MPa
Eğilme dayanımı	30–60 MPa	45–141 MPa
Kırılma enerjisi	20000–40000 J/m ²	1200–20000 J/m ²
Young modülü	50–60 GPa	65–75 GPa

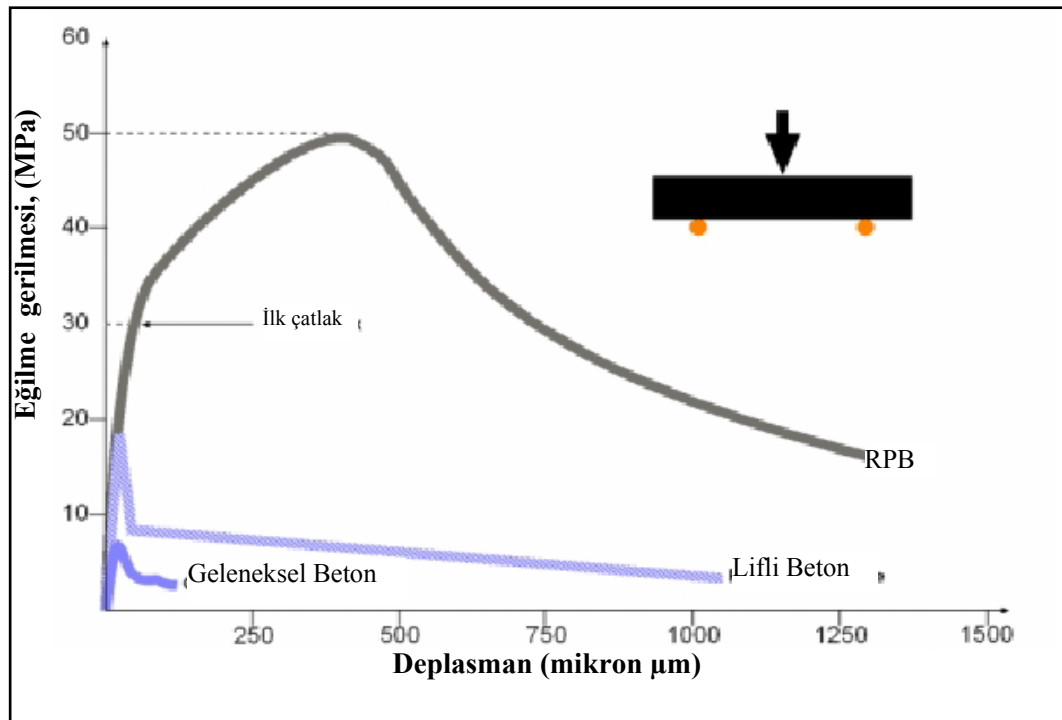
Tablo. 2.2 Normal dayanımlı beton (NDB), Yüksek dayanımlı beton (YDB) ve Reaktif Pudra Betonuna (RPB) ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması (Tasdemir, 2000)

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	1200-40000

2.2.2 Eğilme Dayanımı

Bu şekilde ulaşılan mekanik özelliklerden basınç dayanımı 200–800 MPa, kırılma enerjisi 1200-40000 J/m² arasında değerler alırken, nihai çekme birim deformasyonu %1 mertebelerine kadar çıkartılabilir (Feylessoufi, 2001). Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, ince liflerinde kullanımı ile 50 MPa kadar olağanüstü eğilme dayanımları elde

edilebilir. Yüksek oranda enerji yutabilmesi ile düktilite açısından metallere yakın değerler göstermektedir (Cheyrezy, 1998).



Şekil 2.1 RPB'nin Eğilme Davranışı (Cheyrezy, 1998)

Reaktif Pudra Betonunda en büyük yük ilk çatlak yükünü en belirgin biçimde aşmakta olup, ilk çatlak yükü ile tepe yükü arasında şekil değiştirme sertleşmesi sergilemektedir. Bu da yüksek performansın tipik özelliğidir.

Şekil 2.1'de geleneksel beton ve RPB 200'ün (Basınç dayanımı 200MPa) basit kiriş halindeki mekanik davranışını göstermektedir. Reaktif pudra betonunun büyük bir şekil değiştirme sertleşmesi sergilediği görülmektedir. Eğilme dayanımı ilk çatlamaadaki gerilmenin yaklaşık iki katı kadar yüksektir. Maksimum gerilmedeki deplasman ilk çatlaktaki deplasmandan yaklaşık 10 kat daha büyüktür (Richard ve Cheyrezy, 1995).

2.2.3 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi, "gerilme-açıklığın ortasındaki sehim" eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasına dayanmaktadır. Kırılma enerjisi RPB için 1250 µm'ye kadar sehimde

30000 J/m² dir. Bu değer normal harç için ise toplam 110 J/m²'dir. Böylece, reaktif pudra betonunun kırılma enerjisinin normal harcınının yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir (Taşdemir vd. 2005).

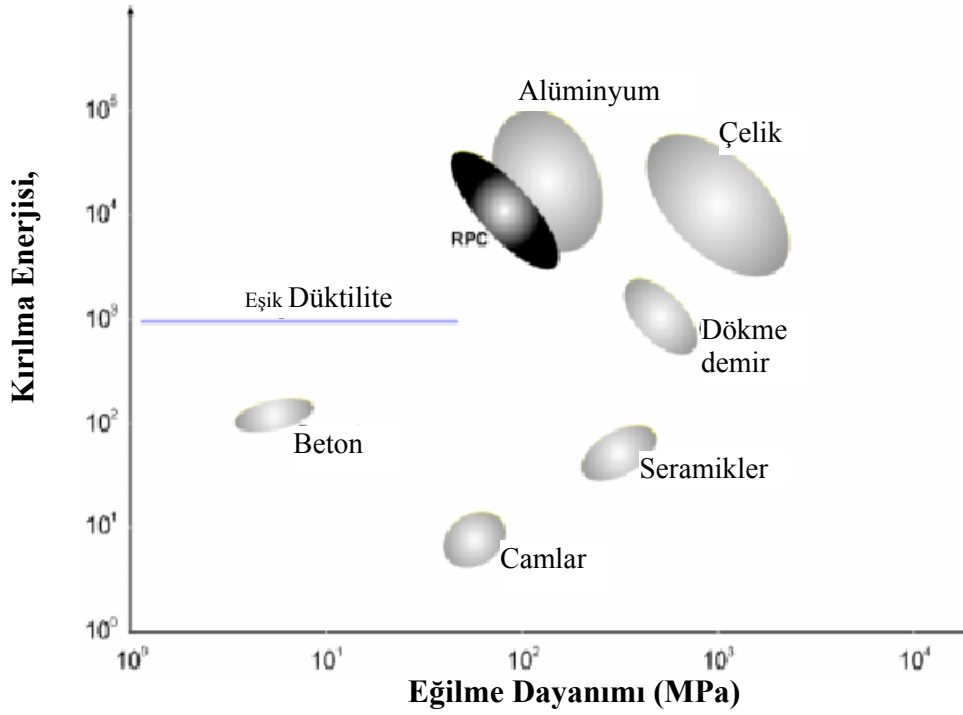
RPB mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini Dallaire (1998), Down (1996), Gilliland (1996) ve O'Neil (1997) yaptıkları alışma, Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3'te Reaktif pudra betonu (RPB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve normal dayanımlı beton (NB) ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada üç tipteki betonların su/bağlayıcı oranları belirlenmiş, basınç, eğilme dayanımları, düktiliteler ve enerji yutabilme gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Çalışmada durabiliteye yönelik bu üç tip betonun mikro porozite oranları, geçirimsizlikleri, aşınma dirençleri, gaz ve sıvı emme oranları donma özölme, gibi durabilite özellikleri üzerinde durulmuştur.

Tablo 2.3 RPB'nun mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri

Özellikler	RPB	YDB	NB
Su / bağlayıcı oranı	0,15	< 0,25	>0,23
Basınç dayanımı (MPa)	200–800	60–100	30–40
Eğilme dayanımı (MPa)	30–60	6–10	0
Düktilite	250 kat > YDB	-	-
Enerji yutma kapasitesi	Metaller ile karşılaştırılabilir	-	-
Permabilite	50 kez < YDB		
Aşınma dayanımı	2–3 kez > YDB		
Donma özölme (tekrarı)	Zarar görmedi	150	50
Young modülü (GPa)	50–60	35–40	20-30
Su emme (kg/m ²)	0–0,05	0,25	2-4



Şekil 2.2. Farklı Malzemelerin Kırılma Enerjisi Eğilme dayanımı Grafiği

Şekil 2.2’de metalik ve metalik olmayan malzemelerin kırılma enerjileri ve eğilme dayanımları verilmektedir. Bu diyagramla ilgili olarak Shaheen tezinde şu şekilde açıklama yapmıştır. Metalik özellik göstermeyen ancak yüksek kırılma enerjisine sahip materyaller üç ana grupta toplanmıştır. Seramikler, plastikler ve betonlar (yüksek dayanımlı betonlar). Bununla birlikte plastiklerin sünme davranışlarının olması, seramiklerin maliyetli bir malzeme oluşu sebebiyle betonlar bu konuda düşük maliyeti ve yüksek dayanımı ile yüksek kırılma enerjisine en iyi aday olarak görülmektedir (Shaheen, 2004).

2.2.4 Elastisite Modülü ve Elastisite Modülünü Belirlenmesinde İzlenen Yöntemler

RPB’nun elastisite modülü ile ilgili araştırma, Pierre Richard ve Marcel Cheyrezy tarafından hazırlanan ‘Composition of Reaktif Powder Concretes’ çalışmasında Tablo 2.1 verilmiştir. Tablo 2.1’de RPB200 için elastisite modülü 50-60 GPa iken RPB 800 için 60-75 GPa olarak belirtilmiştir. Elastisite modülü ve belirlenmesinde izlenen ilkeler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

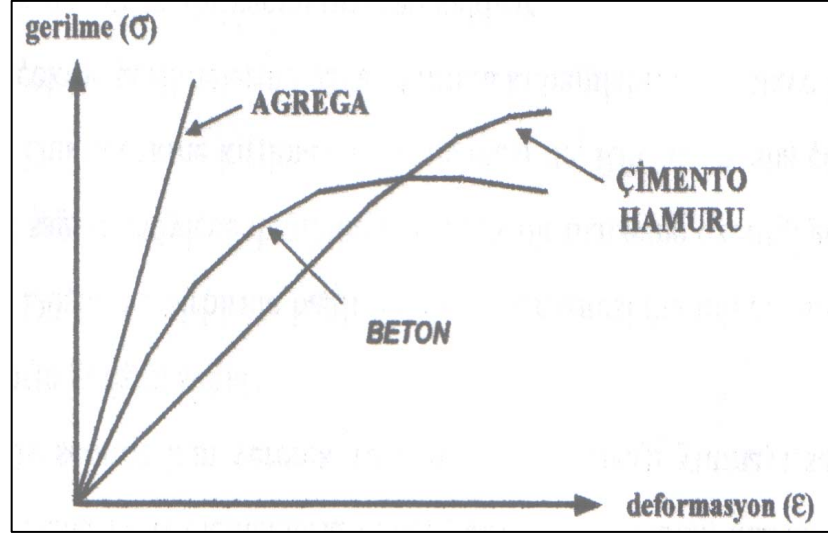
Betonu oluşturan agregâ ve çimento hamurunun elastisite modülleri oldukça farklıdır. Betona uygulanan gerilmeye bu iki malzemenin farklı şekilde tepki vermesi, betonu yüksek gerilme mertebelerinde elastik olmayan bir davranışa itmektedir (Ramyar, 2004). Bu durum, betonun kompozit bir malzeme olmasının yanı sıra çimento hamuru ve agregâ arasındaki bağa da bağlıdır.

Basınç dayanımının %25-40'ından daha yüksek gerilmelerde beton elastik özelliğini kaybeder. Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi çok büyük gerilme seviyeleri göz önüne alınmadığı durumda betonu oluşturan bu iki temel malzemenin de (agrega ve çimento hamuru) gerilme-deformasyon diyagramlarının doğrusal olduğu söylenebilir (Mindess ve Young, 1991).

Araştırmalar, çimento hamuru ile agregâ arasında aderanstaki düşüşün betonun elastik davranıştan uzaklaşmasına neden olduğunu göstermiştir. Öte yandan yüksek dayanımlı betonlar, elastik davranışa daha yakın davranış göstermektedir. Ayrıca agregâ sertliğinin, çimento hamurunun sertliğine yakın olduğu durumda betonun elastik davranışa yaklaştığı bilinmektedir (Mindess ve Young, 1991).

Elastisite modülü, basınç dayanımıyla doğrudan ilişkilidir. Basınç dayanımını etkileyen faktörlerin elastisite modülünü de benzer şekilde etkileyeceğini söylemek büyük oranda doğru bir yaklaşımdır. Su/Çimento oranı, iri agregâ tip ve miktarı, betonun nem içeriği, ortam sıcaklığı ve deney sırasındaki yükleme hızı elastisite modülünü etkileyen faktörlerdir (Mindess ve Young, 1991).

Doğrusal ve elastik olmayan bir davranış gösteren betonun elastisite modülünü tanımlamak kolay değildir. Elastisite modülü, σ - ϵ eğrisinin eğimine eşit olduğuna göre gerilme mertebesine göre değişecektir. Literatürde betonun elastisite modülü ile ilgili çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Bunlardan bilinen üç tanesi aşağıda açıklanmıştır:



Şekil 2.3 Beton, agrega ve çimentonun tipik gerilme- deformasyon eğrileri

Başlangıç elastisite modülü, σ - ϵ eğrisinin başlangıç noktasına çizilen teğetin eğimi olarak tanımlanabilir. İlk yükleme anındaki betonun tepkisi, ölçüm komparatöründe ani deformasyon artımlarına sebep olacağından, bu değeri dikkate almak doğru sonuçlara götürmeyebilir. Ancak beton çok düşük gerilmeler altında ise başlangıç modülü adı verilen E_t ile gösterilen bu değer uygun sonuçlar verebilir.

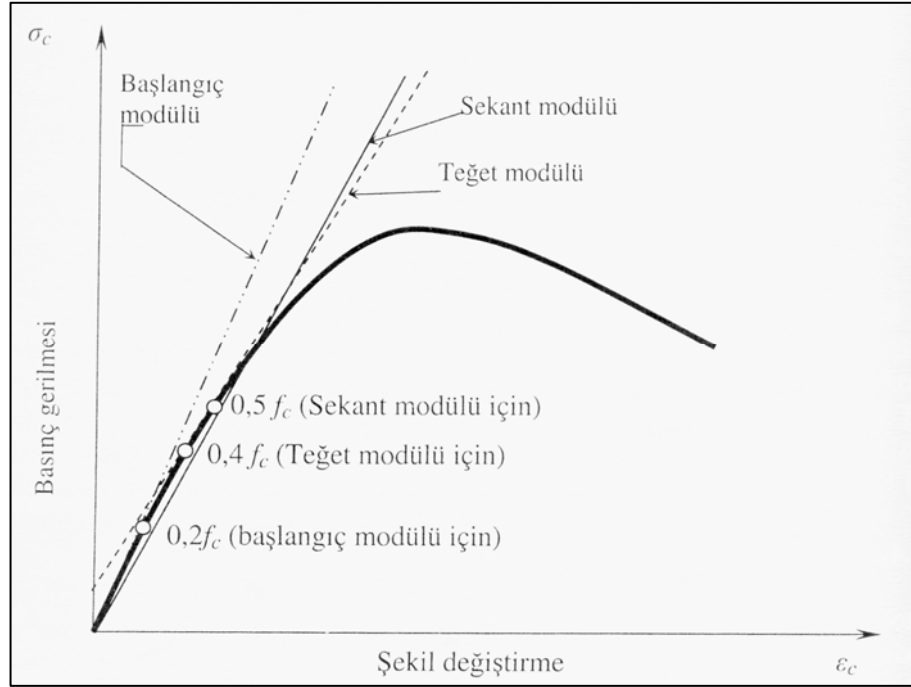
Teğet modülü σ - ϵ eğrisinin herhangi bir noktasından çizilen teğetin eğimidir. Uygulamada bu teğet yaklaşık olarak $0,4 f_c$ gerilmesine karşıt gelen nokta esas alınarak çizilir.

Sekant modülü orijinden σ - ϵ eğrisindeki herhangi bir noktasını koordinat merkezine birleştiren doğrunun eğimidir

Üçüncü elastisite modulu E_d ile gösterilen dinamik elastisite modülüdür. σ - ϵ eğrisinin şekli gerilme hızına bağlı olduğundan, yükleme hızına bağlı olarak E_t değişir. Hız artıkça E_t büyük değerler alır. Yalnız E_t nin bu şekilde artışının bir sınırı vardır. Gerilmenin artım hızı belirli bir değerin üzerine çıktığı zaman, elde edilecek σ - ϵ eğrileri hep başlangıçtaki doğruya teğet olacaktır. Bu karakteristik, bir başka deyişle E_t nin alabileceği en fazla değerdir. Genel olarak 2-4 dakika süren, bir basınç

deneyinden elde edilen. σ - ϵ eğrisinin başlangıç teğetinin eğimi E_d dinamik elastisite modülü olarak kabul edilebilir (Baradan, 2000).

Bu modül gerilmenin büyüklüğüne ve gerilme artım hızına bağlı olmadığından, diğer elastisite modüllerine kıyasla daha güvenilirdir.



Şekil 2.4 Beton için tanımlanan elastisite modülleri

Başlangıç teğet modülü ve sekant modülü basınç deneyinde her zaman kolayca bulunmaz. Genellikle yüklemenin ilk aşamasında gerilme deformasyon eğrisinin başlangıcında konkavlığa neden olan bir deformasyon davranışı görülür. Böyle bir durumda kiriş modülü kullanılır. Elastisite modülü için daha güvenilir sonuç veren kiriş modülü yaklaşımında elastisite modülü, eğri üzerinden seçilen iki noktadan geçen doğrunun eğimi olarak kabul edilir (Ramyar, 2004).

Birçok standartta betonun elastisite modülünün saptanması için kiriş metodu önerilmektedir. Bu amaçla 150 x 300 mm silindir örnekler üzerinde $2,5 \pm 0,3 \text{ kg/cm}^2$ /sn sabit yükleme hızında basınç deneyi uygulanır. Deformasyonlar strengçeyle ölçülür. Bu deneyden önce sünme etkisinin yok edilmesi ve strengçelerin oturmasını

sağlamak amacıyla en az iki (genelde üç)kez maksimum gerilme değerine kadar (dayanımın %40'ı) ön yükleme yapılması gereklidir. (Ramyar, 2004)

Birçok yönetmelikte elastisite modülü ile ilgili formülasyonlar bulunmaktadır. Formül 3.1, 3.2, 3.3, 3.4'de belirtilen bu formülasyonlarda formüllerin metrik veriler içinde değerleri verilmiştir.

TS 500 göre normal betonlar için j günlük betonun elastisite modülü

$$E_{cj} = 3250\sqrt{f_{ckj}} + 14000(MPa) \quad \text{metrik} \quad 10270\sqrt{f_{ckj}} + 140000 \quad (3.1)$$

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI318-95)

$$E_{cj} = w^{1.5} 1362\sqrt{f_{ckj}} (MPa) \quad (3.2)$$

Normal betonlar için $w=23 \text{ kN/m}^3$

$$E_{cj} = 4750\sqrt{f_{ckj}} (Metrik, \quad 151000\sqrt{f_{cj}}) \quad (3.3)$$

Avrupa beton komitesi (CEB-78)

$$E_{cj} = 9500(f_{ckj} + 8)^{1/3} (Metrik \quad 44150(f_{ckj} + 80)^{1/3}) \quad (3.4)$$

f_{ckj} = j günlük betonun silindir basınç dayanımı(MPa; metrik, kgf/cm^2)

E_{cj} = j günlük betonun elastisite modülü (MPa)

Betonun basınç dayanımını ve σ - ϵ ilişkisini etkileyen bütün değişkenler elastisite modülünü de etkiler. Bu nedenle beton gibi elastik ve doğrusal olmayan ve zamana bağlı deformasyonlar gösteren bir malzemenin elastisite modülünü doğru ve kesin olarak belirlemek olanaksızdır.

2.3 Reaktif Pudra Betonun Özelliklerini Etkileyen Faktörler

2.3.1 Çimentonun Tipinin Etkisi

Çimento seçiminde, kalite programını tam olarak uygulayan bir üretici aranmalıdır. Çimento fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından iyi nitelikte olmalı ve kalitesi fazla değişken olmamalıdır. Kullanırken kontrolleri uygun

biçimde yürütülmelidir. Yüksek dayanım elde etme sürecinde karışımın su ihtiyacı ve işlenebilirlik açısından çimento tipi önemlidir.

Karışım için öncelikle C_3A içeriği ve tane dağılımı başlıca kontrol etkenleridir. Karma oksit bileşimi çimento inceliği ve azaltılmış hidrasyon ısısı erken ve nihai dayanımı yönlendiren karakteristiklerdir. İnceliğin yüksek olması su ihtiyacını değiştirecektir. Çok daha ince çimento tipi kullanmak su bağlayıcı oranını arttıracığından iyi sonuçlar vermeyebilir. Kimyasal kompozisyonunda düşük C_3A içeriği olan çimentolar dayanım değerlerinde daha iyi sonuçlar vermektedir (Pierre ve Cheyrezy, 1994).

Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında çok miktarda kalsiyum hidroksit $Ca(OH)_2$ oluşur. Bu kalsiyum hidroksitin betonun dayanım gelişimine hiçbir katkısı yoktur. Aksine, geniş kalsiyum hidroksit kristalleri sadece agrega-çimento hamuru etkileşiminde ve çimento hamurunun kümeleşme evresinde zayıflıkların oluşmasına neden olurlar. Kalsiyum hidroksit, uçucu kül veya silis dumanı gibi mineral katkıların katılımıyla puzolanik reaksiyon sırasında dayanıma katkıda bulunan bir kalsiyum silikat hidrat yapıya dönüşür.

2.3.2 Su İçeriği

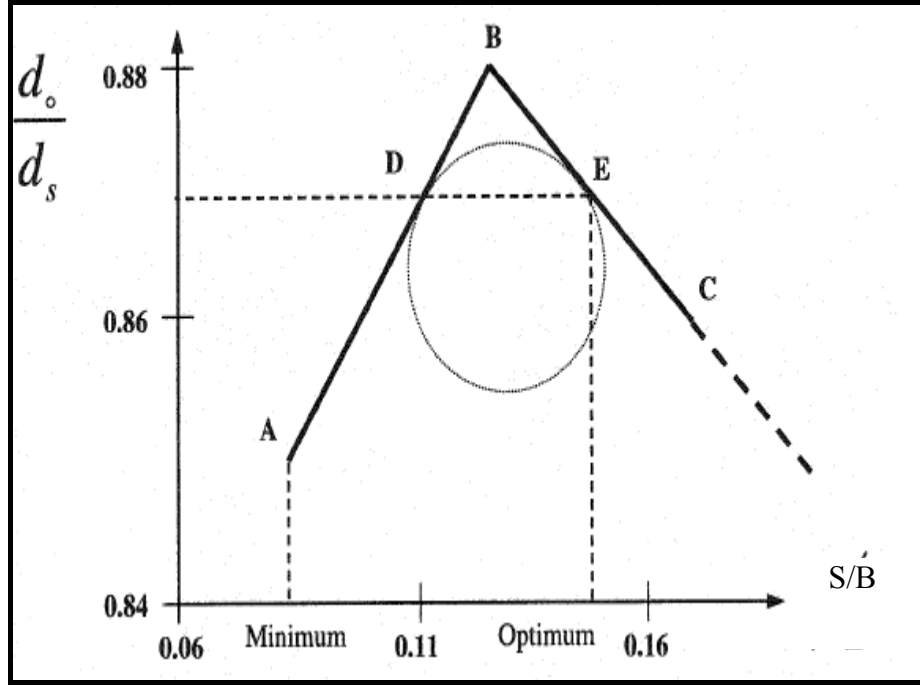
RPB'nunda granüler matrisin performansını ve kalitesini belirlemede ana parametrelerinden biri de su içeriğinin, işlenebilirliğini sağlayan en düşük oranın belirlenmesidir. En düşük su / bağlayıcı oranı (bağlayıcı olarak çimento ve mikro silika malzemeleri) yoğun RPB karışımlarında 0,08 olarak belirlenmiştir (Pierre ve Cheyrezy 1994).

Boşluk içeriği, yapı matrisindeki toplam su miktarı ve içindeki sürüklenmiş ve sıkışmış hava boşluklarına bağlıdır. Matriste seçilen minimum su içeriğinden sonra bağıl yoğunluk parametreleri de en uygun su içeriğine göre belirlenmektedir.

Bağıl yoğunluk, yoğunluğa bağlıdır ve d_0/d_s şeklinde ifade edilir. d_0 prizi alamamış betonun yoğunluğunu ifade ederken d_s ise granüler matriste su ve hava dışındaki katı malzeme yoğunluğudur (Pierre ve Cheyrezy, 1994).

Şekil 2.5'te bağıl yoğunluğun su / bağlayıcı (S/B) ile değişimi ve optimum değerleri ifade edilmektedir (Pierre ve Cheyrezy, 1994). Şekil 2.5'den görüleceği üzere, A noktasında minimum S/B oranıdır. Sisteme ilave edilen su ile sıkışmış hava boşlukları azalmakta, S/B oranı ve karışım hacmi artmaktadır. Kütle artarken bununla birlikte hacim sabit kalmaktadır. Böylelikle d_0 artması ile d_0/d_s oranı da artmaktadır. B noktasına ulaşıldığında karışımda sıkışmış ve sürüklenmiş hava boşluğu kalmamıştır. Su miktarı arttırıldıkça, S/B oranının artmasıyla, karışım hacmi artmakta ancak bağıl yoğunluk azalmakta ve C noktasına ulaşılmaktadır. Şekil 2.3'de görüldüğü üzere, en uygun değeri veren D ve E noktaları görülmektedir. E noktasındaki karışımın verdiği mekanik özelliklerin D noktasına göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. E noktasında daha az sıkışmış hava bulunması daha çok su ile katı fazın hidrate olması, reolojik karakterlerinin üstünlüğü ve kalıba yerleştirmedeki kolaylığı sebebiyle, bu nokta optimum su içeriğinin olduğu nokta olarak düşünülmüştür (Pierre ve Cheyrezy, 1994).

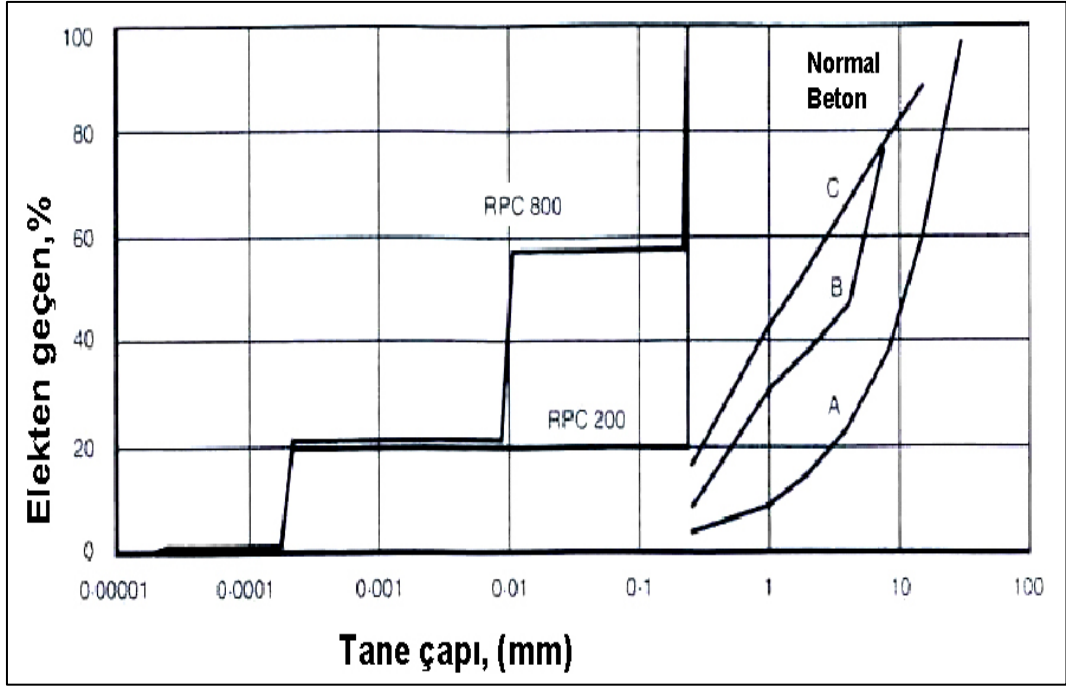
Böylelikle maksimum bağıl yoğunluğa karşılık gelen su içeriği, teorik olarak uygun değer su içeriğini göstermektedir.



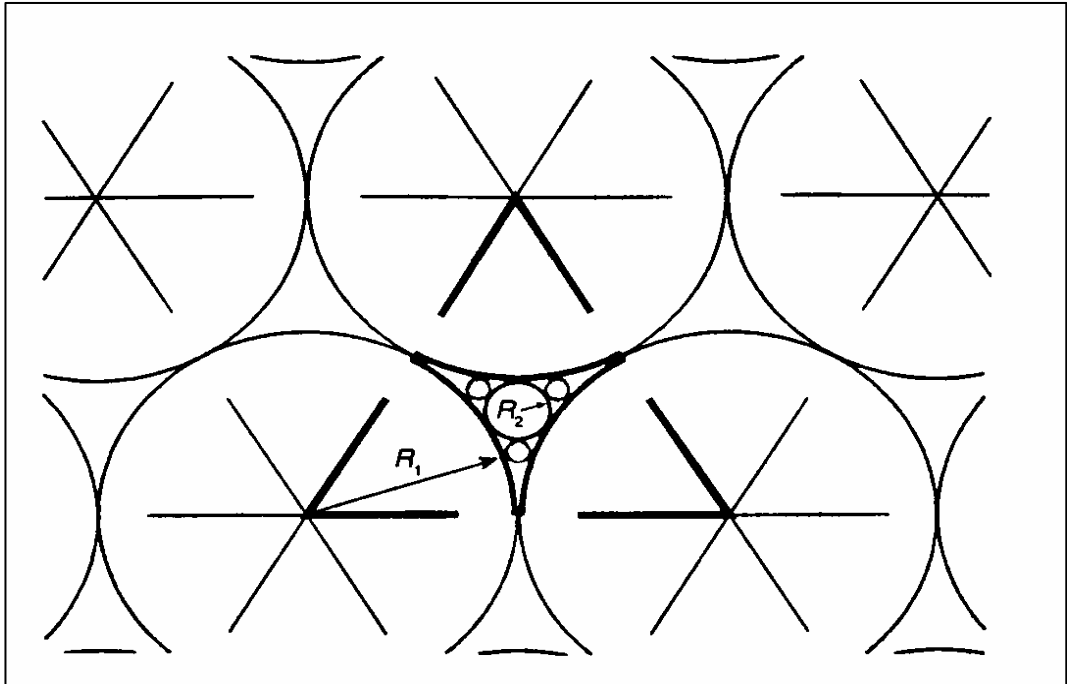
Şekil 2.5 Bağlı yoğunluk su / bağlayıcı oranı grafiği

2.3.3 Agrega Tipi ve En Uygun Tane Dağılımı

Mikro yapıda maksimum yoğunluğu elde etmek amacıyla karışımındaki bütün tanelerin hassas biçimde düzenlenmesi ile en büyük doluluğu sağlayacak biçimde optimize edilmesi gerekir. Bu optimizasyonda mikro yapıda bazı dane çaplarının olmaması, diğer bir deyişle kesikli granülometri esasına dayanarak matrisin oluşturulması ile en fazla doluluk sağlanmalıdır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de teorik olarak maksimum sıklığın nasıl sağlanacağı şematize edilmiştir (Taşdemir, vd. 2005).



Şekil 2.6 Reaktif Pudra Betonlarının (RPB) ve normal betonların tane dağılımı eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 2.7 Reaktif Pudra Betonlarının (RPB) teorik olarak en fazla doluluğu sağlayacak tane dağılımı

Reaktif pudra betonlarda kullanılan agreganın boyutları çimentonunkine yakındır. Bu hidrate olmamış çimento tanelerinin de tane iskeletine uygun olması ve

malzemenin dayanımına katkıda bulunması demektir. Bu betonlarda su / bağlayıcı oranı çok düşük olup 0,15 mertebesindedir. Bu oran çimento hamurunun boşluk oranını azaltmaya ve ortalama boşluk çapının azalmasına yardımcı olmaktadır. İşlenebilme fazla miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanımı ile sağlanmaktadır. İstenilen dayanımlara erişmek için hem bileşen malzemelerin özellikleri hem de bunların mikserde karıştırma sırası önemlidir (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

Reaktif pudra betonlarının üretiminde iyi nitelikli, temiz, sert ve sağlam agregaların seçilmesi büyük önem taşır. Yaklaşık olarak 40 MPa'lık bir basınç dayanımına kadar agreganın yüksek dayanımlı olması birinci derece öneme sahip değildir. Betonda kırılma esnasında çatlak oluşumu önce agrega-matris temas yüzeyinde başlar, sonra matris çatlak ve yayılma matriste gelişir. Yüksek dayanımlı betonda ise kırılma süreci çatlakların agrega içinden geçmesiyle olur. Diğer bir deyişle, normal betondaki gibi çatlak, temas yüzeyinde başlayıp agrega etrafında tur atarak yayılmaz, doğrudan agreganın içinden geçer. Dolayısıyla dayanımı yüksek agrega kullanılmasıyla daha yüksek dayanıma sahip betonlar elde edilebilir (Mindess, 1986)

Agrega içeriği açısından kuvars tercih edilmesinin asıl sebebi çok sert bir madde olması, mükemmel hamur/agrega ara yüzeyi, hazır bulunabilmesi ve ucuz fiyatı ve ASR açısından aktif silis içermemesidir. Büyük çimento taneleri (80-100 μm) ile girişimi sağlamak için maksimum 600 μm , minimum 200 μm tane boyutlu agregalar kullanılmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Collardi vd. Ancona Üniversitesinde (İtalya) RPB konusunda “Mechanical properties of modified reaktive powder concrete“ adlı çalışmalarını ince kuvars agregası ile iri kuvars agregasının belirli oranlarda karıştırılarak agrega iskeleti oluşturulmuştur. Uygulanan kürler ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda da kür koşullarının reaktif pudra beton etkisi incelemiştir (Collardi, vd. 2004).

Çalışmalarında Richard ve Cheyrezy'nin RPB dizaynlarını dikkate alan araştırmacılar, bu dizaynda bazı değişiklikler yaparak modifiye ettikleri RPB'ların

farklı kür koşulları (standart kür, 90 °C buhar kürü ve 160 °C de \approx 1 MPa basınç altında otoklav kürü) altında mekanik özelliklerini belirlemeye çalışmışlardır.

Çalışmalarında agrega olarak kuvarı tercih etmişlerdir. İri agrega olarak adlandırdıkları max dane çapı 8 mm, özgül ağırlığı 2.75 olan kuvars agregası kullanmışlardır. İnce agrega olarak da 0,15 mm ile 0,40 mm aralığında özgül ağırlığı 2.75 olan kuvars agregasını kullanmışlardır.

Deneyisel çalışmalarında kullanılan malzemelerden Portland çimentosu (CEM I 42,5) ve silika dumanın kimyasal özellikleri Tablo 2.5'te görülmektedir. Kullanılan mikro silika oranı tüm karışımlarda çimentonun %25'i olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Gevrek davranışı engellemek için hazırladıkları karışımlara 13 mm uzunluğunda 0,18 mm kalınlığında çelik lifler ilave edilmiştir.

Kontrol karışımlarında Richard ve Cheyrezy'nin araştırmalarındaki karışımları (RPB200) kullanan araştırmacılar, bu karışım dizaynlarında (Tablo 2.4) değişikliklere giderek farklı kür koşulları altındaki basınç dayanımlarındaki değişimleri incelemişlerdir.

Tablo. 2.4 RPB 200 ve RPB800 karışım dizaynları

	RPB 200				RPB800	
	Lifsiz		Lif ilaveli		Silika agregalı	Çelik agregalı
Portland Çimentosu	1	1	1	1	1	1
Mikro silika	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Kum 150--600 μ m	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Kuvars 10 μ m	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Süperakışkanlaştırıcı	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Çelik lif L=12mm	-	-	0,175	0,175	-	-
Çelik lif L=3mm	-	-	-	-	0,63	0,63
Çelik agrega<800 μ m	-	-	-	-	-	1,49
Su	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Sıkıştırma basıncı	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Isıl işlem sıcaklığı	20°C	90°C	20°C	90°C	250-400°C	250-400°C

Çalışmada ince agrega (0,15–0,40mm) yerine, iri agrega (d_{max} = 8 mm) ikame ederek (1,2,3 nolu karışımlar) agrega tane boyutu etkisini; iri agrega (d_{max} = 8 mm) oranını değiştirmeden bağlayıcı (çimento ve mikro silika) yerine ince agrega (0,15-

0,4 mm) ikame ederek (4,5,6 nolu karışımlar) yapı iskeletinde ince agreganın etkisi incelenmiştir. Son olarak da ince agrega olmayan karışımlarda bağlayıcı yerine iri agrega ($d_{max}= 8$ mm) ikame ederek (7, 8, 9 nolu) yapı iskeletinde iri agreganın etkisini farklı kür koşulları altındaki basınç dayanımlarını incelemiştir. Hazırlanan karışımların malzeme miktarları Tablo 2.6, Tablo 2.7, Tablo 2.8'de verilmiştir. Çalışmadaki kür koşulları (otoklav kürü, buhar kürü ve standart kür) şekil 2.8'de verilmiştir.

Bu çalışmadaki basınç dayanımı deneylerinde 40 mm boyutlarındaki küpler, iki noktadan simetrik yüklemeli eğilme dayanımında ve gerilme şekil değiştirme deneyinde 150x150x600mm prizmatik örnekler, tek noktadan yükleme ile eğilme dayanımının belirlenmesinde ise 40x40x160mm prizmatik örnekler kullanılmıştır.

Tablo. 2.5 Kullanılan bağlayıcıların fiziksel özellikleri (Collpardi, vd. 2004).

Kimyasal Kompozisyon (%)	Portland çimentosu	Silika Dumanı
SiO ₂	20,59	98,87
Al ₂ O ₃	3,66	0,01
Fe ₂ O ₃	6,10	0,01
CaO	63,78	0,23
MgO	0,95	0,01
Na ₂ O	0,26	0,00
K ₂ O	0,48	0,08
SO ₃	250	0,23
C ₃ A	0	-
Blaine inceliği (m ² /kg)	340	-

Tablo2.6 1,2,3 nolu karışımların karışım dizaynları

Karışım no	1 (orijinal RPB)	2 (modifiye edilmiş karışım)	3 (modifiye edilmiş karışım)
Portland çimentosu (c)	934 kg/m ³	933 kg/m ³	937 kg/m ³
Silika dumanı (sf)	234 kg/m ³	234 kg/m ³	235 kg/m ³
İnce kum (fs) (0,15-0,40mm)	1030 kg/m ³	539 kg/m ³	-
İri agrega (ga) ($d_{max}= 8$ mm)	-	489 kg/m ³	1031 kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı (kuru)	12.7 kg/m ³	12.7 kg/m ³	12,7 kg/m ³
Çelik lifler	187 kg/m ³	187 kg/m ³	187 kg/m ³
Su (S)	215 kg/m ³	205 kg/m ³	200 kg/m ³
S/Ç	0,23	0,22	0,21
S/(Ç+sf)	0,18	0,17	0,17
Fs/(fs+a)	1	0,52	--
a/c	1,10	1,10	1,10
Yayıllma Tablası	150	150	155

* a=toplam agrega miktarı (fs+ga)

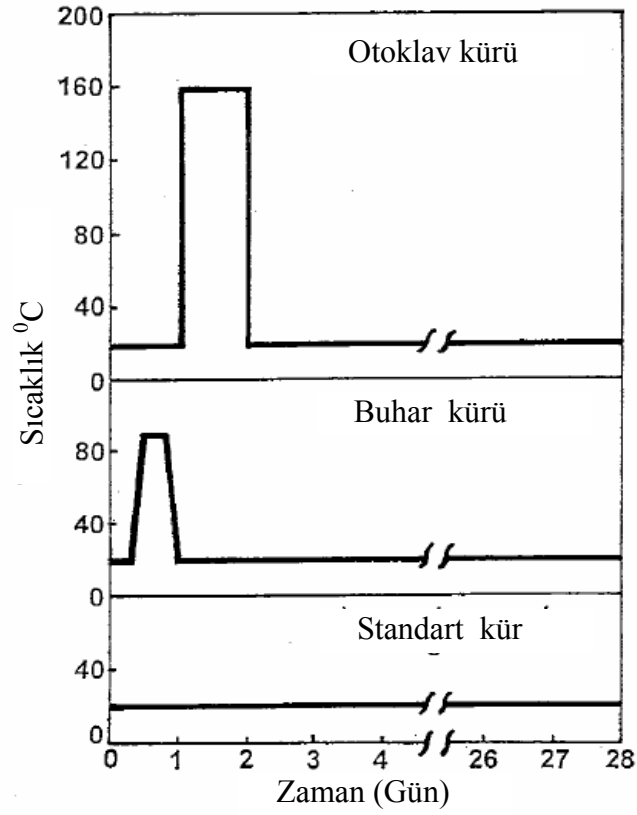
Tablo2.7 4,5,6 nolu karışımların karışım dizaynları

Karışım no	4 (orijinal RPB)	5 (modifiye edilmiş karışım)	6 (modifiye edilmiş karışım)
Portland çimentosu (c)	934 kg/m ³	843 kg/m ³	754 kg/m ³
Silika dumanı (sf)	234 kg/m ³	211 kg/m ³	189 kg/m ³
İnce kum (fs) (0,15-0,40mm)	1030 kg/m ³	1029 kg/m ³	1035 kg/m ³
İri agrega (ga) (d _{max} = 8 mm)	-	109 kg/m ³	217 kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı (kuru)	12.7 kg/m ³	12.7 kg/m ³	12,8 kg/m ³
Çelik lifler	187 kg/m ³	187 kg/m ³	188 kg/m ³
Su (S)	215 kg/m ³	202 kg/m ³	204 kg/m ³
S/Ç	0,23	0,24	0,27
S/(Ç+sf)	0,18	0,19	0,22
Fs/(fs+a)	1	0,90	0,82
a/c	1,10	1,47	1,66
Yayımla Tablası	150	150	155

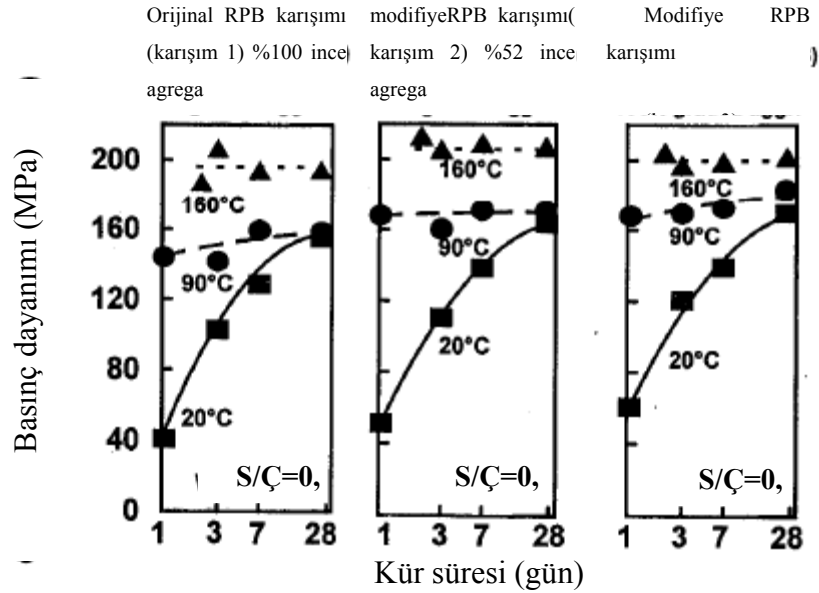
* a=toplam agrega miktarı (fs+ga)

Tablo2.8 7,8,9 nolu karışımların karışım dizaynları

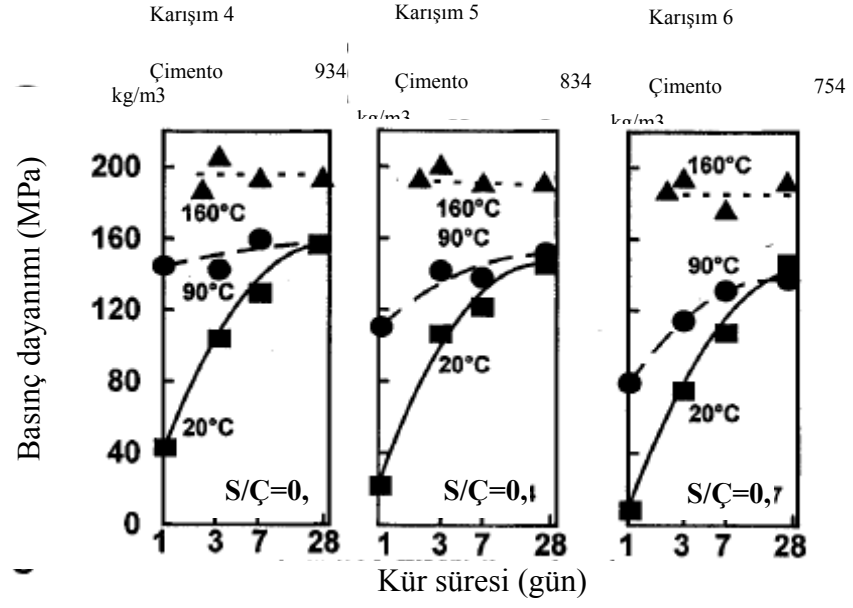
Karışım no	7 (orijinal RPB)	8 (modifiye edilmiş karışım)	9 (modifiye edilmiş karışım)
Portland çimentosu (c)	847 kg/m ³	758 kg/m ³	665 kg/m ³
Silika dumanı (sf)	212 kg/m ³	190 kg/m ³	166 kg/m ³
İnce kum (fs) (0,15-0,40mm)	--	--	-
İri agrega (ga) (d _{max} = 8 mm)	1146 kg/m ³	1259 kg/m ³	1383 kg/m ³
Süper akışkanlaştırıcı (kuru)	12.8 kg/m ³	12.9 kg/m ³	12,9 kg/m ³
Çelik lifler	188 kg/m ³	189 kg/m ³	189 kg/m ³
Su (S)	195 kg/m ³	192 kg/m ³	193 kg/m ³
S/Ç	0,23	0,25	0,29
S/(Ç+sf)	0,18	0,20	0,23
a/c	1,35	1,66	2,08
Yayımla Tablası	150	150	150



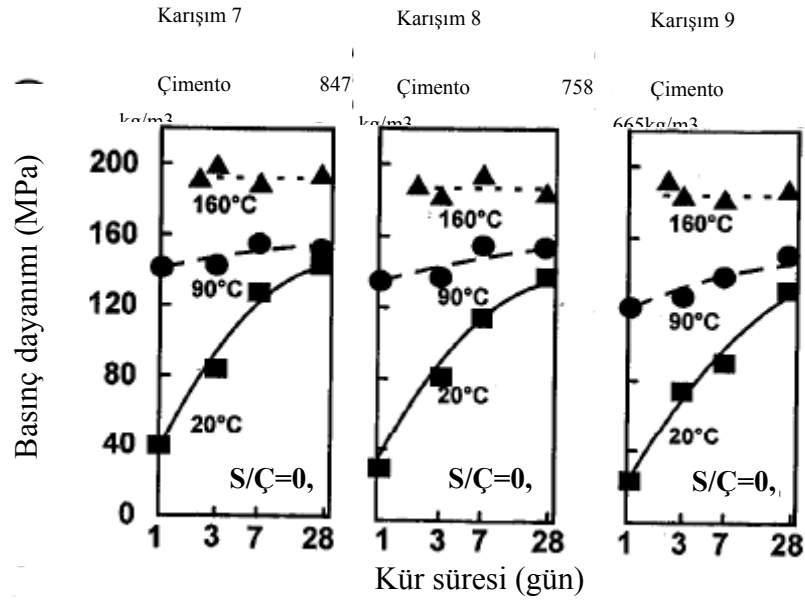
Şekil 2.8 Bu çalışmada uygulanan kürler ve kür koşulları



Şekil 2.9 1 – 2 – 3 nolu karışımların farklı kür koşulları altında basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 2.10 4-5-6 nolu karışımların farklı kür koşulları altında basınç dayanımlarının karşılaştırılması



Şekil 2.11 7-8-9 nolu karışımların farklı kür koşulları altında basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 2.9, Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de grafik halinde sunulmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçların yorumlanması da şu şekilde olmuştur:

a) İnce agregası (0,15-0,40mm) yerine ikame edilen iri agregalı ($d_{max}= 8$ mm) aynı S/B oranına sahip karışımların, farklı kürler altında elde edilen basınç dayanımlarında Richard ve Cheyrezy’nin tezlerinde olduğu gibi, iri agreganın elimine ince agregası ile iskelet yapının daha homojen olabileceği ve daha yüksek dayanımlı betonun oluşturulabileceği tezi bu çalışmada yakalanamamıştır.

b) İri agreganın yerine ince agreganın ikame edilmesi karışımların işlenebilirliği artmaktadır. Bağlayıcı oranın azalması ile su/bağlayıcı oranı artış göstermiştir. Bu oranın artması ile basınç dayanımında azalma gözlenmektedir. Ayrıca agregası/bağlayıcı oranı 1,10 üstünde olan karışımlar da agregası/bağlayıcı oranı arttıkça basınç dayanımı da azalmaktadır.

c) İri agreganın yerine ince agreganın ikame edilmesi ile hazırlanan karışımların eğilme dayanımlarının daha yüksek değerde olduğu gözlenmiştir. Bu etki eğilme testlerinde ince agreganın daha homojen yerleşimi ve çimento matrisi ile agreganın yapışma dayanımının etkili olarak daha yüksek olmasıyla açıklanmıştır.

d) Buhar kürü ve özellikle yüksek basınçlı buhar kürü daha iyi RPB performansı vermektedir. Yüksek dayanım, düşük kuruma büzülme ve sünme gibi özellikler daha yoğun ve kararlı bir çimento matrisinin oluşması ile ilgilidir.

e) Agregası tane boyutunun farklı kür koşulları altında basınç dayanımına etkisi incelendiği 1,2 ve 3 nolu karışımların sonuçlarının Şekil 2.9’da verilmiştir. İri agregası ($d_{max}= 8$ mm) ince agreganın (0,15–0,40mm), %48-%52 oranlarında, birleşiminden elde edilen farklı kür koşulları altındaki basınç dayanımları sadece iri agregası ($d_{max}= 8$ mm) ya da sadece ince agregası (0,15–0,4 mm) ile hazırlanan karışımlardan daha yüksektir.

2.3.4 Mineral Katkıların Etkisi

Doğal puzolanlar volkanik küller ve tüfler (traslar), pomza taşlarıdır. Yapay puzolanların önemlileri ise; pişmiş kil ve şeyller, uçucu kül ve yüksek fırın letiyesi (Cüruf) ve silika tozudur (silis dumanı) (Baradan, 2000).

Doğal puzolanların yanında, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı beton teknolojisinde olduğu gibi, çimento üretiminde de en çok kullanılan mineral katkılarıdır. Beton ve çimento teknolojisinde mineral katkı kullanımı, kazandırdığı tüm özelliklerin yanında CO₂ emisyonunu azalmasında ve atıkların kullanımı gibi katma değeri yüksek malzemelerdir.

Yakın zamandaki gelişmelere dayanarak da mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin puzolonik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır. (Goldman ve Bentur, 1994; Taşdemir, 1996).

Bilindiği gibi, çimentonun C₂S ve C₃S bileşenlerinin hidratasyonu sırasında esas hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, betonun en zayıf halkası Ca(OH)₂ de açığa çıkar. Puzolanlar işte bu zayıf kısım ile reaksiyona girerek hem kendi bağlayıcılık özelliklerini kazanır, hem de daha yoğun ve suda çözülmeyen bir yapıya dönüşür. Ek olarak yüksek inceliğe sahip puzolanlar betondaki boşlukları doldurma etkisine sahip olmaları nedeniyle de dayanım ve geçirimsizliği de arttırmırlar.

Betonda mineral katkı kullanımı, taze ve sertleşmiş durumdaki betonun özelliklerini iyileştirmekte, ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktır.

RPB'de yüksek miktarlarda bağlayıcı kullanılması, mineral katkıların beton özelliklerine etkilerinin tespit edilmesinin önemini arttırmaktadır. Ayrıca, katkıların değişik özelliklerde olması, katkı çeşidinin seçimini de daha önemli hale getirmektedir. Örnek vermek gerekirse, uçucu kül ve doğal puzolanların

reaksiyonları, çimento hidrasyonundan daha yavaş oldukları için, bunların kullanımı erken yaşlardaki dayanım kazanma hızını azaltmakta ve gerekli olan kür süresini uzatmaktadır. Silis dumanı ise, yüksek inceliğinden dolayı hızlı reaksiyona girmekte ancak hem su ihtiyacını arttırabilmekte hem de maliyeti yükseltmektedir.

Mineral katkıların getirebileceği bazı olumsuz etkileri, katkının yanında bir başka çeşitte mineral katkı kullanarak telafi etmek mümkündür. Örneğin uçucu kül külün yavaş gelişen reaksiyonları sonucu erken yaşlardaki dayanım kaybı, hızlı reaksiyon gösteren silis dumanının da aynı betonda kullanılmasıyla giderilebilir. Silis dumanının yol açtığı su ihtiyacındaki artma da uçucu külün küresel şekilli taneleri ile azaltabilir (Mehta, 1982).

Diğer bir deyişle, betonda çimentoya ek olarak iki tip katkı kullanımıyla, yani üçlü bağlayıcı içeren sistemler kullanılmasıyla, betonda sinerjik etki oluşmaktadır. Üçlü bağlayıcı kullanımı, ikili veya tek bağlayıcı kullanımına göre basınç dayanımını, boşluk dağılımını (Mehta, 1982), çekme dayanımını (Shannag , 2000), klor geçirgenliğini, alkali-silika reaksiyonlarına direncini (Özyıldırım, 1994), sülfat direncini, asitlere karşı direnç gibi özelliklerini geliştirmektedir.

2.3.4.1 Silis Dumanı

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikte tanelerin kullanımı yoğunluğun arttırılması dolayısı ile boşlukların azaltılması, taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için oldukça önemlidir. Böylece durabilite iyileşir ve dayanım yükselir. Silis dumanı veya diğer bir deyişle mikro silika, silis ve ferro silis endüstrilerinin bir yan ürünüdür. 1950'lerden beri betonun özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu tanelerin etkili olabilmesi için beton içinde iyi bir dağılımı gereklidir. Ve bunu da bir süper akışkanlaştırıcı ile sağlamak olasıdır (Taşdemir, vd. 2005).

Yeni kuşak betonlarda, modern toplumun istediği mekanik özellikler, maliyet, enerji tasarrufu ve sürdürülebilirlik sağlanmaya çalışılmaktadır. Nano boyutunda

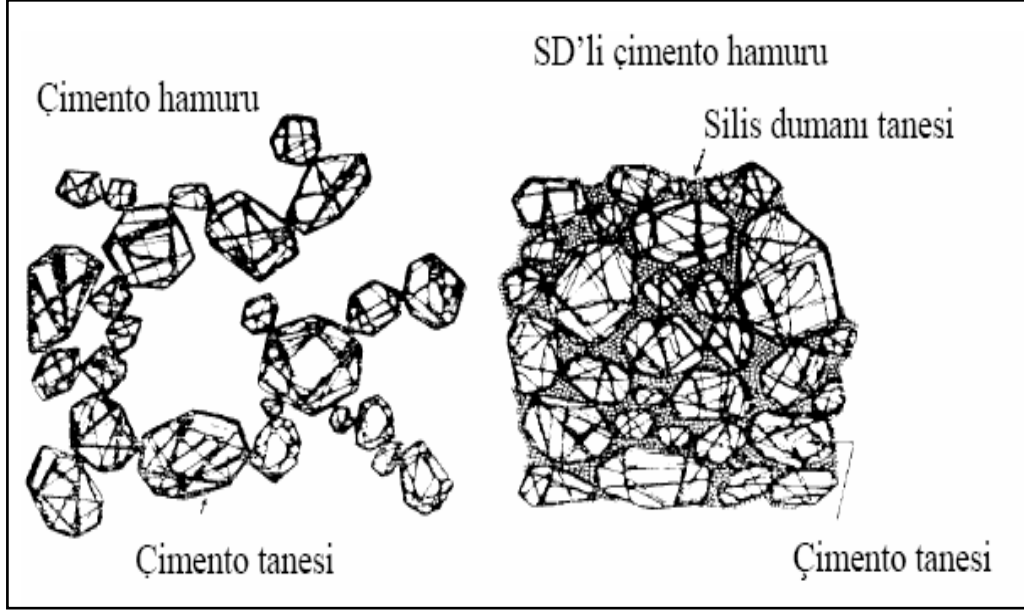
çimento ve nano mühendislik ile üretilen çimento esaslı malzemelerin geliştirilmesi bu konuda yeni bir aşama oluşturmuştur. Betonun performansında sağlanan başlıca gelişmeler, uçucu kül ve silis dumanı gibi birçok ince taneli katkıları sayesinde olmuştur. Ancak yüksek dayanımlı betonlarda sıkça kullanılan nano boyuttaki silisin üretilmesi yüksek dayanımlı betonlardaki gelişmeyi hızlandırmıştır.

RPB üretiminde kullanılan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldururlar ve çimentonun birincil hidrasyonundan oluşan Ca(OH)_2 ile puzolanik reaksiyona girerek C-S-H' i (Kalsiyum Silikat Hidrate) oluştururlar. Malzeme daha yoğun ve dolayısıyla daha mukavemetli bir hale dönüşür. Böylece mikro yapıda puzolonik malzemenin ikincil hidrasyonu ile matris iskeleti biraz daha güçlenecektir (Taşdemir, vd. 2005).

Yüksek inceliğe sahip silis dumanı içeren çimento hamurunun da silis dumanı çok etkindir ve sıkı bir diziliş sağlar (Hijorth, 1983).

Hijorth tarafından belirtildiği gibi, Portland çimentosunun çok ince silis dumanı ile birleşmesi sonucu mikro silika içeren yüksek dayanımlı betonlarda mükemmel bir diziliş elde edilir. Mikro silika taneleri çimento taneleri arasında dolgu etkisi yaratarak daha yoğun bir iç düzenin oluşması sağlamaktadırlar. Bu olay şematik olarak Şekil 2.12'de gösterilmektedir (Hijorth, 1983).

Puzolanik etkisi ile çimento hamurunda daha yoğun bir yapı meydana getiren silis dumanı betonların en zayıf fazı olan çimento hamuru-agrega ara yüzeyindeki boşlukları doldurmakta ve hamur ile agrega taneleri arasındaki aderansı arttırmaktadır (Taşdemir ve Bayramov, 2002).



Şekil 2.12 Silis dumanın çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi

Silis dumanı içeren betonlar üzerine ilk deney 1950'li yılların başında Norveç Teknoloji Enstitüsünde yapılmıştır. Bu ilk uygulama olarak, silis dumanının betonda kullanımı 1971 de yine Norveç'te gerçekleştirilmiştir. Daha sonra betonda silis dumanının pratik kullanımda ve araştırmalarda kullanımı giderek arttırılmıştır (Telford, 1988).

Az miktarda silis dumanının yeni tip akışkanlaştırıcılar ile betonda kullanımı betonda işlenebilirliğin yanında basınç dayanımında da ciddi boyutta artışın gözlenmesini sağlamıştır. Son 15 yıl boyunca, yüksek dayanımlı beton üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar, şartnamelerin kapsamının genişletilmesine ve basınç dayanım sınıfları C100'ü aşan betonarme yapıların tasarımına yol açmaktadır (Walraven, 1999).

Silis dumanı içeren betonların özellikleri göz önüne alarak silis dumanını iki şekilde kullanıldığını akılda tutmak gerekir:

a) Durabilitenin geliştirilmesi ve hidrasyon hızının azalması gibi nedenlerle çimento miktarında bir miktar azaltma yaparak çimento ile yer değiştiren bir malzeme olarak kullanılması.

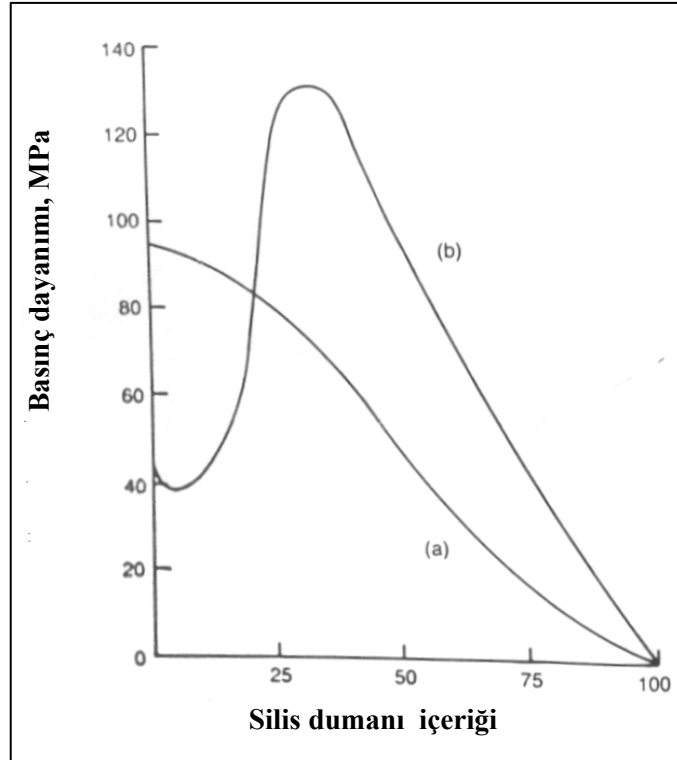
b) Hem taze hem de sertleşmiş haldeki beton özelliklerini geliştirmek için bir mineral katkı olarak kullanılmasıdır (Telford, 1988).

Silis dumanı yüksek performanslı beton ve harçların önemli bir bileşeni olup işlenebilmeyi artırır. Kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı da artırır. Sonuçta betonun dayanımı ve durabilitesi artar. Ancak silika dumanın betonda kullanılmasındaki en önemli problem fiyatının yüksek olmasıdır. Fiyatı çimento fiyatının yaklaşık beş katıdır. Ve her yerde bulunması oldukça güçtür. Diğer taraftan bazı stratejik yapılarda kullanılacak yüksek performanslı beton ve harçların uzun süreli performansları henüz tam belirlenmemiştir (Massaza, 2000; Goldman ve Bentur, 1992).

Otoklav ile kür edilmiş çimento hamurlarının optimum silika içeriği bağlayıcı miktarının yaklaşık olarak %30'dur (Şekil 2.13). Bu hamurun otoklav kürü dayanımı normal kür edilmiş hamurlardan önemli oranda yüksektir (Khoury, 1992).

Şekil 2.13'te iki ayrı kür koşulu altında silis içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. 28 gün 21 °C'de standart kür uygulanan örneklerde silis içeriği arttırıldıkça dayanım değerleri azalır iken, 160 °C sıcaklıkta 24 saat otoklav kürü gören örneklerde %30 silis içeriğine kadar dayanımların arttığı, sonrasında artan silis, dayanımlarda düşürücü etki oluşturmaktadır (Khoury, 1992).

En uygun mikro silika içeriği konusunda, Chan ve Chu yaptıkları “çelik liflerin reaktif pudra betonunda yapışma karakteristikleri” adlı çalışmalarında (2003) hazırladıkları kemik şeklindeki örneklere (Şekil 2.14) 3 gün boyunca 85°C altında ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Kür sonrası 24 saat bekletilen örnekler Şekil 2.16'te görüldüğü gibi çekme deneyine tabi tutulmuş, mikro silika yüzdesine bağlı olarak ortalama aderans dayanımı (MPa) ve sıyrılmaya enerjileri (N.mm) belirlenmiştir (Chan ve Chu, 2003).



Şekil 2.13 Silika içeriğinin çimento hamurunun basınç dayanımı üzerindeki etkisi a) 21 °C'de 28 gün normal kür b) 160 °C'de 24 saat otoklav kürü

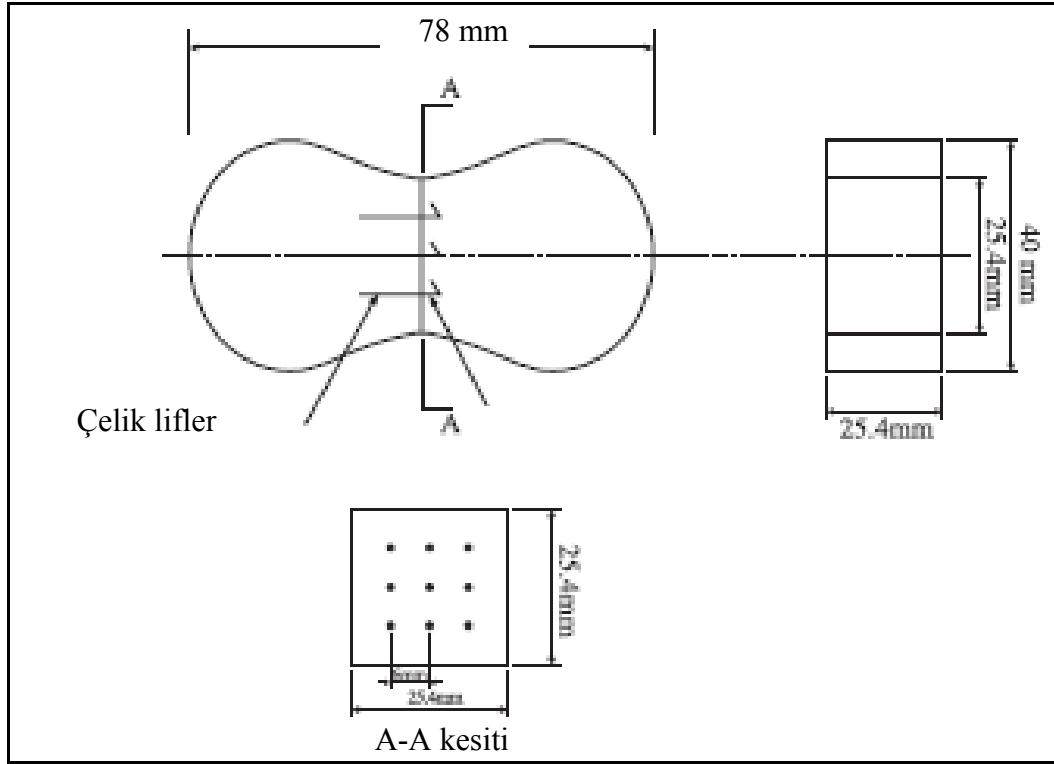
Chan ve Chu yaptıkları çalışmada lifleri sadece çekme etkisine maruz bırakmışlardır. Sadece çekmeye maruz kalan örneklerin, matristen sıyrılma yükleri ve sıyrılma enerjileri belirlenmiştir. Deneyin uygulanması Şekil 2.14, Şekil 2.16'da, sonuçları Şekil 2.18 ve Şekil 2.19'da, SEM çalışmasında silika yüzdesinin oluşturduğu yapışma etkisini de Şekil 2.17'de görülmektedir (Chan ve Chu, 2004).

Chan ve Chu çalışmalarında, silika dumanı kullanımının lif-matris ara-yüzey özelliklerini geliştirmiştir. Özellikle liflerin sıyrılma enerjisini arttırdığını belirtmiştir.(Chan ve Chu, 2004).

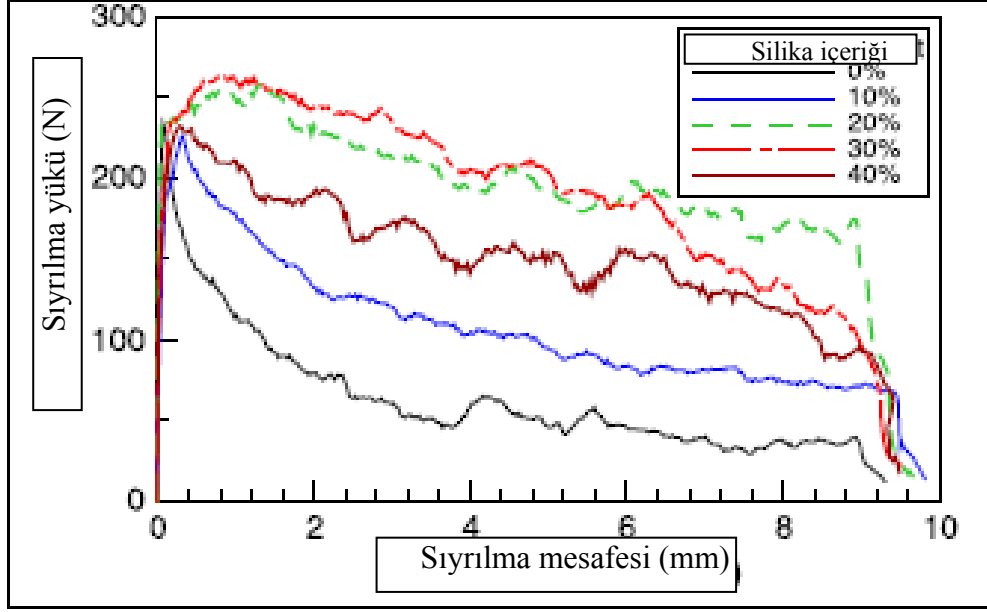
Şekil 2.17'de mikro boyutta matris ile çelik lifin farklı silis içeriklerindeki yapışma davranışları SEM deneyi altında incelenmiştir. Şekil 2.17'den görüleceği üzere çalışmada bağlayıcısının %30'u oranında silis içeren karışımlarda mikro boyutta çelik lifler ile matris arasında kuvvetli bir yapışmanın olduğu görülmekte

iken, %40 mikro silis içeren örneklerin yapışma davranışının azaldığı gözlenmektedir. Bu durum şekil 2.18 ve Şekil 2.19'daki ortalama aderans dayanımı ve sıyırılma enerjisi ile örtüşmektedir (Chan ve Chu, 2004).

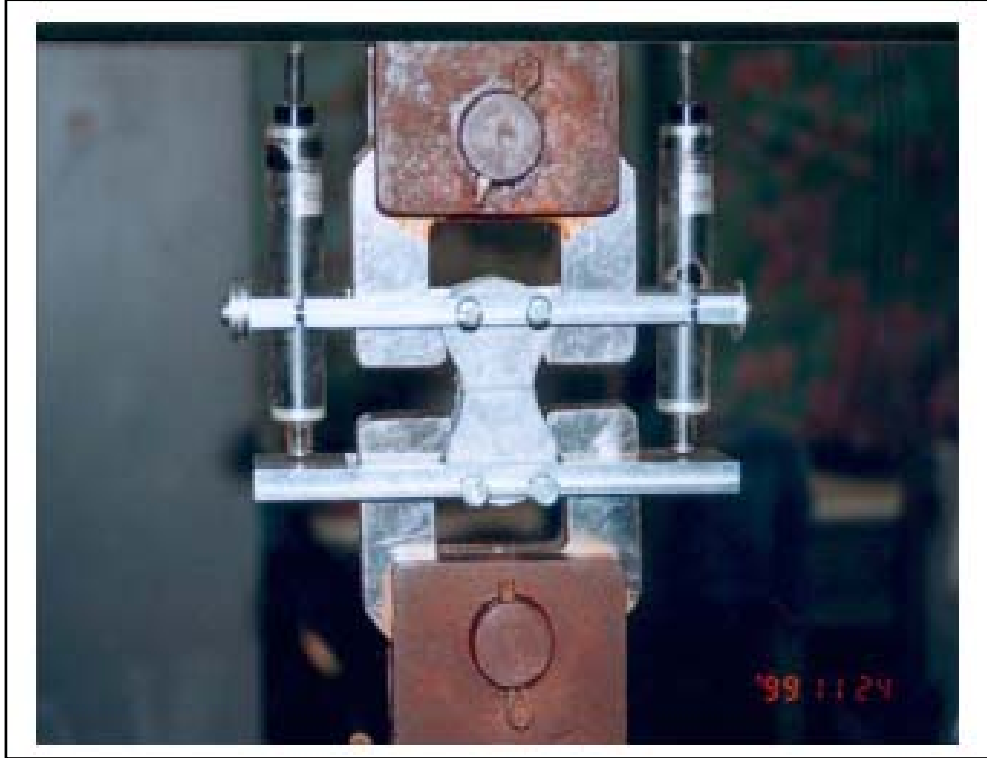
Şekil 2.15'te farklı silis dumanı içeren karışımların, sıyırılma yükü ve sıyırılma mesafesi grafiği incelendiğinde, % 30 silis dumanı içeren örnekler en fazla çekme kuvvetini almışlardır. Karışımlarda silis dumanı yüzdesi arttırıldıkça liflerin matrise tutunma yeteneği artmıştır; ancak %30 silis dumanı içeriğinden sonra eklenen silis dumanı liflerin matrise yapışma özelliğini azaltmıştır (Chan ve Chu, 2004).



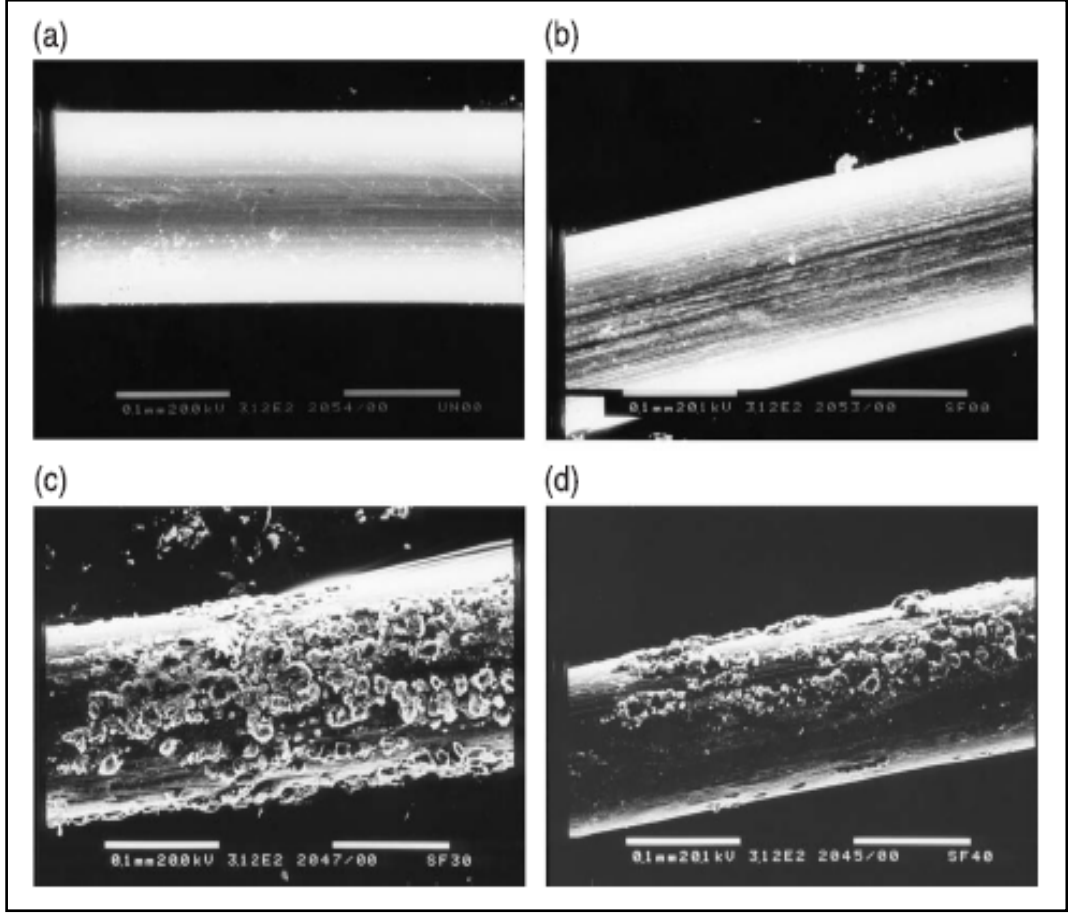
Şekil 2.14 Chan ve Chu'nun çalışmalarındaki kemik şeklindeki örnekler



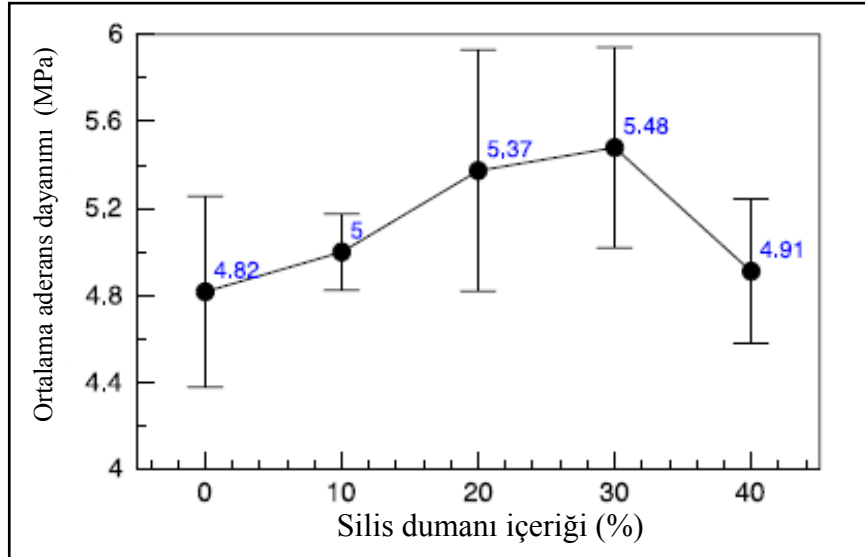
Sekil 2.15 Farklı silika içeriği altında sıyırılma yükü sıyırılma mesafesi grafiği



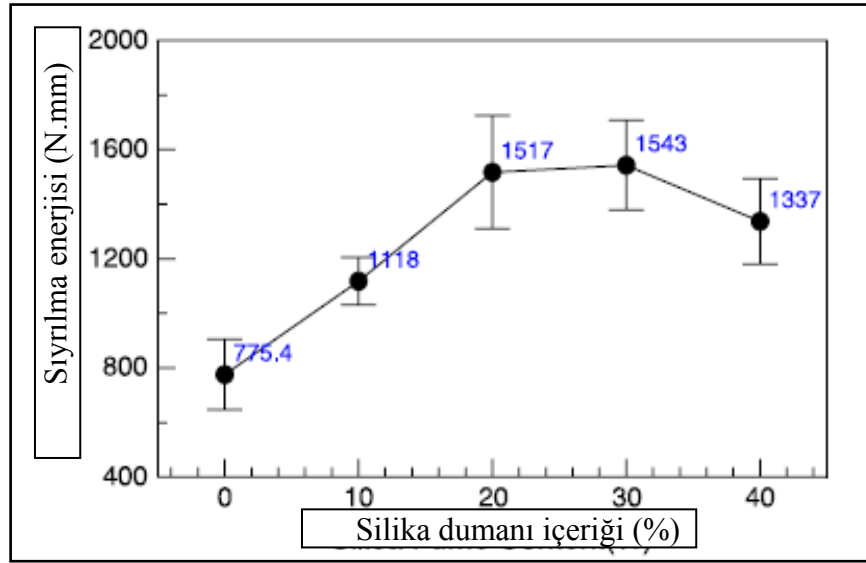
Sekil 2.16 Chan ve Chu'nun çalışmalarındaki çekme deneyi



Şekil 2.17 Chan ve Chu'nun çalışmalarındaki çelik liflerin SEM deneyi a) çelik lifin beton içine girmeden önceki görüntüsü b) %0 silika içeriği c) %30 silika içeriği d)%40 silika içeriği



Şekil 2.18 Mikro silis yüzdesi ile çelik liflerin ortalama adersan dayanımı grafiği



Şekil 2.19 Mikro silika miktarı ile çelik liflerin sıyırılma enerjisi grafiği

2.3.4.2 Uçucu kül

Elektrik üretmek amacıyla termik santrallerde çoğunlukla pulverize kömür yakılır. 75 μm (No 200) elekten % 80'i geçecek şekilde kırılıp inceltelen kömür tozları, önceden ısıtılmış hava ile karışıp yanma için kazan içine üflenir. Bu yanmanın sonucu olarak, farklı özellikteki çeşitli gazlar ve bazı atıklar (kömür külleri ve yanmayan kül) ortaya çıkar.

Oluşan atığın yaklaşık % 75–80'lik birincil kısmı çok küçük partiküller halinde yanma odasından akışkan gazlarla birlikte uçar. Bu partiküllerin bacadan havaya kaçıışı elektrostatik filtreler tarafından önlenir. Modern santrallerde, bu ince malzemelerin % 99'u gaz kaçmadan önce tutulur.

Uçucu kül, pulverize kömür ile çalışan termik santrallerin yanma sonucu elde edilen (bir yan ürün) çok ince kalıntılarıdır. İngiltere gibi bazı ülkelerde bu yan ürüne pulverize uçucu kül (pulvarized fly ash) denilmektedir.

Uçucu külden başka atık malzeme olarak daha büyük küller halinde fırının altında bir başka atık daha elde edilir. Bu atık malzemeye “taban külü” veya “kazanaltı cürufu” denilir.

Uçucu küller, puzolanik özellik gösterir. Kendi başlarına bağlayıcı özellikleri ya hiç yoktur veya çok azdır. Nemin varlığı ile orta sıcaklıkta kimyasal reaksiyon yapıp C-S-H bileşenleri oluşturur ve bağlayıcılık özelliği elde edilir.

Herhangi C tipi uçucu kül % 10 dan fazla CaO içerirler ve puzolanik özellikleri yanında kendi başına az da olsa bağlayıcılık özelliği gösterirler (Neville, 1995).

Ülkemizde açığa çıkan termik santral atıklarının miktarları hakkında sağlıklı bir bilgi bulunmamaktadır. 2003 yılı verilerine göre, 18 milyon tonu uçucu kül ve 6 milyon tonu taban külü / kazanaltı cürufu olmak üzere, toplam 22 milyon ton kül açığa çıktığı tahmin edilmektedir. Açığa çıkan uçucu külün, 400 bin tonu separatörlerden geçirilerek ve yaklaşık olarak 300–400 bin tonu da separatörlerden geçirilmeden beton üretiminde kullanılmaktadır. Bir başka deyişle, açığa çıkan uçucu külün sadece %4'lük bir kısmı değerlendirilebilmiştir (Yazıcı, 2004).

2.3.4.2.1 Uçucu Küllerin Sınıflandırılması. Çoğunlukla ülke şartnamelerinde uçucu külün sınıflandırılması ile ilgili bir şart yoktur. Ancak ASTM C618 standardı uçucu küllerin kimyasal bileşimlerine ve elde edildikleri kömür cinsine bağlı olarak C ve F sınıfa olarak sınıflandırılmıştır. Türkiye'de aktif olarak çalışan 12 adet termik santral vardır ancak bunlardan sadece 1 tanesinden, Çatalağzı Termik Santrali'nden F tipi uçucu kül elde edilmektedir, diğer tüm santrallere ait küller ise C tipidir. ASTM C618'e göre uçucu kül sınıflandırması aşağıdaki Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9 Uçucu kül sınıfları (ASTM C 618)

Sınıf	Tanımı
F	$SO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$ bitümlü veya antrasit (parlak kömürden elde edilen uçucu küller) yalnızca puzolanik özelliğe sahip
C	$SO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$ Linyit kömüründen elde edilen uçucu kül. Kireç (CaO) içeriği %10 dan fazla olabilir. (yüksek kireçli uçucu kül) puzolanik ve az bağlayıcılık özelliğine sahip

2.3.4.2.2 Uçucu Küllerin Fiziksel özellikleri. Şekli, tane dağılımı, inceliği ve yoğunluğu uçucu küllerin fiziksel özellikleridir ve taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini etkilerler. ASTM C618'e göre ayrıca puzolanik dayanım aktivite indeksi, su ihtiyacı, hacim değişimi, üniformalık ve su içeriği de uçucu küllerin araştırılması gereken fiziksel özellikleridir. Fiziksel ve kimyasal özellikler termik santrallere göre değişir. Kullanılan kömürün cinsi, kömürün pulverizasyon derecesi, yanma hızı, ve sıcaklığı yakma ekipmanları ve uçucu kül toplama sistemleri bu değişime neden olurlar. Fiziksel özelliklerin taze betonun performansı üzerine etki, kimyasal bileşiminden daha çoktur. Uçucu küllerin fiziksel özellikleri ve önemleri aşağıda açıklanmıştır (Neville, 1995).

2.3.4.2.3 Uçucu Küllerin Kimyasal Bileşenleri ve Özellikleri. Çoğu uçucu küllerin (% 85 den fazla) kimyasal yapısı silika (SiO_2), alümin (Al_2O_3), demir oksit (Fe_2O_3) ve CaO den oluşur. Bu oksitlere ilave olarak, az miktarlarda MgO, SO_3 ve alkalilerde bulunur. Bazı uçucu küllerde, uçucu kül ile birlikte yanmamış karbon (C) parçacıkları da bulunabilir. Tablo 2.10'da, 13 farklı F sınıfı uçucu kül ile 9 değişik C sınıfı uçucu külden elde edilen farklı kimyasal özellikler verilmiştir.

Uçucu küllerin kimyasal bileşenleri büyük ölçüde kullanılan kömür tipine (taşkömürü, linyit gibi), kömür içinde yanmayan malzeme miktarına ve yanmanın verimliliğine bağlıdır. Genellikle linyit kömüründen elde edilen uçucu küller, bitümlü küllere göre daha fazla CaO ve daha az Fe içerirler. Linyit kömüründen elde edilenler daha az yanmamış karbon içerirler (Neville, 1995).

Tablo 2.10 Uçucu küllerin sınıflarına göre bazı kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	F Sınıfı (CaO < % 10)	C Sınıfı (CaO > % 10)
SiO ₂	43.6-64.4	23.1-50.5
AlO ₃	15.6-30.1	13.3-21.3
Fe ₂ O ₃	3.8-23.9	3.7-22.5
CaO	0.7-6.7	11.5-29.0
MgO	0.9-1.7	1.5-7.5
Na ₂ O	0-2.8	0.4-1.9
C, (IOI)	0.4-7.2	0.3-1.9

2.3.4.3 Yüksek fırın cürufu

Demir üretiminde kullanılan yüksek fırında, demir cevherinden demir alındıktan sonra geri kalan maddeye letiye (cüruf) denilmektedir. Bunun içinde alumin, silis ve kireç bulunmaktadır. Letiyelerin içine az miktarda bağlayıcı madde katılınca puzolandan da öteye çimento yapısına sahip olmaktadırlar (Baradan, 2000).

Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (ÖYFC), demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üzerinde yer alır. Demir filiz gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası atıkları yüksek fırın cürufunu meydana getiriler (Tokyay ve Erdoğdu, 1997).

Yüksek fırın cürufunun Portland çimentosunun inceliğine yakın derecede öğütülerek çimento ve beton endüstrisinde kullanılabilir. Cüruf inceliğinin puzolanik aktiviteyi önemli derecede etkilediği bilinmektedir (Taşdemir, 1998).

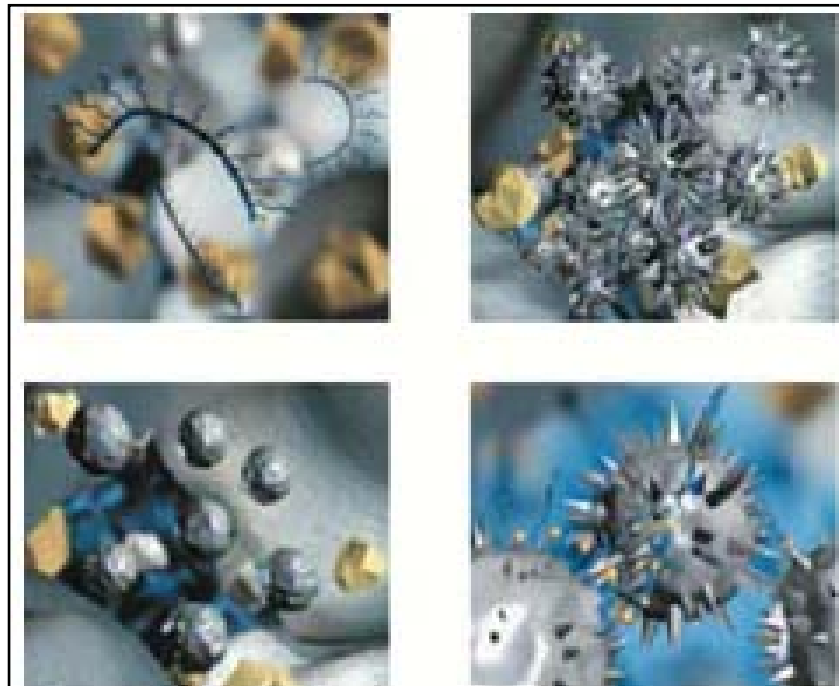
2.3.5 Süper Akışkanlaştırıcıların Etkisi:

Süper akışkanlaştırıcılar yüksek performanslı betonların gelişiminde önemli bir rol oynamaktadır. İri agrega yerine konulacak olan ince agregaların ve mikro yapının güçlendirilmesi adına ilave edilecek mikro silis gibi ince malzemelerin özgül yüzeylerinin fazlalığı sebebiyle su ihtiyacı artmaktadır. RPB su/bağlayıcı oranın

mümkün olduğunca düşük tutmak (% 15 civarı) amacıyla sisteme akışkanlaştırıcı katkı ilavesi gerekmektedir.

Süper akışkanlaştırıcılar, karışım içerisindeki suyun yüzey gerilmesini düşürerek sistem içerisinde partiküller ile suyun homojen şekilde temasını ve daha fazla sayıda çimento tanelinin suyla ıslatılmasını sağlamaktadır. Bunlar dışında çimento tanelerinin yüzeylerine yapışarak, oluşturdukları elektrostatik etki ile çimento tanelerinin bir ara gelip folükül yapı oluşturmasını engellemektedir. Birbirinden uzaklaşan çimento taneleri daha fazla ıslanma alanı kazanıp daha süratli bir şekilde hidrasyon işlemine girerler. Ayrıca karışıma sağladıkları akışkanlık özellikleriyle de kalıba yerleştirilmesinde kolaylık sağlar (Feylessoufi, vd., 2000).

Şekil 2.20 süper akışkanlaştırıcı katkı ile çimento tanelerinin etkileşiminin mikro boyuttaki fotoğrafıdır.



Şekil 2.20 Süper akışkanlaştırıcı katkıların çimento moleküllerinin mikro boyuttaki etkileşimleri

Süper akışkanlaştırıcı katkının dağılma etkisi ile katkı maddesinin molekülleri, çimento partikülleri tarafından çekilir ve karıştırma sırasında çimento etrafına sarılır.

Bu oluşum çimento partiküllerinin yüzeydeki negatif yüklerini arttırır ve elektrostatik itmeye neden olur. Çimento tanelerinin çok miktarda dağılımı bunun sonucudur. Bu, su içeriğinin azlığına rağmen betonun işlenebilirliğinin önemli ölçüde artışına yol açar (Duyar, 2006).

2.3.6 Çelik Liflerin Etkisi

Yüksek dayanımlı kompozitlerde gevrek özelliği engellemek üzere çelik tüp ve çelik lif kullanılmasını öneren araştırmacılar, çelik tüp kullanımı ile sadece tokluk değerinin değil, aynı zamanda basınç dayanımı değerinin de oldukça geliştiğini belirtmişlerdir (Long, vd., 2002).

Çelik lif takviyesi beton üzerinde şu şekilde olumlu etkiler oluşturmaktadır.

- a) Yüksek elastik mukavemet ve çatlama karşı yüksek dayanım
- b) Çok yüksek enerji yutma kapasitesi
- c) Yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım
- d) Yüksek plastik deformasyon derecelerinde yük taşıyabilme kapasitesi

e) Lineer ve elastik davranış gösteren RPB matrislerinin düktilitesini arttırmak amacıyla mutlaka lifler kullanılmalıdır. 13 mm uzunluğunda ve 0,15 mm çapında düz çelik lifleri karışıma hacimce %1,5–3 oranlarında katılması yeterli olmaktadır (Richard ve Cheyrezy, 1995).

20. yüzyılın son çeyreğinde lifli betonlar üzerinde birçok çalışma yapılmış ve bu konuda önemli mesafe kaydedilmiştir. Öncü çalışmalar 1963 yıllarında betonda cam lifi kullanılarak yapılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda ise farklı lif tiplerinin ve içeriklerinin etkileri araştırılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılık olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımlarını arttırdığı görülmüştür (Köksal, vd., 2002; Shah ve Ranga, 1971)

Ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesine sahip RPB'larının elde edilmesinde çelik tel kullanımı önemli bir yere sahiptir. Çelik tellerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak çelik lifler beton davranışının eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğu değerini iyileştirir.

Çelik tellerin betonlar üzerindeki yaptığı iyileşmeleri belirleyen en önemli etkenler ise telin narinliği (tel boyu/tel çapı), kullanılan telin miktarı, telin matristen sıyrılma dayanımı, telin hamur içerisinde yönlendirilmesi ve telin kopma dayanımıdır (Köksal, vd., 2002; Shah ve Rangan, 1971).

Lifli betonlar geleneksel betonlara kıyasla tokluk başta olmak üzere daha yüksek eğilme dayanımı ve çekme dayanımına sahiptir. Lifli betonda liflerin ana fonksiyonu, çatlakları keserek çatlak ilerlemesini önlemek, çatlakları kapatmak, yüklenme esnasında oluşan çatlakların lokal olarak değil dağılmış olarak oluşumunu sağlamak ve çatlakların kararlı olmasını sağlamak olarak sayılabilir. Geleneksel inşaat tekniğinde, normal lifli betonların lif hacmi %2 olarak sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, çelik liflerin donatı etkisi inşaat mühendisliği için gerekli olan kadar değildir. Bu nedenle, son 20 yılda gelişen inşaat teknikleri ile %4'den %20'ye kadar lif içeren SIFCON (Slurry-infiltrated fiber reinforced concrete) adı verilen donatılı betonlar geliştirilmiştir. Sistemin esas donatıların kalıba serilmesi ve yüksek dayanımlı akışkan formdaki betonun donatıların arasına enjekte edilmesini kapsamaktadır. Yüksek lif içeriğinden ötürü, SIFCON hem dayanım hem de duktilite açısından normal lifli betonlara kıyasla daha üstün niteliklidir. SIFCON'un dayanımı matrisin dayanımının birkaç katına kadar ulaşabilir ve toklukta artış ise çok daha fazladır. Ayrıca, yüksek çelik lif içeriği eğilme yükleri altında kırılma modunun tek bir çatlak yayılmasından, düzensiz çok sayıda çatlak oluşumuna dönüştürür (Yang, vd., 2002).

SIMCON ise, sürekli çelik lif hasır içerisine özel olarak dizayn edilmiş çimento esaslı hamurun dökülmesi ile üretilen, geleneksel betona kıyasla yüksek duktilite ve yüksek dayanım gibi üstün mühendislik özellikleri gösteren kompozit bir

malzemedir. Bu nedenle, yapıların tamiri, güçlendirilmesi ve yapılarda düktilite ve/veya dayanım açısından gerekli iyileştirmeleri yapmak için oldukça uygundur (Naaman ve Homrich, 1989).

Çelik lifler betonun yapısını değiştirir ve ona plastik davranış özelliği kazandırır. Çelik lifli betonların en önemli özelliği, arttırılmış plastik davranış ve enerji yutma yeteneğidir. Kritik yüklemelerde beton iç gerilmeleri çökme sınırına geldiğinde çelik liflerin işlevi daha iyi anlaşılır. Darbe ve yorulma direnci artar.

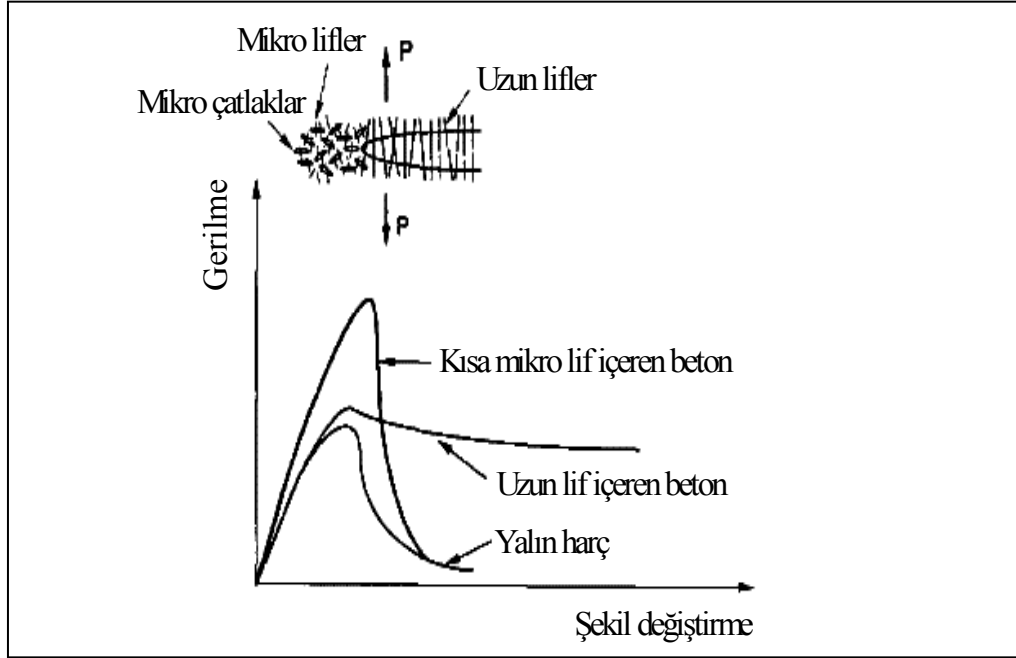
Mikro lifler;

- a) Boyutları nedeniyle matris içinde daha sık bir lif dağılımı oluşturur,
- b) Çatlakları makro düzeye gelmeden durdurur,
- c) Elastik bölgedeki davranışı iyileştirir.

Makro lifler;

- a) Elastisite modülünü, çekme ve eğilme dayanımlarını arttırır,
- b) Makro düzeydeki çatlakları kontrol eder,
- c) Maksimum yük sonrasında davranışı iyileştirir.

Matristeki çatlaklar mikro düzeyde başlar. Büyük boyutlu lifler arasındaki mesafe fazla olduğu için bu lifler mikro çatlaklar için etkili olamaz. Büyük boyutlu lifler ancak çatlaklar gelişip makro düzeye geldiği zaman etkili olur. Buna karşın; mikro lifler, çatlaklar mikro düzeyde iken arada köprü görevi görerek çatlakları durdurur. Mikro lifler matrisin hemen hemen her bölgesine dağılabilecek kadar küçük oldukları için, makro liflerin bulunmadığı ara bölgelerdeki küçük çatlakların başlamasını ve gelişimini kontrol edebilir. Betterman vd. polivinilalkol (PVA) lifler kullanarak yaptıkları çalışmada çekme gerilmesi altında lifler arası uzaklığın azalmasıyla ilk tepe yükünün arttığını göstermiştir. Mikro lifler mikro çatlakları kritik çatlak haline gelmeden durdururlar (Mobasher ve Yu, 1996). Şekil 2.21'de mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması gösterilmektedir.



Şekil 2.21 Mikro ve makro düzeydeki liflerin yine mikro ve makro düzeydeki çatlaklar arasında köprü oluşturması.

Şekil 2.21'tekine benzer biçimde mikro lifler çimento hamurunu, mezo lifler (kısa kesilmiş çelik teller) harç fazını ve uzun çelik teller ise betonu güçlendirmektedir. Bundan dolayı betonda kırılma enerjisinin artırılmasında uzun çelik tellerin narinliğinin de önemli katkısı vardır (Taşdemir, vd., 2005).

Son yıllarda çekme dayanımı 2000 MPa'ı aşan çok yüksek dayanımlı çelik lifler üretilmektedir. Yüksek dayanımlı bu liflerin kullanılmasının sağladığı üstünlük şu şekilde açıklanabilir: Betonun dayanımı arttıkça, lif ile aderansı daha yüksek olacağından çatlak oluştuğunda liflerin betondan sıyrılmaları güçleşir ve sıyrılarak ayrılma yerine kopma oluşur. Böylece, yüksek dayanımlı betonda, yüksek dayanımlı lifler kullanılması ile tepe yükü sonrasındaki davranış büyük ölçüde iyileştirilebilir (Wandewalle, 1996).

2.3.7 Priz Aşamasında Sıkıştırma Uygulamasının Etkisi

Yoğunluğun artması ile basınç dayanımının artması bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla, taze betona uygun bir basınç uygulaması yoğunluğu arttırmak için etkili bir yöntemdir. Birkaç saniye süresince uygulanan basınç sıkışık havanın elimine edilmesine, birkaç dakika boyunca uygulanan basınç fazla suyun kalıp boşluklarından uzaklaştırılmasına ve 6–12 saat süre ile uygulanan basınç da kimyasal büzülmenin dengelenmesine olanak verir. Bu işlemler yoğunluğun %5–6 oranından daha fazla artmasını sağlar (Richard ve Cheyrezy, 1995).

2.4 Reaktif Pudra Betonlarının Kullanım Alanları:

RPB, mükemmel mikroyapı özelliklerinden ötürü nükleer atıkların depolanmasında kullanılabilir (Matte, vd., 1998). Günümüzde, Avrupa’da birçok projede RPB izolasyon ve nükleer atıkların depolanmasında kullanılmaktadır. Konvansiyonel yapılara kıyasla nükleer atık yapılarının servis ömürlerinin 250 yıl gibi uzun bir süre olması istenir. Bu yapıların servis ömürleri boyunca dışarıdan gelecek tüm fiziksel, kimyasal, biyolojik etkilere karşı yüksek dayanım ve dayanıklılık göstermesi istenir. Bu noktada bu tip özel ve sıradışı üretimler için gelecekte RPB yeni ve verimli çözümler sunacaktır (Blais ve Couture, 1999).

Yurtdışında RPB uygulaması Kanada’daki Sherbrooke şehrindeki yaya köprüsüdür (Şekil 2.22). Köprü, RPB 200 betondan yapılmış uzay kafes şeklindedir. 60 metre açıklığın geçildiği köprüde alt ve üst başlıklarda RPB’den yapılmış elemanlar kullanılırken diagonal ve örgü çubuklarında çelik kullanılmıştır (Blais ve Couture, 1999).

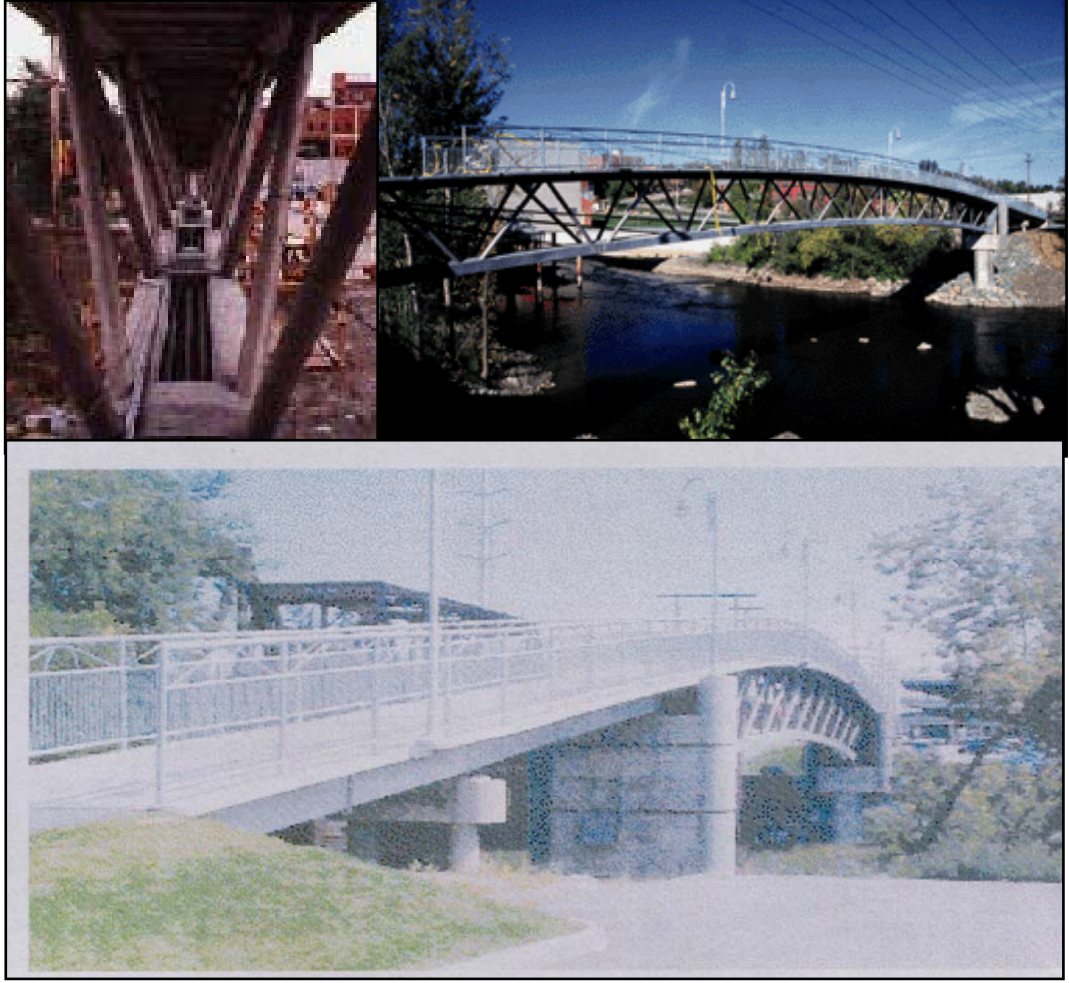
Ülkemizde RPB adına yapılan ilk çalışma İTÜ ortak çalışması sonucu İstanbul’daki İston firması tarafından üretilen yağmur suyu ızgarası ve rögar kapaklarıdır (Şekil 2.23). Bu seriden üretilen prefabrike elemanların İTÜ inşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarındaki deney sonucu bulunan zımbalama yükü

değerlerinin ortalaması 46 ton'dur. İstanbul'daki İston firmasında üretilen rögar kapağının zımbalama yükü ise ortalama 57,8 ton'dur (Taşdemir, vd., 2005).

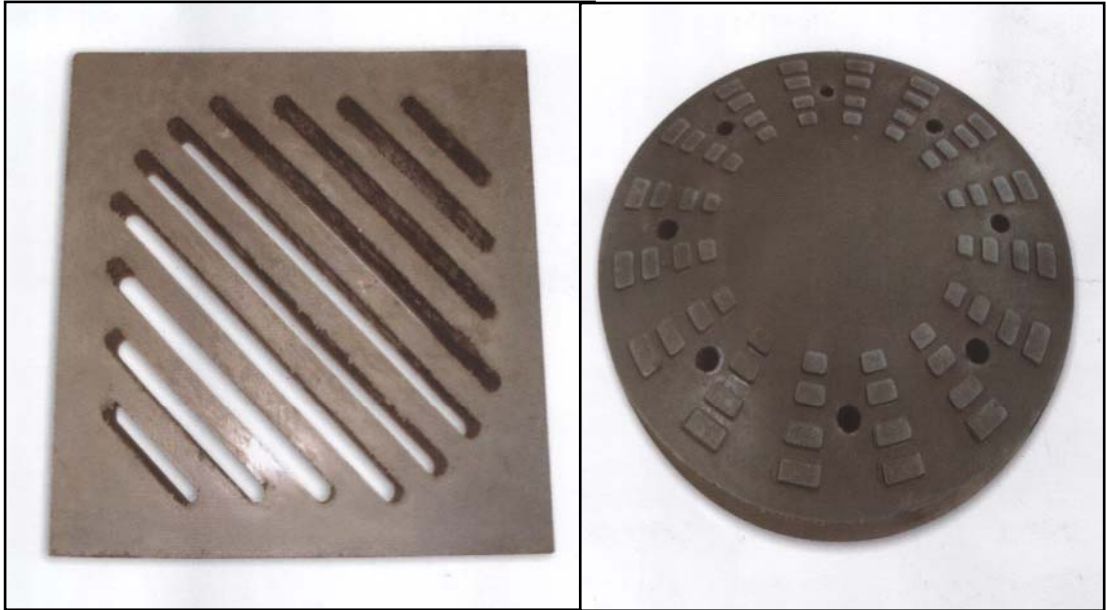
Bu sonuçlar TS 1478 EN 124'deki Grup 4, D400 sınıfına karşı gelmektedir. Bu gruptaki kaplamalar; yol kaplamaları, sert banketler ve bütün karayolu taşıtları içindir. Taksim-Elmadağ'da deneme amaçlı olarak RPB'dan yapılan yağmur suyu ızgara takımları yerleştirilmiştir (Taşdemir, vd., 2005).

Tablo 2.11 ve Şekil 2.24'de aynı moment taşıma gücüne sahip (675 kN.m) Reaktif pudra beton eleman, çelik profil, iki farklı boyuttaki öngermeli beton elemanın boyutları karşılaştırmalı olarak verilmektedir (Dauriach, 1997).

Şekil 2.24'te 1 numara ile RPB kesiti, 2 numara ile çelik profil, 3 numara ile öngermeli I kesitli betonarme eleman, 4 numara ile T kesitli betonarme eleman gösterilmiştir (Topçu ve Karakurt, 2005).



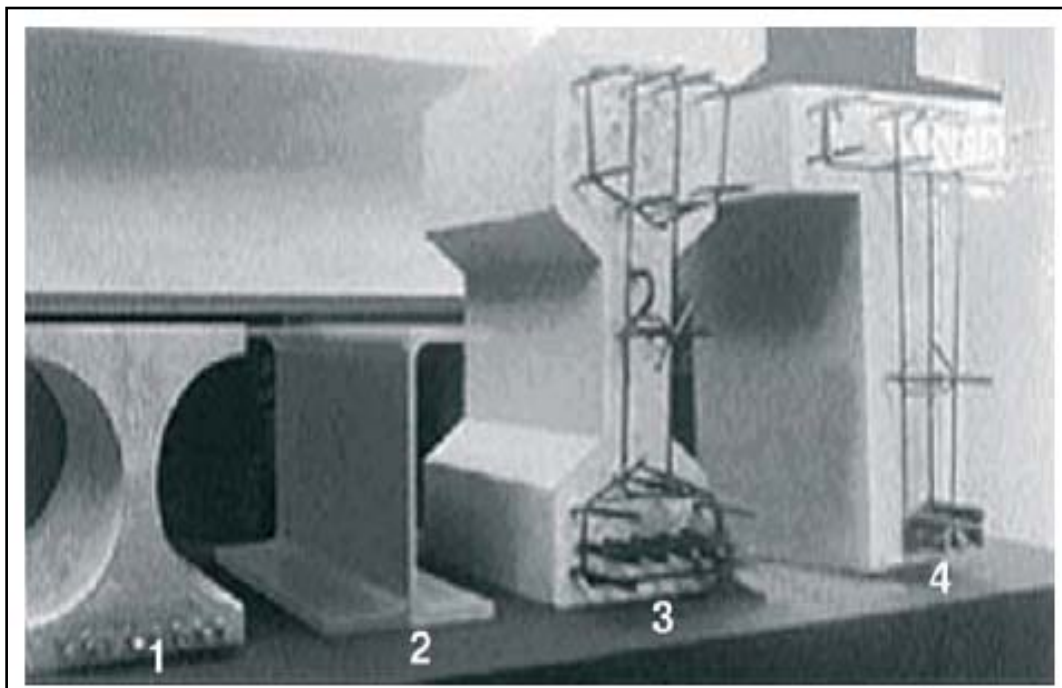
Şekil 2.22 Sherbrooke köprüsü, Quebec, Canada- Yapım aşaması ve son hali



Şekil 2.23 İston Firmasının (İstanbul) RPB'den üretmiş olduğu rögar kapağı ve yağmur suyu ızgarası

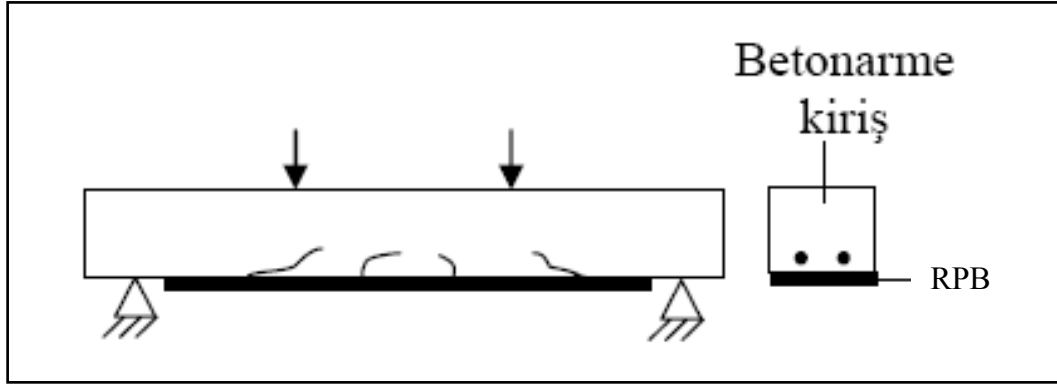
Tablo 2.11 RPB'den yapılmış Aynı moment taşıma gücüne sahip (675 kN.m) elemanların karşılaştırılması

Kesit Özelliği	RPB (X) Kesitli (1)	Çelik (I) Profili (2)	Öngerilmeli Betonarme (3)	Öngerilmeli Betonarme (4)
Yükseklik, cm	36	36	70	70
Ağırlık, kg/m	130	110	470	530



Şekil 2.24 Moment taşıma kapasitesi aynı farklı malzemelerden üretilmiş kiriş elemanları.

Reaktif pudra betonu güçlendirme alanında da yakın gelecekte kendine kullanım alanı bulacaktır. Bunla ilgili olarak Alae 2002 yılındaki çalışmasında, eğilme etkisinde çatlamış bir kirişin çekme bölgesi klasik çelik plaka yerine Reaktif pudra betondan yapılmış levha ile güçlendirilmiştir (Şekil 2.25). Kullanılmış reaktif pudra betonunda hacminin % 6 ya varan oranında kısa kesilmiş 0,15 mm çapında 6 mm ve 13 mm boyundaki çelik teller kullanılmıştır. Levhalar çatlamış kirişe özel yapıştırıcılarla tutturulmuştur. Kiriş tekrar yüklendiğinde çok yüksek dayanımlara erişmiştir (Kaihaloo, 2000; Alae, vd., 2001). Bu tür güçlendirme kayma bölgesinde de yapılmaktadır (Alae, 2002).



Şekil 2.25 Çatlamış betonarme kirişin reaktif pudra betonu ile güçlendirilmesi

Portland çimentosu ve ürünleri insanoğlu tarafından en fazla kullanılan malzemelerden biri olmasına rağmen büyük potansiyeli yeterince araştırılmamıştır. Çimento esaslı malzemelerin çok karmaşık yapılarının nano düzeyde ele alınarak daha fazla araştırılması ve duyarlı mühendislik uygulamaları sonucu yeni kuşak betonlar elde edilmektedir.

Reaktif pudra betonu da bu teknoloji ile üretilmiş özel bir betondur. RPB üretimindeki en önemli sıkıntı ise, fiyatının geleneksel betonlara kıyasla daha fazla olmasıdır. Çünkü geleneksel betonun en düşük maliyetli bileşenleri kullanılmamakta veya bu malzemelerin yerine daha pahalı malzemeler kullanılmaktadır.

Şimdilik özel şartlarda üretilen bu beton, yakın gelecekte sağladığı dayanım ve dayanıklılık nitelikleriyle beton dünyasında önemli bir yer bulacaktır.

BÖLÜM ÜÇ

BETONUN FARKLI YÖNTEMLER İLE KÜR EDİLMESİ

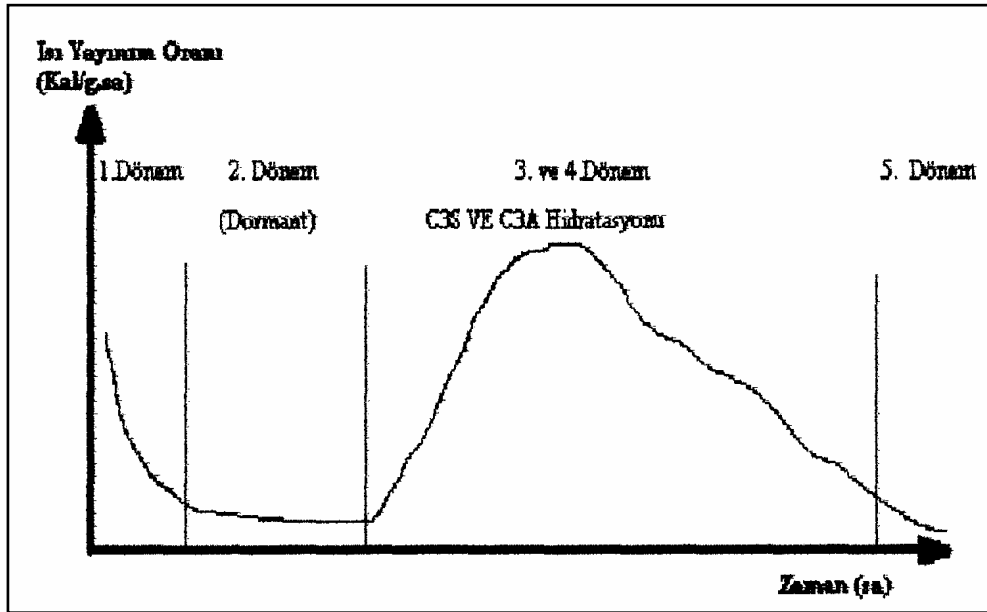
3.1 Beton Üretiminde Kürün Genel Tanımı

Beton üretiminin en önemli aşamalarından birisi de betonun kür edilmesi ve bu süreci tamamlayan işlemlerdir. Genel anlamıyla kür; betonun mukavemet kazanması için çimento hidratasyonunu ilerletmek amacıyla kullanılan yöntem ve yapılan uygulamalara verilen addır. Bu olay teknik anlamda taze çimento hamuru üzerindeki su ile dolu boşlukların çimento hidratasyonu sonucu meydana gelen ürünler ile en yüksek düzeyde doldurulması işlemidir.

Günümüzde beton ve betonarme elemanlar zaman ve işçilikten tasarruf etmek amacı ile diğer sanayi ürünleri gibi fabrikalarda seri olarak da üretilmektedir. Bu üretim yöntemi prefabrikasyondur. Yapılan bu üretim, betonun kısa zamanda kür edilmesi ilkesine dayanır. Uygulanan değişik kür yöntemleriyle betona nihai dayanımının bütününe yakın bir kısmı çok kısa bir sürede kazandırılır (Uğurlu, 1994).

Çimento esas olarak kalsiyum oksit, silisyum oksit, alüminyum oksit ve demir oksitten oluşan hidrolik bir bağlayıcıdır. Bunlar fırında yüksek sıcaklıklarda elde edilmişlerdir. Sahip oldukları yüksek enerjilerini termodinamik kanunlara uygun olarak daha düşük seviyeye indirmek isterler. Bu nedenle çimentolar, suyla temas etmeleri halinde ise bu enerjilerini geri vermeye hazır hale geçerler ve çözünürler. Böylece hidratasyon başlamış olur (Uyan, 1982).

Çimento bileşenlerinin reaksiyon hızlarının farklı olması sonucu, çimentonun tamamı başlangıçta priz almaz. Çimentonun priz almayan bileşenleri çabuk priz alan bileşenlerinden yüzde olarak daha fazladır. Bu nedenle betonun dayanımının artışı yaklaşık 25–30 gün hatta aylar ve yıllar boyunca devam eder. Betona uygulanan ısı işlemin amacı, hidrasyon hızını arttırarak priz ve sertleşme süresini kısaltmaktır. Bu işlem sırasında C_3S ve C_3A gibi hidrasyon ısısı (ve hızı) yüksek olan bileşenler ile C_2S ve C_4AF gibi hidrasyon ısısı (ve hızı) düşük olan bileşenler daha kısa sürede hidrate olurlar. Şekil 3.1’de 1. aşama olarak tanımlanan süreç su ile çimentonun temasından sonra yaklaşık ilk 5 dakikalık süre içerisinde yaşanır. “Durgunluk periyodu” da denilen duraklama sonrasında (yaklaşık 1- 2 saat sonra) hidrasyon ısısı açığa çıkma hızı en yüksek düzeye ulaşır. Bu aşama C_3S ve C_3A hidrasyonuna girdikleri devredir. Bu dönem en çok 10 saat kadar sürebilir. Daha sonraki aşamada ise hidrasyon azalarak devam eder. Betona ısı işlem uygulandığı zaman yaklaşık 10–20 saat kadar süren bu süreç 3–5 saate indirilmiş olunur (Uğurlu, 1994).



Şekil 3.1 Portland çimentosu hidrasyonu esnasındaki ısı yayılım oranı

3.2 Isıl İşlemler ile Yapılan Kürler

Prizini alan beton kirece doygun su kürü (standart kür) yanında, farklı kür yöntemleriyle de (buhar kürü ve otoklav kürü) de daha kısa sürede dayanım kazanması sağlanabilir. Kısa sürede dayanım kazanmasını sağlayan bu tür kürler genel adı ile ısıtım işlem olarak adlandırılmaktadır.

Sıcaklığın artması çimento bileşenlerinin hidratasyonu hızlandırmaktadır. Sıcaklığın hidratasyon üzerindeki bu etkinliği mukavemet gelişimini hızlandırmada ısının kullanılması fikrini oluşturmuş ve böylece ısıtım işlemler ortaya çıkmıştır.

Betonun sertleşmesinin hızlandırılmasında ısıtım işlem uygulanması 1880 senelerinde Michaelis' e kadar uzanır. Adı geçen araştırmacı ilk defa basınçlı buhar kürünü uygulayarak bu konuda bir ilk adım atmıştır. 1927'de Fransa'da Freyssinet 80–100 °C lik ısıtım işlemleri elektrik direği ve büyük boru üretimine uygulamıştır. 1931 yılında ilk uygulamalarına İsveç'de başlanan elektrikli yöntemler kısa zamanda Sovyetler Birliği (Rusya), Urallar ve Sibiryada geniş çapta kullanılmıştır. Isıtım işlem teknolojisinde kızıl ötesi ışınlar 1940 yılında, elektrik endüksiyon yöntemi ise 1948 yılında başlamıştır (Alabaş, 2002).

Isıtım işlem türlerinden, basınçlı buhar kürü (otoklav) dışında kalan bütün ısıtım işlemler 100 °C nin altında yapılır. Basınçlı buhar küründe ise sıcaklık 140–220 °C aralığında istenen bir değere getirilebilir Bu yöntemde elde edilen hidratasyon ürünleri, sıcaklığın 100 °C nin altında kaldığı ısıtım yöntemlerinden farklıdır.

Günümüze kadar gelişerek ve çeşitlenerek gelen ısıtım işlemler bugün kaldırım taşı üretiminden iki boyutlu pano, üç boyutlu hacim elemanı üretimine; küçük kiriş, kolon eleman üretiminden büyük kesitli kutu köprü elemanları üretimine kadar her dalda beton, betonarme ve ön gerilmeli beton elemanlarda yaygın uygulama bulmaktadır (Öztekın, 1980).

Beton sıcaklığının artmasına paralel olarak hidrasyon reaksiyonlarındaki hızlanma ile betonun dayanımı kısa sürede yüksek değerler alır.

Isıl işlem en genel şekilde iki değişik türde uygulanabilir. Bunlardan birincisi betonun kalıba yerleştirilmeden evvel ısıtılması, ikincisi betonun kalıbına yerleştirildikten sonra ısıtılmasıdır

3.2.1 Betonun Kalıba Yerleştirilmeden Isıtılması

Kalıba yerleştirilmeden önce yapılan ısıtmada işlemler genelde betonu oluşturan malzemelerin ısıtılmasından ibarettir. Bunların başında suyun ısıtılması gelir, Betona karıştırılacak suyun sıcaklık derecesi 50–60 °C arasında olmalıdır. Suyun 50°C lik bir sıcaklığa sahip alması betonun sıcaklığını 10°C artırabilir. Gerekirse agreganın ısıtılması yoluna da gidilebilir.

Bu konuda dikkat edilecek hususlardan birisi çimentonun hiç bir şekilde ısıtılmamasıdır. Zira çimentonun ısıtılması hidrasyondan oluşacak ısı ile birlikte karışımın sıcaklık derecesi ani olarak büyük bir yükseliş gösterir ki bu durum da betonda çatlakların oluşmasına yol açar: Ayrıca taze betonun ısıtılması (Karıştırıcı içinde, taşıma sonunda özel kapta) uygulamada ender görülen yöntemlerdir (Postacıoğlu, 1986).

Bu tür ısıl işlem yöntemleri daha çok betonun soğuk havalarda üretilmesinde uygulanmaktadır.

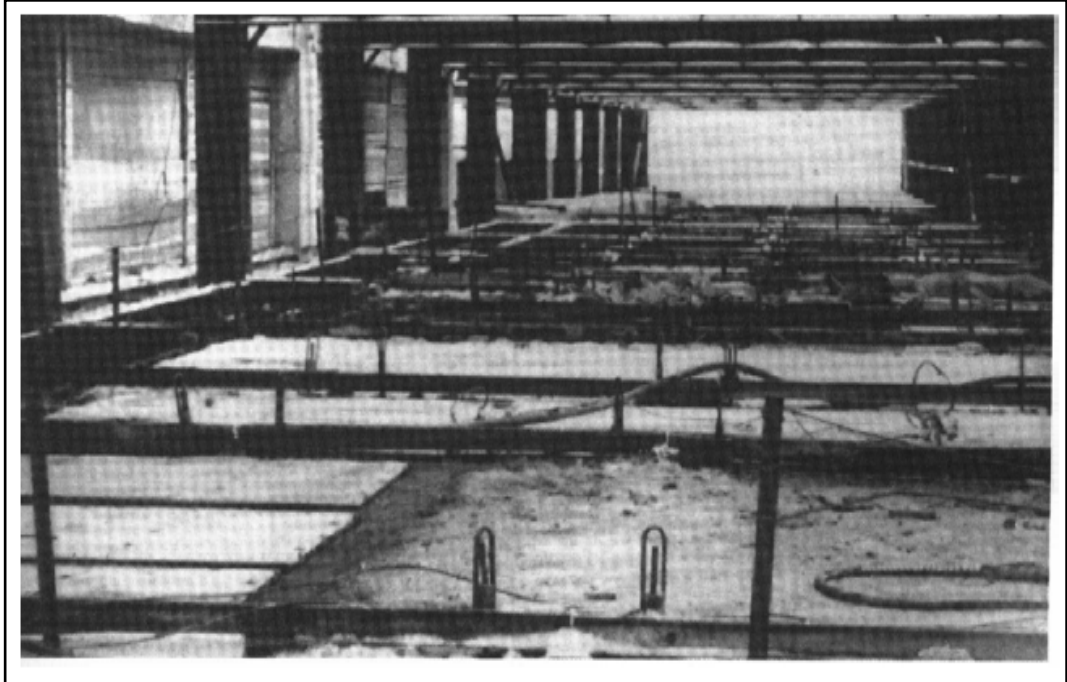
3.2.2 Betonun Yerleştirilmesinden Sonra Isıtılması

Dayanım kazanmasını hızlandırmak için betona ek rutubet ve sıcaklık sağlamak yoluyla yapılır. Bu yöntem ikiye ayrılır; bunlar iç ısıtma ve dış ısıtmadır.

İç ısıtma uygulaması en yaygın olarak elektrikle ısıtma olarak uygulanır. Dış ısıtma uygulaması en genel olarak basınçlı buhar kürü ve atmosfer basıncında buhar kürü olmak üzere iki şekilde yapılır.

3.2.2.1 İç Isıtma

İç ısıtma (elektrikle ısıtma) elektrik enerjisinin termal enerjiye dönüştürülmesi ile olur. Bu şekilde ısıtma sonunda soğuk havalarda 2,5 gün ile 4 gün arasında kalıbın alınması sağlanır. Bu amaçla betonun içine çelik çubuklar veya küçük levhalar konularak bunlara elektrik akımı verilir. Bu levhalar veya çubuklar uniform bir sıcaklığın elde edilmesini sağlayacak şekilde yerleştirilir. Genellikle sıcaklık artışı başlangıçta saate 5°C dir. 24 saat sonunda sıcaklık 50°C ye ulaştıktan sonra sıcaklık artış hızı birinci devredekinin iki misline çıkarılır. Bu şekilde 71°C dolayında bir sıcaklık elde edildikten sonra bu sıcaklık altında işleme önceden saptanan süre boyunca devam ettirilir. Süre sonunda elektrik akımı kesilerek beton soğumaya terk edilir. Şekil 3.2 de elektrikle ısıtma yöntemi uygulaması örneği gösterilmektedir (Postacıoğlu, 1986).



Şekil 3.2 Elektrik ile iç ısıtma yapılan prefabrike elemanlar

3.2.2.2 Dış Isıtma

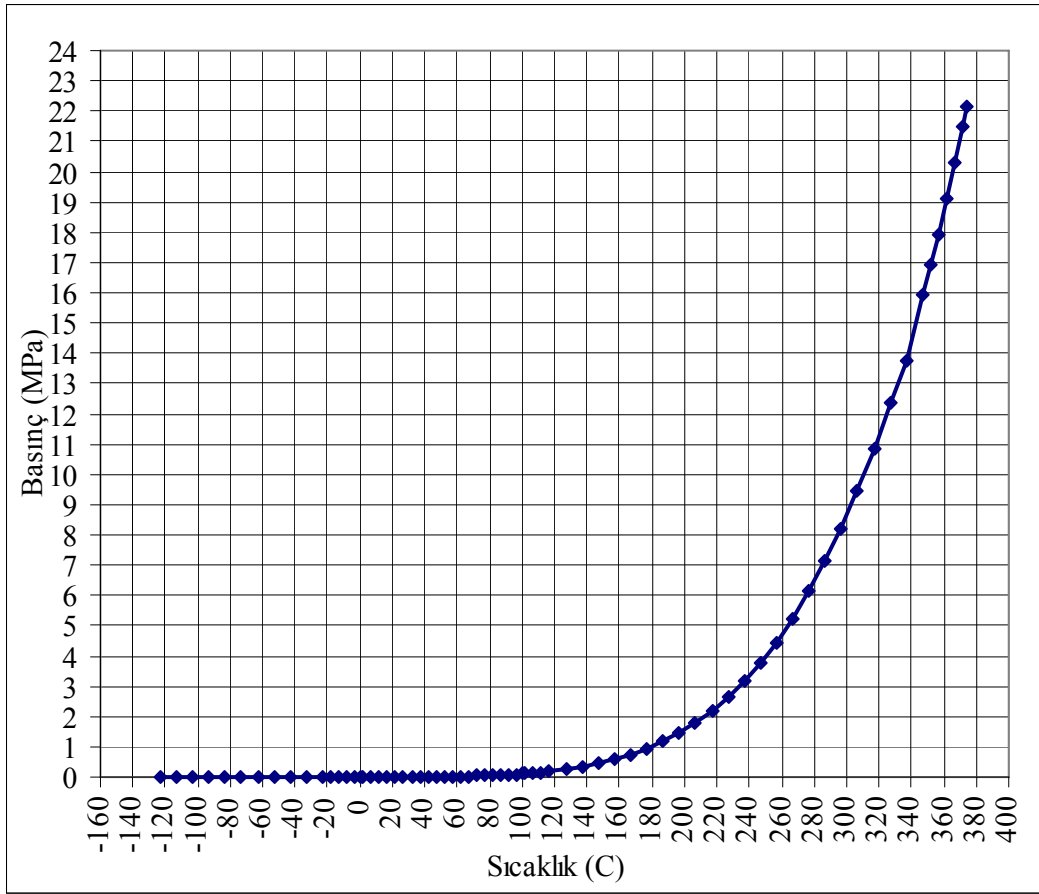
3.2.2.2.1 *Yüksek Basınç Altında Buhar Kürü (Otoklav) Tekniği*. Uygulama, yön ve sonuçları açısından bu yöntem atmosfer basıncındaki buhar küründen ve standart kürden çok farklıdır. Atmosfer basıncı altında yapılan buhar kürü uygulamasında sıcaklığın yükselmesiyle hedeflenen dayanım azalır. Bu olumsuz etkinin üzerinden gelebilmek için buhar belli değerlerde basınçla verilmesi gerekir. Bu işlemlere “Yüksek Basıncılı Buhar Kürü” denilmektedir (Hanson, 1963).

Yüksek basınçta buhar kürü (otoklav) uygulanan ürünlerde aşağıda izlenen değişimler gözlenir:

- Çok erken kazanılan dayanım: Yüksek basınçlı buhar kürü ile ulaşılabilecek 28 günlük standart kür dayanımına 24 saatte erişilebilir (Şekil 3.5).
- Yüksek dayanıklılık: Yine yüksek basınçlı buhar kürü sülfatlara ve diğer kimyasal zararlı etkilere karşı betonun dayanıklılığını artırır. Ayrıca donma çözülme ve aşınmaya karşı betonu dirençli kılar. Çiçeklenme olayı elemine edilmiş olur (Mindess 1981).

Yüksek basınç altındaki buhar küründe (otoklav kürü) kür sıcaklıkları 160 – 210°C aralığında olup 6 ve 20 atm basınçta (Şekil 3.3) uygulanır. Bu şartlarda hidratasyonun kimyası değişerek oluşan ürünler 100°C ‘nin altında yapılan buhar kürü uygulamasındakilerden farklıdır (Mindess ve Young, 1991).

Otoklav küründe, çimento hamurunda nem çıkışının önlendiği 80-100°C sıcaklıklarda, bir takım hidrotermal reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar, çimento hamurunun mikro yapısında önemli fiziksel ve kimyasal değişiklikler ile sonuçlanır. Meydana gelen faz değişikliğinin türü, CaO/SiO₂ oranına, sıcaklığa ve basıncın seviyesine bağlı olarak değişir (Khoury, 1992).

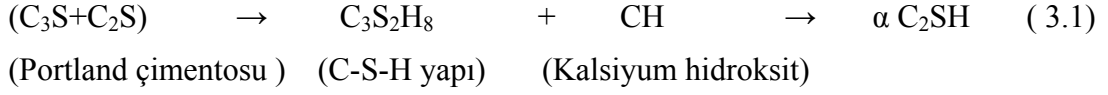


Şekil 3.3 Sıcaklık basınç ilişkisi

Yüksek sıcaklıklarda çimento hidratasyonu sonucunda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ meydana gelmesi birincil reaksiyondur. Oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ince silika parçacıklarıyla (mikro silika) reaksiyona girerek güçlü ve kararlı bir yapı oluşturur.

Hidratasyonunu tamamlamış Portland çimentosu hamurlarının CaO/SiO_2 oranı 1 ile 3 arasında değişir ve ortalama olarak 1.5 değerine yakındır. CaO/SiO_2 oranı 1.5 olan çimento hamurları $110\text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıklara ısıtılırsa zayıf $\alpha\text{C}_2\text{S}$ hidrat oluşur (Formül 3.1). Bu yapı oldukça gözenekli ve kristal yapıda olup, özgül yüzey alanının düşük olmasından ötürü düşük kohesif kuvvetlere (van der Waals) sahiptir. Bununla birlikte, CaO/SiO_2 oranı 1 olan çimento hamurları, nem kaçışının önlenmediği koşullarda $150\text{ }^\circ\text{C}$ üzerindeki sıcaklıklara ısıtılırsa güçlü bir tobermorit jeli (Formül 3.2) ve bazı mineraller oluşur (Şekil 3.4). Bu nedenle, hidrotermal reaksiyonlara maruz kalacak çimento hamurlarının CaO/SiO_2 oranının düşük olması gerektiği açıktır.

Bu durum sisteme uygun miktarda ve reaktif formda SiO_2 ilave edilerek sağlanabilir (Khoury, 1992).



Uygulanan yüksek basınçlı buhar küründe 200°C civarında tobermorit iç yapı oluşmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda CaO/SiO_2 oranına bağlı olarak Truscottile, Gyrolite, Xonotlite, Hillebrandite yapı oluşmaktadır (Richard ve Cheyreyz, 1994).

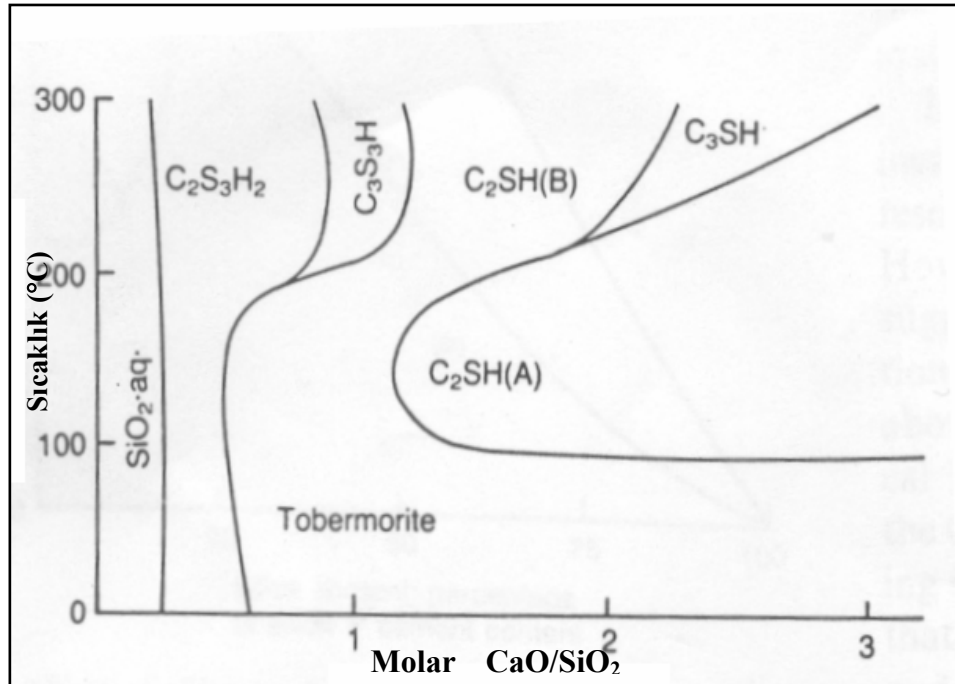
Tobermorit yapı $(\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$

Truscottile $\text{Ca}_{14}\text{Si}_{24}\text{O}_{58}(\text{OH})_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Gyrolite $\text{Na Ca}_{16}(\text{AlSi}_{23}\text{O}_{60})(\text{OH})_8 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$

Xonotlite $\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$

Hillebrandite $\text{Ca}_6(\text{Si}_3\text{O}_9)(\text{OH})_6$



Şekil 3.4 C-S-H Hidratasyon Ürünlerinin Gelişimi

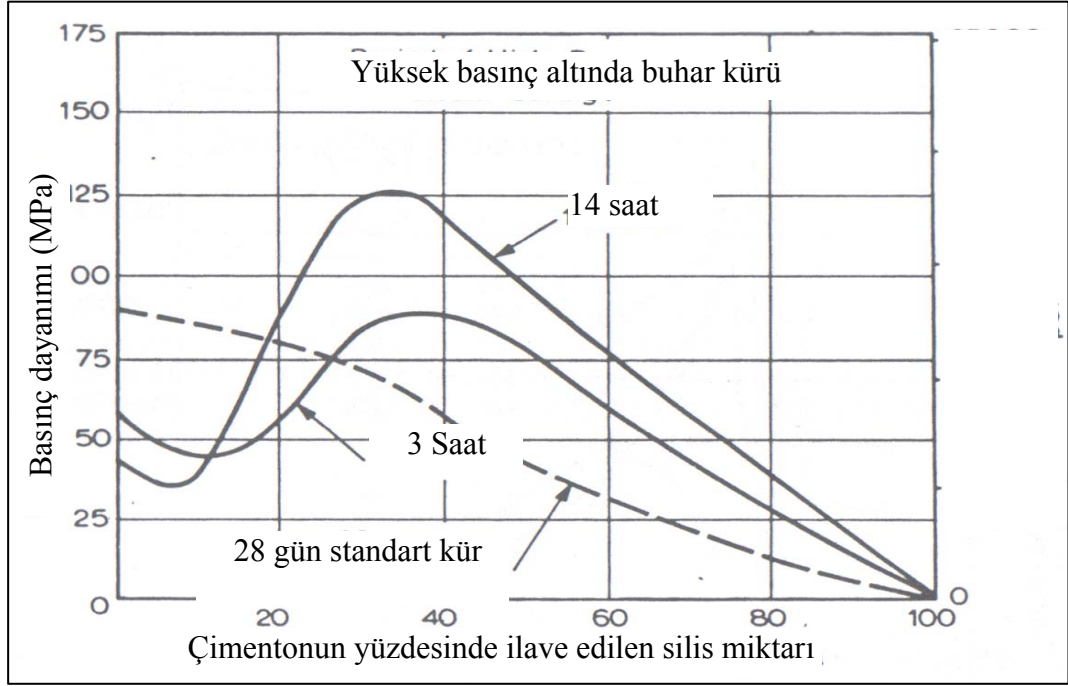
Şekil 3.4'te de görüldüğü üzere, CaO/SiO_2 oranının 1 ile 1,5 arasındaki beton dizaynlarına uygulanan yüksek basınçlı buhar kürüyle (2 MPa, $\approx 210^\circ\text{C}$) kararlı tobermorite fazının gerçekleşebileceği görülmektedir.

Eğer ürünler yalnız Portland çimentosu kullanılarak yapılmış ise otoklavlama sonunda görülen dayanımlar düşüktür (Şekil 3.5). İstenilen sonuçlar, karışımlara reaktif silis malzemesinin belirli oranlarda eklenmesiyle görülür (Mindess 1991).

Mindess'in de açıkladığı çalışmada farklı sürelerde uygulanan otoklav kürlerinde (3–14 saat) mikro silis oranına göre benzer basınç dayanımı değişimi göstereceği yani basınç dayanımı optimum mikro silika miktarına kadar artmış ve sonrasında düşüş göstermiştir. Ancak 14 saat uygulanan otoklav kürü ve optimum mikro silis miktarıyla (çimento miktarının %35 oranında silis) maksimum basınç dayanımları elde edilmiştir (Şekil 3.5). Ayrıca standart kürede mikro silis oranı arttırıldıkça basınç dayanımların düştüğü görülmektedir. Standart küre göre otoklav küründe çok erken basınç dayanım kazanımının da olduğu görülmektedir.

Yüksek buhar basıncı altında uygulanan kürede dayanım kazanımını sağlayacak sistemdeki reaktif silistir. Bu reaktif siliste karışıma katılacak mineral maddeler ile sağlanmaktadır. Şekil 3.5'ten de görüleceği üzere yapılan incelemede karışımlara çimento yüzdesinde ilave edilen mikro silis oranı arttıkça dayanımlar belli değere kadar yükselmiş sonrasında da düşmeye başlamıştır (Mindess ve Young 1991).

Sisteme ilave edilen reaktif silis sebebiyle $\text{CaO} / \text{SiO}_2$ değeri de düşürülmüştür. Sisteme pahalı bir reaktif silis kaynağı olan mikro silis koymak yerine, bağlayıcı yerine ikame edilecek mineral katkılarla sistemdeki reaktif silis oranı arttırılabilir. Böylelikle ikame edilen atık malzemeler ile (doğal puzolanlar, uçucu kül) sistemin silika ihtiyacı karşılanarak mikro silis oranı azaltıp daha ekonomik karışımlar oluşturulabilir (Mindess ve Young 1991).



Şekil 3.5 Mikro silis yüzde içeriğinin otoklav kürü ve standart kürde basınç dayanımına etkisi

Otoklav kürü sırasında ortamdaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kullanılması ve güçlü C-S-H yapısının oluşmasına bağlı olarak “Çiçeklenme” olayı minimize edilir. Bu sıcaklıklarda kalsiyum silikatlar ve tri kalsiyum alüminatın reaksiyonu sonucu sülfata dayanıklı bir yapı oluşur (Hanson, 1963).

3.2.2.2 Atmosfer Basıncı Altında Buhar Kürü Tekniği. Betonda dayanım artışının fazla olması için sıcaklık artışının yanında ortamın yeterince neme doymun olması da gereklidir. Ortamı ısıtmak için gerekli ısı, buhar kürü ile de sağlanabilir (Neville, 1997).

Yüksek basınçlı buhar kürü ise, daha önce anlatıldığı gibi farklı hidratasyon ürünleri verdiği için farklı bir süreçtir. Yukarıdaki açıklamalardan anlaşıldığı gibi “atmosferik basınç altında buhar kürü” 100°C nın altında, atmosferik basınç altında ve doymun buhar ortamında yapılan kür işlemidir (ACI 517,1970).

Buhar kürü tekniğinin amacı dayanım artışıını hızlandırarak betona kısa sürede en yüksek dayanımı kazandırmaktır. Buhar kürü yöntemi erken yaşlarda dayanımı artırmasına karşın, ileri yaşlarda dayanım kayıplarına neden olur (Mindess ve Young, 1991).

Buhar evrimin her parametresi betonun özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Kısa n bekleme süresi, yüksek sıcaklık artış hızı, yüksek işlem sıcaklığı ve süresi, yüksek soğutma hızları, ısıl işlem sonucu ileri yaşlarda dayanım kayıplarına neden olan ısıl işlem özellikleridir (Mindess ve Young ,1991).

Betonun sertleşmesini ve dayanım kazanmasını sağlayan bağlayıcı unsur olarak imento, buhar kürü uygulamasında da dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Isıl işlemle sağlanan sıcaklık artışıının hızlandırdığı reaksiyonlar çimentonun hidratasyon reaksiyonlarının normal sıcaklıktaki gelişmesi ve oluşan hidratasyon ürünleri, imento tipine, bileşimine ve özelliklerine bağlıysa ısıl işlem altındaki davranış da öncelikle aynı faktörlere bağlıdır.

Burada göz önüne alınması gerekli olan özelliklerden biri de ısıl işlemi olumsuz yönde etkileyen işlem parametrelerinin, (kısa n bekleme süresi gibi) yapı elemanlarının üretim hızını olumlu yönde etkileyerek bir çelişki yaratmasıdır. Bu yüzden ısıl işlem uygulamaları yapı elemanlarından beklenen özelliklere göre büyük çeşitlilik gösterir. Örneğin, ngerilmeli beton elemanlarda yapı güvenliği nedeniyle yumuşak çevrimler yeğlenirken, beton duvar elemanlarında maliyet nedeniyle daha sert çevrimler uygulanabilir. Diğer bir değişle tüm elemanlar için optimum bir çevrimden söz etmek olanak dışıdır (Alabaş, 2002).

Daha önce sözü edilen fiziksel kusurlara neden olan aşırı su kaybı ise, buhar kürü uygulaması ile önemli ölçüde önlenebilmektedir. Basit bir teknolojiye sahip olduğu için tercih edilen buhar kürü uygulamasında, ortamı % 100 bağıl nemle doyurmak pek mümkün olmamaktadır. Bunun yanında hidratasyon ısısı sonucu beton

sıcaklığının ortam sıcaklığının üstüne çıkabilmesi, beton serbest suyu buhar basıncının ortamdaki kısmi buhar basıncından yüksek olmasına ve beton suyunun buharlaşmasına neden olabilir (Öztekin, 1977).

Buhar kürünün amacı betonun dayanım kazanmasını erken yaşlarda hızlandırmaktır. Yüksek sıcaklıkların dayanım gelişimi için gerekli kimyasal reaksiyonları hızlandırdığı bilinmekle birlikte, bazı sınırlamalar getirilmesi gereklidir, aksi halde beton bu işlemde yarardan çok zarar görebilir.

Pratikte uygulanan ısı işlem çevrimlerini üç grupta toplamak mümkündür. (Öztekin 1980).

3.2.2.2.2.1 Hızlı (Sert) Buhar Kürü Çevrimleri. Isıl işlem sıcaklığı 80–90 C olan ve toplam çevrim süresi ise 6-7 saat süren çevrimlerdir. Hızlı çevrimlerde ön dinlendirme süresi 1 saat veya daha az, sıcaklık yükseltme ve soğutma hızı ise 30°C/saat civarındadır.

3.2.2.2.2.2 Orta (ılımlı) Buhar Kürü Çevrimleri. İşlem sıcaklığı 70 °C civarında olan ve toplam çevrim süresi 9–11 saat süren ısı işlem çevrimleridir. Bu çevrimde ön dinlendirme süresi 2–3 saat olup ısıtma ve soğutma hızları 15–20 °C/saat civarındadır. Kürden çıkan beton eleman sıcaklığı 30–40 °C iken kalıp alınabilir.

3.2.2.2.2.3.Yavaş (Yumuşak) Buhar Kürü Çevrimleri. İşlem sıcaklığı 55–60 °C' yi aşmayan ve toplam süresi 20–22 saat olan çevrimlerdir. Ön dinlendirme süresi 4 saat olup sıcaklık yükseltme ve soğutma hızları ise 10 °C/saat dolayındadır.

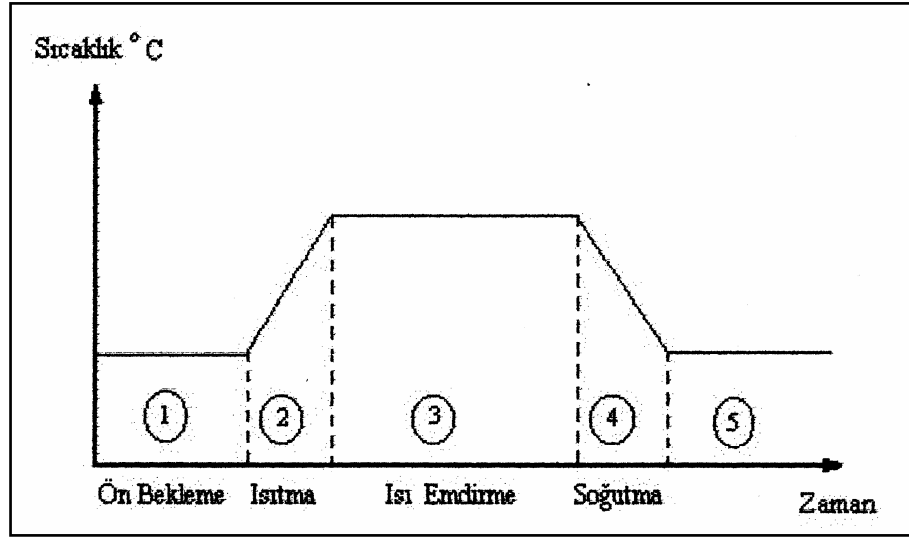
Betonun kalıba dökülmesi ile buhar kürü uygulamasına kadar geçen süre ile tanımlanan süreç ön dinlendirme sürecidir. Şekil 3.6'de 1 ile numaralandırılmış bölgedir. Ön dinlendirmeden amaç, çimento hidratasyonunun bir kısmının

başlamasına izin vererek, çimento hamuru fazına jelleşme doğrultusunda başlangıç kararlılığını kazandırmaktır. Ön dinlendirme sürecinin bir amacı da, betonun daha sonra maruz kalacağı termal genişlemelere karşı yukarıda açıklandığı üzere, kararlı bir iç yapı meydana getirmesini sağlamaktır. Özellikle ön bekletme süresinin çok kısa olduğu hızlı çevrimlerde, betonun kohezyonu su ve hava fazlarının genişlemelerini önlemeye yetersizdir, bu işlem döneminde hızlı hidrasyona giren beton içerisindeki fiziksel olarak bağlı suyu kullanmadan sertleşir. Böylece başlangıçtaki kararsız yapı sertleşme sonrasına da taşınmış olunur. Bu nedenle ön bekletme süresi ne kadar uzunsa, priz ve sertleşme o kadar ilerler, hacim artışı da o oranda az olur (Öztek, 1980).

TS 3648'de (Ön Yapımlı Beton Elemanlarda Atmosfer Basıncı altında Buhar küre Uygulama Kuralları 1984) Ön yapımlı elemanlar için bu süreyi 1- 7 saat; kütleleri fazla dolu elemanlarda ise en az 3 saat buhar küre öncesi bekleme uygulanması istenmiştir. Ayrıca bu işlemin rüzgâr ve güneşin etkilerinden uzak 5–30 °C arasında yapılması öngörülmüştür. (Alabaş, 2002)

Hidrasyon ısı yüksek olan çimentolar kullanıldığında, s/ç oranı yüksek olan elemanlarda ve beton karma işleminin yapıldığı ortamın soğuk olduğu durumlarda (0 -10 °C) buhar küre öncesi bekleme süreleri daha uzun tutulmalıdır (TS 3648, 1984)

Isıl işlemin ilk halkasını oluşturan bu süreç, kendisinden sonra gelen sıcaklık yükselmesi aşaması ile yakından ilgilidir. Ön dinlendirme süresi genel olarak çimento cinsine, su/çimento oranına beton elemanların kütlesine oranına ve beton üretilen yerin ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bazı kaynaklarda bu sürenin en az 3 saat olması gerektiği, optimum sürenin ise 7 saat olduğu belirtilmektedir (ACI 517, 1980).



Şekil 3.6 Tipik Buhar Kürü Çevrimi

Ancak buhar kürü uygulanan numunelerde ileri yaşlarda görülen dayanım kazancındaki bu azalmanın derecesi başlangıçtaki buhar kürü koşullarıyla ve beton karışım-işleme özellikleriyle yakından ilgilidir. Buhar kürünün doğru uygulamalarından sonra 28 günlük dayanımdaki kayıp önemsenmeyecek ölçüde kalır (TS 3648, 1984).

Çimentonun ana bileşenlerinden C_3S 'in oranının yüksek olması buhar kürünü olumlu etkilemektedir. Artan C_3S oranı ile ilk dayanım hızlı olarak artmaktadır. İlk dayanımın önemli olduğu durumlarda C_3S oranının %50–60 arasında bulunması optimum değer olarak kabul edilmektedir. C_3S içeriği fazla olan çimentoların 80–85 °C civarında kısa süreli çevrimlere uygun olduğu düşünülmektedir (Alabaş, 2002).

Buhar kürü altında C_2S içeriği fazla olan çimentolar yüksek ilk dayanım yerine 20°C 28 günlük dayanımla kıyaslandığında, ileri yaşta bu tür çimentolarda dayanım kaybının daha düşük olduğu görülmektedir. C_2S oranı yüksek çimentoların buhar kürü altında iyi sonuç vermesi için çevrim sıcaklığının yüksek, işlem süresinin uzun, inceliğin yüksek olması gerekli olmaktadır (Alabaş, 2002).

C_3A 'nın optimum miktarı konusunda % 2–4 den % 15' e kadar çok farklı değerler ileri sürülmektedir. Bunun temel nedeni, C_3A 'nin erken ve ileri yaştaki dayanımlar üzerine ters etki yapmasıdır. C_3A oranı belli sınırlar içinde arttıkça, ilk dayanım yükselmekte 28 günlük dayanım düşmektedir. C_3A oranı için üst sınır artan SO_3 yüzdesiyle, azalan incelik ve azalan işlem sıcaklığı ile artabilmektedir. Özellikle zararlı etkilere maruz kalacak ısıtılmış betonlarda C_3A 'nın % 4'ü geçmemesi istenmektedir. Buhar kürü çevrimi açısından C_3A oranı arttıkça sıcaklığın azalması gerektiği ileri sürülmektedir. Buhar kürü yapılacak çimentolarda C_3A miktarının minimum olması dayanım ve durabilite açısından önemlidir.

Alışılmış sınırlar içinde kalındığı sürece C_4AF miktarının ısıtılmış olumlu veya olumsuz etkilemediği kanısı yaygın görünmektedir.

Optimum çimento inceliği için 3500–4000 cm^2/g özgül alana sahip çimentolar uygun olmaktadır. Yüksek inceliğin ilk dayanımları arttırdığı buna karşılık ileri yaşta dayanım kaybına yol açtığı görülmektedir. C_3A gibi reaksiyon hızı yüksek bileşeni zengin olan çimentolarda inceliğin düşük, buna karşılık C_2S gibi reaksiyon hızı düşük olan çimentolarda inceliğin yüksek olması tartışılan görüşler arasındadır. Sonuçta buhar kürü uygulanacak betonlarda incelik dikkate alınmalı ve incelik arttıkça işlem süresi kısalmaktadır (Öztek 1980).

Buhar kürü altındaki davranışı daha da olumlu kılmak ve ilk dayanımı yükseltmek için yüksek incelik, optimum klinker bileşimi ve yüksek sıcaklıkta işlem çoğunlukla önerilen faktörlerdir.

Buhar kürü uygulanacak çimentoların aşağıda belirlenen özelliklere sahip olması istenilen hedefler için faydalı olmaktadır;

- C_3S miktarı % (55 -60) arasında olmalı,
- C_3S / C_2S oranı (3) den büyük olmalı,
- C_3A miktarı % 10' u geçmemeli,
- C_4AF miktarı % (5 -15) arasında kalmalı,
- SO_3 miktarı % 3 den küçük olmalı,
- Blaine özgül alanı $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ den büyük olmalıdır (Postacıoğlu, 1986).

Standart kür dışında yukarıda anlatılan hızlandırılmış kür yöntemlerinden buhar kürü, ısı ve nemin beton elemanlarda özel ekipmanlar gerektirmeden en ekonomik ve etkin şekilde temin edildiği bir yöntem olduğu için yaygın ısı işlem uygulamasıdır. Diğer yandan otoklav küründe kısa sürede kazanılan erken dayanıma avantajının yanında, ilk yatırım maliyetinin yüksekliği otoklav kürünün ancak özel uygulamalarda kullanılmasını zorunlu kılmıştır.

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Karışımlarda Kullanılan Malzemeler

Betonun basınç dayanımı birçok faktörün etkisi altındadır. Gerek kullanılan malzemeler gerekse üretim aşamasında ve kür şartları altındaki farklılıklar belirgin dayanım değişiklikleri ortaya çıkarmaktadır. Bazen aynı agrega ve aynı çimento kullanılmasına, bileşimde ve üretim aşamalarında değişiklik yapılmamasına karşın elde edilen beton dayanımları birbirinden farklı olarak geniş bir aralık içerisinde değişmektedir. RPB gibi yüksek dayanımlar veren betonlarda ise sürekliliğin sağlanması adına seçilen malzemelerde daha titiz olmayı ve kontrollü bir çalışmayı zorunlu kılmaktadır.

Reaktif pudra betonlar, bazı farklı nitelikteki malzemelerin kullanımı ve yeni tekniklerin uygulanmasıyla geliştirilmiş üstün içyapı ve mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Reaktif pudra betonların üretiminde süper akışkanlaştırıcı katkı, silis dumanı, çimento, çelik lifler ve iyi nitelikli agregalar kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

4.1.1 Çimento

Bu çalışmada kullanılan Portland çimentosunun (CEM I 42,5) Modern Beton firması tarafından verilen, malzemenin fiziksel ve kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1 Kullanılan çimentonun fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri:

Kimyasal kompozisyon (%)		Çimentonun fiziksel özellikleri	
		Özgül ağırlık	3.13
SiO ₂	20.05	Başlangıç priz süresi (dak)	130
Al ₂ O ₃	5.62	Priz bitiş süresi (dak)	210
Fe ₂ O ₃	2.17	Hacim genleşmesi (mm)	1.00
CaO	62.92	Özgül yüzey (Blaine) (m ² /kg) 380	
MgO	1.14		
Na ₂ O	0.30		
K ₂ O	0.85		
		Çimentonun basınç dayanımı (MPa)	
SO ₃	2.92	2 gün	29.9
Cl ⁻	0.0096	7 gün	43.2
Kızdırma kaybı	3.84	28 gün	51.9
Çözünmeyen kalıntı	0.63		
Serbest CaO (%)	0.52		

4.1.2. Mineral Katkılar

Büyük bir çoğunluğu endüstriyel yan ürünlerden oluşan mineral katkıları, betonların özellikle dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesi için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan mineral katkıların (mikro silis, uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu) fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

4.1.2.1 Silis Dumanı

Bu çalışmada kullanılan mikro silis malzemesinin YKS Degussa firması tarafından verilen fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.2 'de verilmiştir.

Tablo 4.2 Kullanılan mikro silisin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	92,26
Al ₂ O ₃	0,89
Fe ₂ O ₃	1,97
CaO	0,49
MgO	0,96
Na ₂ O	0,42
K ₂ O	1,31
SO ₃	0,33
Cl ⁻	0,09
Özgül Ağırlık	2.30
Blaine	20000 m ² /kg
0,045 mm den küçük partikül oranı	<0%40
28 günlük puzolanik aktivite indeksi (%) ASTM C311 silis dumanı	115

4.1.2.2. Uçucu Kül

Bu çalışmada çimento yerine ikame edilen uçucu küller Soma B Termik Santralinden temin edilmiş C sınıfı uçucu küllerdir. Bu küllerin temin edildiği firmadan alınan kimyasal analizler Tablo 4.3'te verilmiştir. Karışıma katılmadan, uçucu küller 0,25 mm'lik elekten yeniden elenmiş, içinde değişkenlik oluşturacak taş parçası, toprak ve bitkisel artıklardan temizlenmiştir.

Tablo 4.3 Bu çalışmada kullanılan uçucu külün fiziksel kimyasal ve mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon (%)			
SiO ₂	42.1	Kızdırma kaybı	1.3
Al ₂ O ₃	19.4	Çözünmeyen kalıntı	--
Fe ₂ O ₃	4.6	Serbest CaO (%)	4.3
CaO	27.0		
MgO	1.8	Blaine inceliği (m ² /kg)	290
Na ₂ O	--		
K ₂ O	1.1	28 günlük Puzolanik aktivite indeksi (%)	
SO ₃	2.4	(%), ASTM C 311	
Cl ⁻	--	Uçucu kül	88

4.1.2.3. Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Bu çalışmada çimento yerine ikame edilen öğütülmüş yüksek fırın cürufu Karçimsa Çimento fabrikasından temin edilmiştir. Kullanılan cürufun üretici firma tarafından temin edilen kimyasal analizleri Tablo 4.4’de verilmiştir.

Tablo 4.5’te de tüm bağlayıcı malzemelerin (çimento, mikro silis, uçucu kül, yüksek fırın cürufu) kimyasal özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 4.5’ten görüleceği üzere kullanılan mineral katkılardan mikro silis çimentodan çok daha ince yapıya sahiptir. Diğer yandan çimento yerine ikame edilen uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun da çimento inceliğine yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4.4 Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (YFC) kimyasal analizi

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	39,66
Al ₂ O ₃	12,94
Fe ₂ O ₃	1,58
CaO	34,20
MgO	6,94
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	1,44
Cl-	
Ateş Zayıtı	+1,20
TOPLAM	97,68
Özgül yüzey (m ² /kg)	396
Hidrolik index [(CaO+1,40*MgO+0,56*Al ₂ O ₃)/SiO ₂]	1,29
Rutubet (≤ 18)	9,60
CaO + SiO ₂ + MgO (> 66,7)	80,80
(CaO + MgO) / SiO ₂ (> 1,0)	1,04

Tablo 4.5 Kullanılan mineral katkıların kimyasal analiz karşılaştırılması

Kimyasal içerik (%)	Çimento	Mikro Silis	Uçucu Kül	Yüksek Fırın Cürufu
SiO ₂	20.05	92.26	42.14	39,66
Fe ₂ O ₃	2.17	1.97	4.64	1,58
Al ₂ O ₃	5.62	0.89	19.38	12,94
CaO	62.92	0.49	26.96	34,20
MgO	1.14	0.96	1.78	6,94
K ₂ O	0.85	1.31	1.13	1,44
Na ₂ O	0.30	0.42	-	0,20
SO ₃	2.92	0.33	2.43	-
Klor	0.0096	0.09	-	-
Serbest CaO	0.52	-	4.34	-
Özgül yüzey (m ² /kg)	380	20000	290	396

4.1.3. Agregas

Agrega içerisinde bulunan organik maddeler (çoğunlukla zirai ve toprak kökenli), kil toprakları, kömür linyit taneleri, klor iyonları, sülfat varlığı beton dayanımını ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilediğinden bu çalışmada kullanılan agregalar temiz şekilde paketlerde temin edilmiş, yabancı maddelerden ve nemden korunmuş, laboratuvar koşullarında özel olarak saklanmıştır.

Bu çalışmada, 3 farklı granülometride (0–400µm; 0,60mm- 1,2mm; 1mm -3 mm) paketlenmiş kuvars agregası kullanılmıştır. Kuvars madeni Salihli Kaletape mevkiindeki Pomza Export firmasının kuvars tesislerinden temin edilmiştir.

Kullanılan kuvars agregasının, temin edildiği firmadan alınan kimyasal analiz değerleri Tablo 4.10'da verilmiştir. Kuvars agregası tip 1, üretici firma tarafından 1 mm -3 mm olarak verilen kuvarsın granülometrik dağılımı Tablo 4.6'da; Kuvars agregası tip 2, üretici firma tarafından 0,60 mm- 1,2 mm olarak verilen kuvarsın granülometrik dağılımı Tablo 4.7'de; Kuvars agregası tip 3, üretici firma tarafından 0–400µm olarak verilen kuvarsın granülometrik dağılımı da Tablo 4.8'da verilmiştir. Karışımın granülometrik dağılımı Tablo 4.9 'de ve granülometri eğrisi de Şekil 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.6 Kuvars Tip 1 (1mm-3 mm) agregasının granülometri analizi

Elek NO	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
4 mm	-	-	0	100
2 mm	375	375	37,5	62,5
1 mm	620	995	99,5	0,5
0,5 mm	-	995	99,5	0,5
0,25 mm	-	995	99,5	0,5
0,063 mm	-	995	99,5	0,5
Elek altı	5	1000	100	0

Tablo 4.7 Kuvars Tip 2 (0,60 mm -1,2 mm) agregasının granülometri analizi

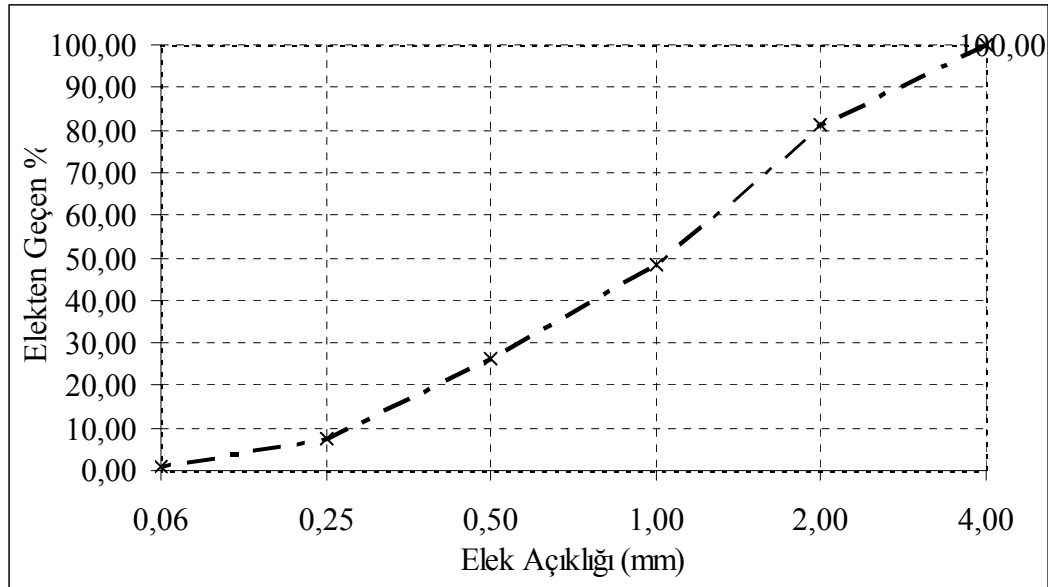
Elek NO	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
4 mm	-	-	0	100
2 mm	-	-	0	100
1 mm	67	67	6,7	93,3
0,5 mm	884	951	95,1	4,9
0,25 mm	23	974	97,4	2,6
0,063 mm	21	995	99,5	0,5
Elek altı	5	1000	100	0

Tablo 4.8 Kuvars Tip 3 (0 -0,4 mm) agregasının granülometri analizi

Elek NO	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
4 mm	-	-	0	100
2 mm	-	-	0	100
1 mm	-	-	0	100
0,5 mm	-	-	0	100
0,25 mm	730	730	73	27
0,063 mm	241	971	97,1	2,9
Elek altı	25	1000	100	0

Tablo 4.9 Kullanılan kuvars agregasının karışım içindeki oranlarına göre tane dağılımı

Elek No (mm)	Elekten geçen			Karışım
	0 - 0,4mm	0,6mm - 1,2mm	1mm-3mm	
4,00	100	100	100	100
2,00	100	100	62,5	81,25
1,00	100	93,3	0,5	48,58
0,50	100	4,9	0,5	26,48
0,25	27	2,6	0,5	7,65
0,06	2,9	0,5	0,5	1,1
E.A	0	0	0	0
Karışım Oranları				
0 - 0,4mm	0,6mm - 1,2mm	1mm-3mm		
% 25	% 25	% 50		



Şekil 4.1 Kullanılan kuvars agregasının granülometrik eğrisi

Tablo 4.10 Kuvars agregasının kimyasal analizi

Kimyasal içerik (%)	%
SiO ₂	99,79
Fe ₂ O ₃	0,022
Al ₂ O ₃	0,06
CaO	0,020
MgO	0,010
K ₂ O	0,01
Na ₂ O	0,02
SO ₃	-
Klor	-
Özgül ağırlık (0 mm - 0,40mm)	2,55
Özgül ağırlık (0,60mm - 3 mm)	2,65

Kuvars agregası dışında iki tip tane dağılımında bazalt agregası kullanılmıştır. Tip 1 ve Tip 2 diye adlandırılan agrega tiplerinden Tip 1, 4mm-8mm tane aralığını; Tip 2, 0,5 mm–4 mm tane aralığını temsil etmektedir. Kullanılan bazaltın granülometrik dağılımı Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.11 Bazalt agregası tip1 (4 -8 mm) agregasının granülometri analizi

Elek NO	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
16	0	0	0	100
8	319	319	27	73
4	832	1151	96	3,6
2	43	1194	100	0,0
1	0	1194	100	0,0
0.5	0	1194	100	0,0
0.25	0	1194	100	0,0
E.A.	0	1194	100	

Tablo 4.12 Bazalt agregası tip 2 (0,5 -3 mm) agregasının granülometri analizi

Elek NO	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Elekte Kalan (%)	Elekten Geçen (%)
16	0	0	0	100
8	0	0	0	100
4	7	7	1	99
2	210	217	22	78
1	283	500	51	49
0.5	199	699	72	28
0.25	129	828	85	15
E.A	147	975	100	

4.1.4. Süper akışkanlaştırıcı katkı

Bu çalışmada YKS-Degussa firmasının süper akışkanlaştırıcı katkısı Glenium ACE30 kullanılmıştır. Kullanılan katkı polikarboksilik esaslı süper akışkanlaştırıcıdır. Özel molekül konfigürasyonu çimento hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Katkı maddesini çimento tanesi üzerine hızlı absorpsiyonu, etkili bir dispersiyon etkiyle birlikte, çimento taneciklerinin yüzeyini genişleterek suyla reaksiyonunda yardımcı olmaktadır. Üretici firma tarafından verilen süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin teknik özellikleri Tablo 4.13'te verilmiştir.

Tablo 4.13 Süper akışkanlaştırıcı Glenium ACE 30 katkısının teknik özellikleri

ACE 30 Teknik Özellikleri	
Yoğunluk (gr/cm ³) (20 °C)	1,06-1,07
Klor % (EN 480-10)	<0.1
Renk	Kahverengi
Kimyasal içeriği	Sentetik polimer esaslı

4.1.5 Çelik Lifler

RPB'lerin normal betonlara kıyasla gevrek bir yapıya ve daha az şekil değiştirme yeteneğine sahip oldukları bilinmektedir. RPB'larının sünek bir yapıya kavuşturulması, uygulama alanlarının artırılması açısından önemli bir unsur teşkil etmektedir. Gevrek davranışa sahip RPB'ların enerji yutma kapasiteleri lif kullanılmasıyla arttırılabilmektedir.

Bu çalışmada hacimce %3 oranında Beksa-Dramix, çelik lifleri kullanılmıştır. Bu lifler, 6 mm boyunda olup 0,15 mm çapındadırlar. Narinliği 40 olan bu lifleri çekme dayanımları 1100 MPa dır.

4.1.6.Karışım Suyu

Karışımında kullanılacak suyun kalitesi betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkiler. Beton karma suyu asidik özellik taşımamalıdır. Sülfat, belirtilen miktardan fazla tuz, yağ, organik maddeler gibi betona zarar verebilecek kimyasal maddeler içermemelidir. TS 1008'de beton içerisinde kullanılacak karışım suyunun nitelikleri hakkında bilgi vermektedir.

Bu çalışmada kullanılan karışım suyu buhar kürü, otoklav kürü ve standart kürde kullanılan su içilebilir nitelikteki musluk suyudur.

4.2 Beton üretimi

Bu çalışmada değişkenliğin çokluğundan dolayı yapılan incelemelerde, konu dışındaki diğer tüm değişkenler sabit tutularak, tek bir değişken üzerinde seri deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda deneyler devam ettirilmiştir.

Çalışmada öncelikle karışımları oluşturacak agreganın tipi ve granümetrisi üzerine ön çalışmalar yapılarak başlanmıştır. Bu çalışmalar devamında kullanılacak kürlerin tipleri ve süreleri belirlenmiştir. Sonrasında karışımlar için en uygun silis dumanı oranı incelenmiş ve en fazla basınç dayanımı veren silis dumanı içeriği belirlenmiş ve bundan sonraki deneyler için kontrol karışımı oluşturulmuştur.

Çalışmanın ilerleyen aşamalarında bağlayıcı yerine, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi mineral katkıları, tek tek ya da kombinasyonlarıyla ikamesi incelenmiştir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi puzonik özellikleri zayıf mineral katkıları ile sisteme ek silis sağlanmıştır. En yüksek basınç dayanımını sağlayan CaO/SiO₂ oranına göre mineral katkıları ile silisi zenginleşen karışımlardaki reaksiyona girmeyen fazla silis dumanı sistemden geri çekilmiştir.

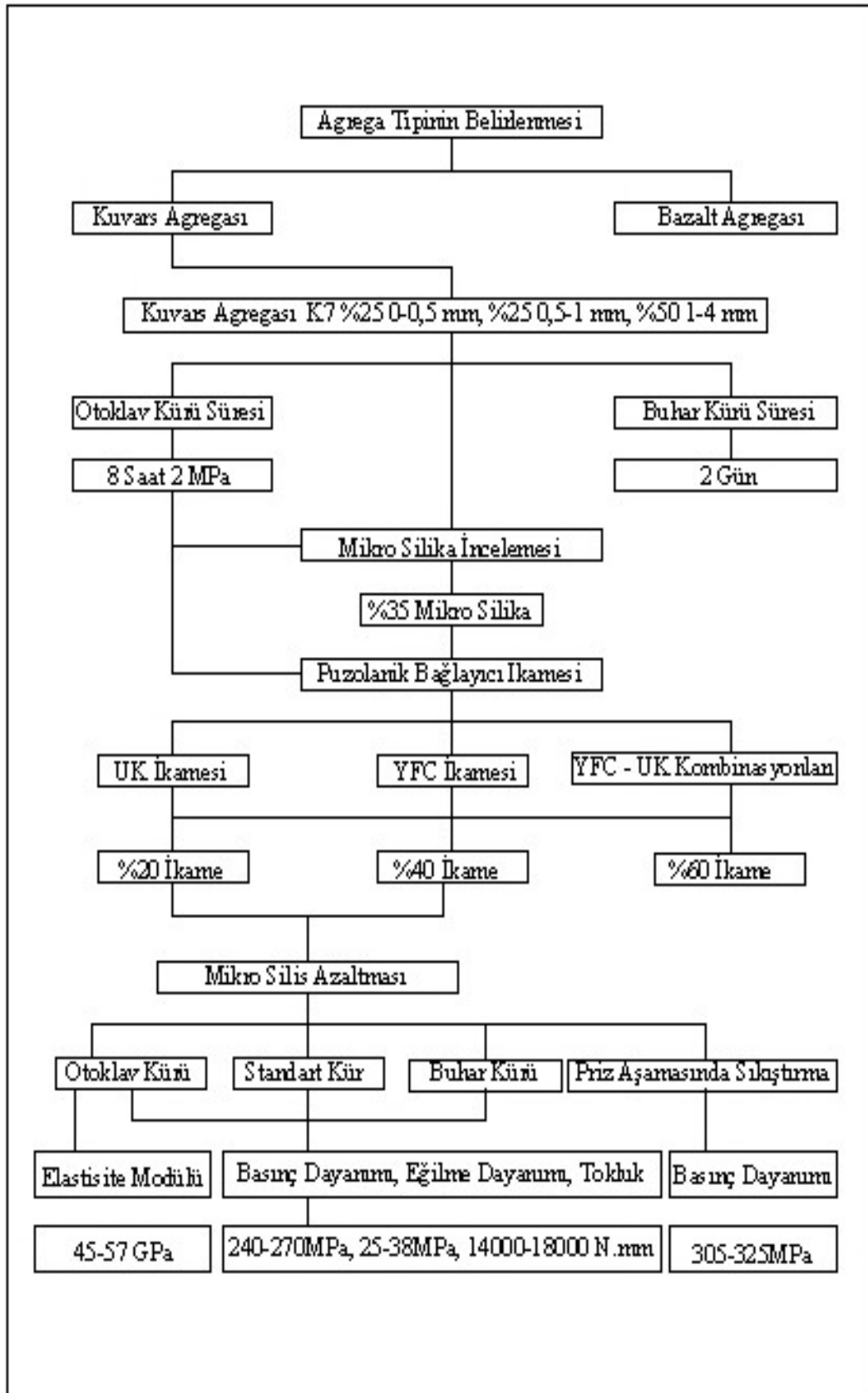
Sonuçta aynı dayanımı verebilecek ancak bünyesinde bağlayıcı yerine mineral katkıların ikame edilmiş ve daha az silis dumanı bulunan karışımlar oluşturulmaya çalışılmıştır. Sonrasında mineral katkı ile geliştirilen bu karışımların farklı kür koşulları altındaki mekanik özellikleri (eğilme, basınç dayanımları, tokluk değeri ve elastisite modülleri) incelenmiştir.

Çalışmada son olarak mineral katkılarla geliştirilen karışımlara priz aşamasında sıkıştırma uygulamasıyla otoklav kürü altında dayanım değerlerindeki artışlar gözlenmiştir.

Çalışma süresince yapılan incelemelerde hazırlanan karışımların dizaynları kg ve m³ olarak ilgili tablolarda verilmiştir. Ayrıca hazırlanan karışımların sahip oldukları kıvamları hakkında bilgi vermesi açısından yayılma tablası değeri de dizayn tablolarında belirtilmiştir.

Karışımı oluşturan malzemelerin özgül ağırlıkları farklılıklar göstermektedir. Karışım dizaynının 1 m³ birim için karşılaştırılabilir bir standartta olması için dizaynlar arasında hacimce azalma veya artış, agrega miktarının değiştirilmesi ile dengelenmiştir.

Bu çalışmada deneysel aşamada izlenen yol Şekil 4.2’de akış şeması olarak verilmiştir.



Şekil 4.2 Deneysel akış şeması

Tüm deneysel çalışmalar Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuvarında yapılmıştır. Kullanılan tüm malzemeler laboratuvar ortamında saklanmıştır.

Bu çalışmadaki karışım için gerekli malzemeler 1 gram hassasiyetindeki terazide plastik poşetler içinde tartılarak hazırlanmıştır. Ayrıca poşet içerisindeki karışımın homojen dağılımı da sağlamıştır.

Karıştırıcı kabı ve karışımı sağlayan palet yabancı maddelerden, tozdan ve nemden arındırılarak kullanıma hazır hale getirildikten sonra, hazırlanan karışımlar, poşetlerden Hobart mikserine tozmadan aktarılmıştır.

Öncelikle ilk 2 dakika yavaş devirde çalıştırılan mikserde, agrega ve bağlayıcıdan oluşan karışımın homojen dağılımı sağlandıktan sonra karışım suyu ilave edilmiştir. Taneler ıslandıktan sonra da süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilerek Hobart mikseri yüksek devirde çalıştırılmıştır. Yaklaşık 5 dakika sonra süper akışkanlaştırıcı katkının çalışmaya başladığı ve tüm karışımın ıslandığı, sonrasında da karışımın hamur kıvamına geldiği gözlenmiştir. Yedi sekiz dakika yüksek devirde karıştırılan karışıma, sekiz ile onuncu dakikalarda çelik liflerde ilave edilip, çelik lifler çimento hamuru içinde tamamen dağılına kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir

Karıştırma işleminden sonra harç yayılma deneyine tabi tutulmuştur. Karıştırma kabından tepsiye alınan harç, yayılma tablası üzerindeki kalıba yarısı dolacak şekilde yerleştirilmiş tokmak ile 25 defa vurulduktan sonra, kalıbın diğer kısmı doldurularak, tekrar 25 vuruş daha uygulanmıştır. Kalıbın üst yüzeyi mala ile temizlenip düzeltildikten sonra, kalıp çekilerek alınmış deney aletini kolu 3 sn'de 5 kez çevrilerek, yayılan örneğin çapı 2 farklı ekseninde kumpas yardımı ile ölçülmüş (Şekil 4.3) ve okunan değerlerin ortalaması kaydedilmiştir.



Şekil 4.3 Kumpas yardımıyla yayılma değerinin ölçülmesi

Tüm deneyler laboratuvar ortamında 21 ± 2 °C sıcaklık altında yapılmıştır. Hazırlanan taze betonlar önceden temizlenmiş ve yağlanmış kalıplara TS 3068 uygun olacak şekilde sıkıştırması (şişlenerek) yapılarak kalıba yerleştirilmiştir.

Örnekler kalıptan priz süresince neme doymun ortamda tutulmuştur.

Basınç deneyi TS 3114 e uygun olan ELE markalı 300 ton kapasiteli oynar başlıklı hidrolik preste yapılmıştır. Tek eksenli basınç deneyinde yükleme hızı örnek boyutlarına bağlı olarak, 0,15–0,35 MPa/sn (ASTM C39) olacak şekilde deneyler yapılmıştır.

Eğilme deneyi, deplasman kontrollü 3 noktalı eğilme deneyi cihazında yapılmıştır. Cihaz 0,8 mm/dak yükleme hızında maksimum 2 ton kapasiteli, orta nokta deplasmanları 0.001 mm hassasiyetli optik encoder ile belirleyebilen bir deney aracıdır.



Şekil 4.4 Eğilme ve basınç dayanımı deneylerinde kullanılan araçlar

4.3 Agregası Tipi ve Tane Dağılımının İncelenmesi

Bu çalışmaya, yapı matrisini oluşturan öğelerden olan agregası tipinin belirlenmesi ile başlanmıştır. Bu amaçla iki farklı tür agregası kullanılmıştır. Bunlar, kuvars ve bazalt agregalarıdır. Agregası tane dağılımının basınç dayanımına etkisini belirlemek amacıyla farklı tane boyutunda agregaları değişik oranlarda karıştırılarak denenmiştir.

Karışımındaki çimento miktarı, silis dumanı, çelik lif, kimyasal katkı oranları sabit tutularak sadece agreganın tane dağılımı değiştirilerek en iyi sonucu veren agregası tipi incelenmiştir. Karışım oranları sabit tutulduğu gibi uygulanan kür koşulları da sabit tutulmuştur. Tüm örneklere, aynı basınç altında (2MPa) ve sabit bir süre (8 saat) boyunca otoklav kürü uygulanmıştır. Agregası tipi ve tane dağılımı çalışmasında 10 cm ayrıtlı küp kalıplar kullanılmıştır.

4.3.1. Kuvars agregası

Tablo 4.14 kuvars agregalı karışımlardaki tane dağılımı ve bu dağılımlarla hazırlanan karışımların basınç dayanımı değerleri, Tablo 4.15, Tablo 4.16, ve Tablo 4.17'de ise hazırlanan kuvarslı karışımların dizaynları ve basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 4.14 Kuvars agregalı karışımların tane dağılımı oranları ve basınç dayanımları

KARIŞIM NO	Kuvars Agregası			Basınç Değeri (MPa)
	1mm - 3 mm (TİP 1)	0.6 mm -1,2 mm (TİP 2)	0-0.4mm (TİP 3)	
K 1	0%	0%	100%	215,0
K 2	0%	100%	0%	225,0
K 3	100%	0%	0%	234,0
K 4	50%	50%	0%	231,0
K 5	0%	50%	50%	218,0
K 6	50%	0%	50%	231,0
K 7	50%	25%	25%	241,0
K 8	25%	50%	25%	235,0
K 9	25%	25%	50%	225,0

Tablo 4.15 Agregası tipi kuvars olan karışım dizaynları

	K1		K2		K3	
	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	257,3	117,0	257,3	117,0	257,3	117,0
Kuvars Tip 1	0,0	0,0	0,0	0,0	1026,0	394,6
Kuvars Tip 2	0,0	0,0	1026,0	402,4	0,0	0,0
Kuvars Tip 3	1026,0	402,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	52,0	47,3	49,0	44,5
S/B	0,17	0,47	0,17	0,47	0,17	0,46
Katkı (%)	5,1	13,1	4,8	12,3	4,5	11,6
Lif	156,0	30,0	156,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2319,3	986,3	2316,3	983,6	2313,3	973,1
lifli toplam	2475,3	1006,3	2472,3	1003,6	2547,3	1003,1
Yayılma tablası	115 mm		115 mm		115 mm	

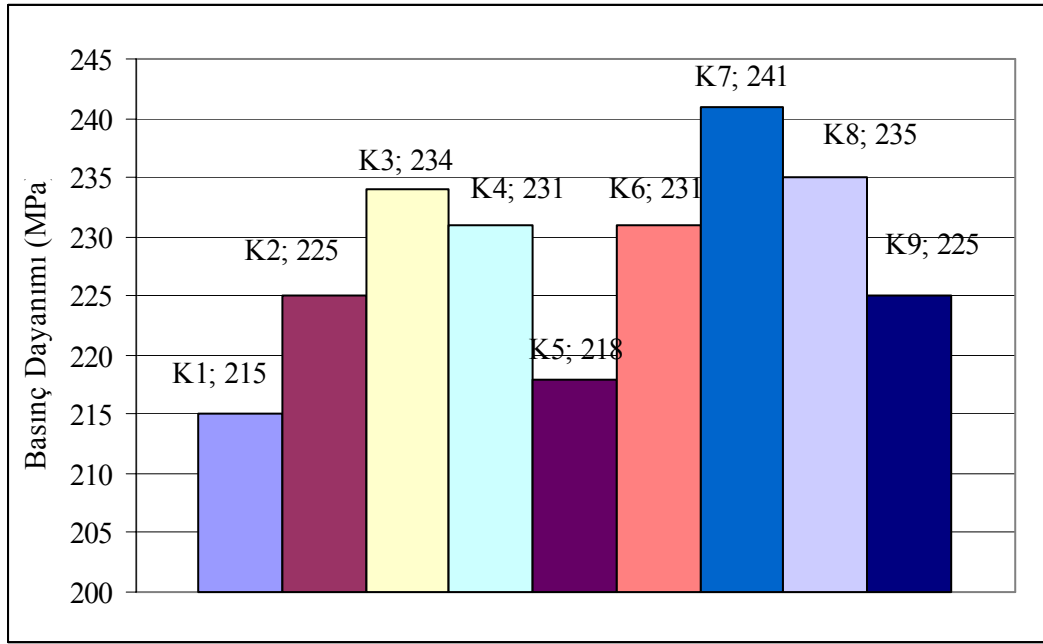
Tablo 4.16 Agregası tipi kuvars olan karışım dizaynları

	K4		K5		K6	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	257,3	117,0	257,3	117,0	257,3	117,0
Kuvars Tip 1	513,0	197,3	0,0	0,0	513,0	197,3
Kuvars Tip 2	513,0	201,2	513,0	201,2	0,0	0,0
Kuvars Tip 3	0,0	0,0	513,0	201,2	513,0	201,2
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	50,0	45,5	53,0	48,2	53,0	48,2
S/B	0,17	0,47	0,17	0,47	0,17	0,47
Katkı %	4,60	11,9	4,9	12,6	4,9	12,6
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2314,3	977,9	2317,3	984,5	2317,3	980,6
lifli toplam	2548,3	1007,9	2551,3	1014,5	2551,3	1010,6
Yayımla tablası	115		115		115	

Tablo 4.17 Agregası tipi kuvars olan karışım dizaynları

	K7		K8		K9	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	257,3	117,0	257,3	117,0	257,3	117,0
Kuvars Tip 1	513,0	197,3	256,0	98,5	256,0	98,5
Kuvars Tip 2	256,0	100,4	513,0	201,2	256,0	100,4
Kuvars Tip 3	256,0	100,4	256,0	100,4	513,0	201,2
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	50,0	45,5	50,0	45,5	54,0	49,1
S/B	0,17	0,47	0,17	0,47	0,17	0,47
katkı %	4,6	11,9	4,6	11,9	5,0	12,8
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2313,3	977,5	2313,3	979,5	2317,3	983,1
lifli toplam	2547,3	1007,5	2547,3	1009,5	2551,3	1013,1
Yayımla tablası	115 mm		115 mm		115 mm	

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere kullanılan kuvarsın tane dağılımı basınç dayanımını etkileyen bir faktördür. En yüksek basınç dayanımı %25 0–0,4mm,%25 0,6–1,2mm, %50 1-3 mm olan karışımından elde edilmiştir.



Şekil 4.5 Agregası tipi kuvars olan karışımlardaki küp basınç dayanımları sonuçları

4.3.2. Bazalt Agregası

Tablo 4.18’de bazalt agregalı karışımlardaki tane dağılımı ve bu dağılımlarla hazırlanan karışımların basınç dayanımı değerleri, Tablo 4.19’da ise hazırlanan bazaltlı karışımların dizaynları ve basınç dayanımları verilmiştir.

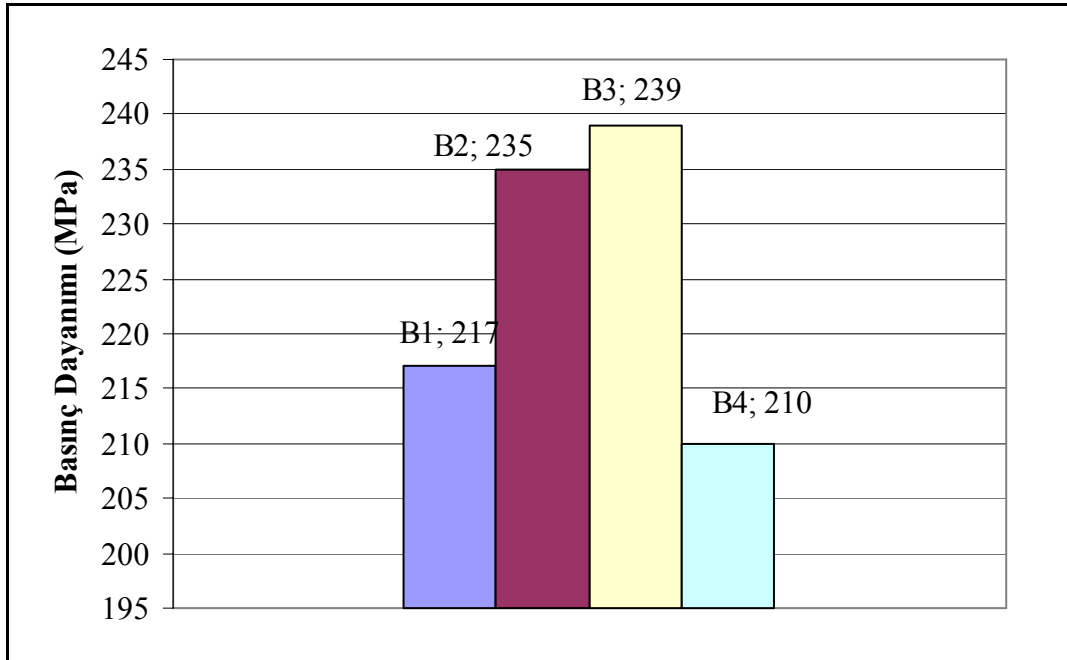
Tablo 4.18 Agregası tipi bazalt olan karışımların tane dağılımı ve basınç dayanımı değerleri

KARIŞIM NO	Agrega Boyutu		Basınç Değeri MPa
	4mm - 8 mm (TİP1)	0.5 mm -4 mm (TİP2)	
B 1	0%	100%	217,0
B 2	100%	0%	235,0
B 3	50%	50%	239,0
B 4	25%	75%	210,0

Tablo 4.19 Agregası tipi bazalt olan karışım dizaynları

	B1		B2		B3		B4	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	257,3	117,0	257,3	117,0	257,3	117,0	257,3	117,0
YFC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Bazalt Tip 1	0,0	0,0	1035,0	383,3	517,5	191,7	258,8	95,8
Bazalt Tip 2	1035,0	383,3	0,0	0,0	517,5	191,7	777,5	288,0
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	52,0	47,3	49,0	44,5	50,0	45,5
S/B	0,17	0,47	0,17	0,47	0,17	0,46	0,17	0,47
Katkı %	5,1	13,1	4,8	12,3	4,5	11,6	4,60	11,9
Lif	156,0	20,0	156,0	20,0	234,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2328,3	967,3	2325,3	964,6	2322,3	961,9	2324,6	963,2
Lifli toplam	2484,3	987,3	2481,3	984,6	2556,3	991,9	2558,6	993,2
Yayıma tablası	115 mm		115 mm		115 mm		115 mm	

Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere kullanılan bazaltın tane dağılımı basınç dayanımını etkileyen bir faktördür. En yüksek basınç dayanımı %50 0,5– 4mm,%50 4–8mm, olan karışımdan elde edilmiştir.



Şekil 4.6 Agregası tipi bazalt olan karışımlardaki basınç dayanımları

Agrega tipinin ve tane boyutunun belirlenmesinde yapılan incelemede kuvarslı karışımlar beklenenin tersine bazaltlı karışımlardan az da olsa daha yüksek basınç dayanım değerleri vermişlerdir.

Bazalt agregası ile çimento hamuru arasındaki ara yüzey bölgesinin, agrega yüzeyinin pürüzsüz olması nedeniyle daha zayıf olduğu sanılmaktadır. Bazalt agregalı karışımların daha düşük dayanımlar vermesinin nedenlerinden biri de bu durum ile açıklanabilir. Ayrıca bazalt agregasının ASR riski olması, yüzeylerinin daha camsı dokuda olması agregası seçiminde etken olan faktörlerdir.

Çalışmanın devamında agregası tipi belirlenmesinde yukarıda belirtilen sebeplerden ve kuvars malzemesinin kolay temin edilmesinden dolayı kuvars tercih edilmiştir. Agregası tane dağılımı ise ağırlıkça %50 1 mm-3 mm (Tip1), %25 0,6 mm-1,2 mm (Tip2), %25 0-0,4 mm (Tip3) olacak şekilde sabitlenmiştir.

4.4 Kür Koşullarının İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında otoklav ve buhar kürü süresinin karışımların basınç dayanımına etkisi belirlenmiştir.

Otoklav küründe 2 MPa buhar basınç değeri altında örnekler 4,8,12 saat olmak üzere 3 ayrı zaman diliminde kür uygulanmıştır. Buhar küründe ise örnekler 2,4,6,8 gün buhar küründe tutulmuştur.

Hazırlanan karışımlardan 5 cm ayrıtlı küp numuneler alınmıştır. Her kür koşulu üç adet örnek ile temsil edilmiştir.

4.4.1 Yüksek Basıncılı Buhar Kürü (otoklav kürü) Süresinin İncelenmesi

Yüksek basınçlı buhar kürünün amacı betonun dayanım kazanmasını erken yaşlarda hızlandırmaktır. Yüksek sıcaklıkların dayanım gelişimi için gerekli kimyasal reaksiyonları hızlandırdığı bilinmekle birlikte, bazı sınırlamalar getirilmesi gereklidir, aksi halde beton ve kullanılan araçlar bu işlemde yarardan çok zarar görebilir.

100 °C üzerinde sıcaklıklarda gerçekleşen ve doymuş buhar basıncıyla elemanın yüzeylerine uygulayarak dayanım artışını hızlandıran bir yöntem olan yüksek basınç altında buhar küründe (otoklav kürü) kür sıcaklıkları 200 – 212°C (Şekil 3.3) aralığında olup örneklere 20 atm basınç uygulanmıştır

Çalışmamızda Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuvarında bulunan Otoklavlar kullanılmıştır (Şekil 4.7). Ele markalı küçük otoklav makinesinin sıcaklık değeri manuel olarak ayarlanmaktadır. 2 MPa basınç altında emniyet ile çalışmaktadır. 1976 yılında imal edilmiş bu otoklav makinesi maksimum 2,4 MPa basınca kadar güven ile çalışmaktadır.

Büyük örneklerin otoklav kürlerinde ise yeni otoklav kullanılmıştır. (Şekil 4.7) Ele markalı küçük otoklav makinesine göre daha büyük hacimli olan bu otoklav, tek seferde birçok numunenin kürünün yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca kontrolünün elektronik olması hassasiyetini ve güvenilirliğini arttırmaktadır.



Şekil 4.7 Deneyleerde kullanılan otoklav makineleri

Bu çalışmada kullanılan her iki otoklav makinesi de çalışmaya başladıktan 1,5-2 saat sonunda istenen 2 MPa basınç (20 atm) değerine ulaşmaktadır. Örnekler otoklavda 2 MPa basınç altında dengeye geldiklerinden sonra, belirlenen süre kadar sabit basınç altında tutulmuştur. Otoklav süresi sonunda sistem soğutulmaya bırakılmıştır, sistemin ısınması gibi soğuması da 1,5–2 saat sürmektedir. Otoklav içindeki basınç güvenilir bir değere düştükten sonra kapak açılıp örnekler dışarıya çıkarılıp soğumaya bırakılmıştır. Normal laboratuvar koşullarında soğutulmaya bırakılan numuneler 24 saat sonra basınç ve eğilme deneylerine tabi tutulmuştur.

Örnekler otoklavda üç farklı süre bekletilmiştir. Bu süreler 4,8 ve 12 saattir. Kullanılan karışım oranları sabit olup Tablo 4.20’de sunulmuştur

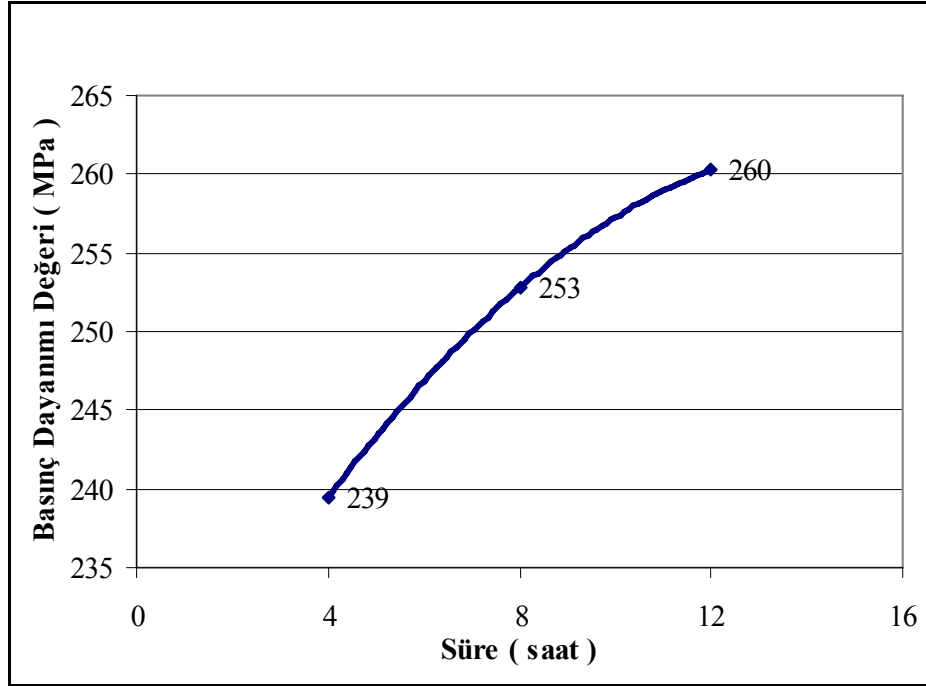
Tablo 4.20 Otoklav kürü uygulanan örneklerini karışım oranları

	kg	dm ³
Çimento	830,0	266,0
Silis dumanı	249,0	113,2
Kuvars Tip 1	513,0	197,3
Kuvars Tip 2	256,0	100,4
Kuvars Tip 3	256,0	100,4
Su	151,0	151,0
katkı	53,0	48,2
S/B	0,17	0,47
katkı %	4,9	12,7
Lif	234,0	30,0
Toplam	2308,0	976,5
lifli toplam	2542,0	1006,5
Yayılma tablası	115 mm	

Farklı otoklav kür sürelerine göre elde edilen basınç dayanımları Tablo 4.21’de ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo 4.21 Otoklav kürü uygulanan örneklerin basınç dayanımları

Kür süresi (saat)	Buhar Basıncı Değeri (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)
4	2 MPa	227	239
		246	
		244	
8	2 MPa	242	252
		250	
		264	
12	2 MPa	254	260
		263	
		263	



Şekil 4.8 Otoklav kür süresi basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.8’de görüldüğü üzere, 4 saatlik otoklav kürü sonucunda 239 MPa ortalama basınç dayanımı elde edilir iken, 8 saatlik otoklav kürü sonucunda 253 MPa, 12 saatlik otoklav kürü sonucunda ise 260 MPa ortalama basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. 8 ve 12 saatlik otoklav kürü birbirine yakın basınç dayanımı değeri gösterirken, 4 saatlik otoklav kürünün basınç dayanımı değeri bunların gerisinde kalmıştır. Sonuçlardan 12 saat otoklav kürü uygulanan örneklerin maksimum basınç dayanımı değeri verdiği görülmüştür. Ancak bu basınç dayanımı değerleri 8 saat otoklav kürü uygulanan örneklerin dayanımları ile karşılaştırıldığında ve ekstra enerji maliyeti ve uygulama süresi de düşünüldüğünde 12 saatlik otoklav kürü, getirdiği ek maliyetlere karşılık büyük bir dayanım artışı göstermemektedir. Bu nedenle çalışmanın devamında otoklav süresi olarak 8 saat seçilmiş ve uygulanmıştır.

4.4.2 Buhar Kürü Süresinin İncelenmesi

DeneySEL çalışmalarda kullanılan buhar küründe, Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan buhar kürü kabinleri (Şekil 4.9) kullanılmıştır.

Bu kabinlerde ortamdaki nem miktarı her zaman %100 doygun halde su buharı ile sağlanmaktadır. Buhar kaçakları sebebiyle de sistem sık sık kontrol edilmiş ve tabanındaki su seviyesi sabit kalacak şekilde eklemeler yapılmıştır.



Şekil 4.9 Deneylerde kullanılan buhar kürü cihazı

Buhar kürü uygulamalarında ön bekleme süresi olarak 4 saat uygulanmıştır. Bu süre içerisinde örnekler laboratuvar şartlarında 21 ± 2 °C sıcaklık altında nemli bir ortamda bekletilmiş, 4 saatlik ön beklemeden sonrada örnekler kalıptan sarsmadan sökölüp sarsmadan buhar kürü kabinine yerleştirilmiştir. Kabinin ısınması ve 100 °C buhar ortamına geçişi 4-5 saati almaktadır.

Buhar kürü süresi olarak 2,4,6,8 gün incelenmiştir. Her zaman aralığı 3 örnek ile temsil edilmektedir. Buhar kürü için hazırlanan örneklerin dizaynları Tablo 4.22’de verilmiştir. Tüm örnekler için karışım oranları sabit tutulmuş sadece buhar kürü süresini etkisi göz önüne alınmıştır.

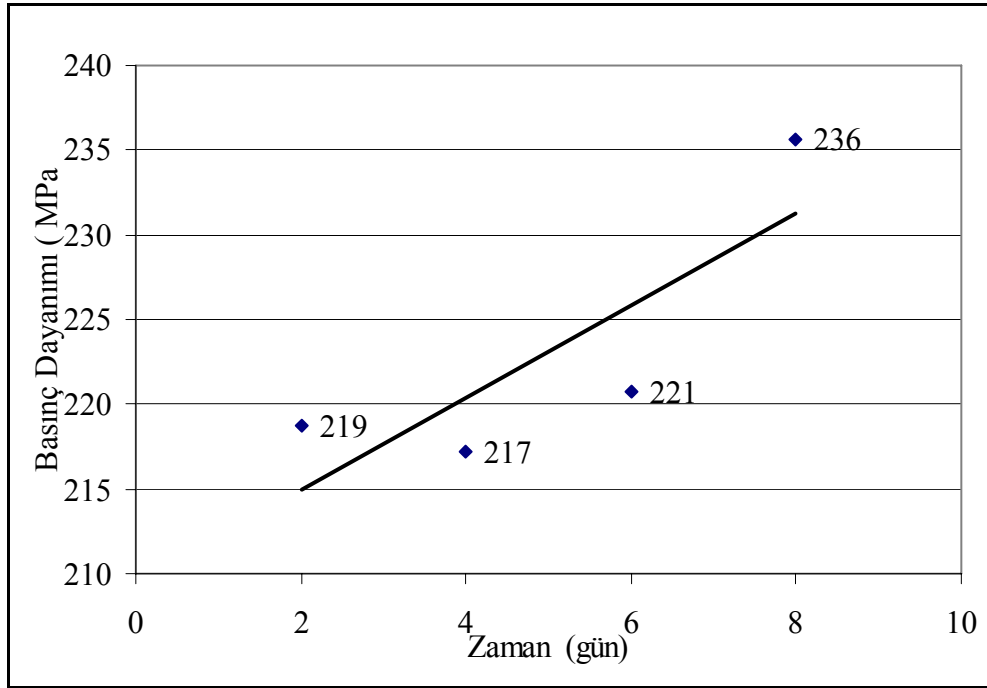
Buhar kürünün basınç dayanımına etkisi Tablo 4.23 ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir

Tablo 4.22 Buhar kürü örneklerinin harç dizaynı

	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0
Silis dumanı	290,5	132,0
Kuvars Tip 1	488,5	187,9
Kuvars Tip 2	243,7	95,6
Kuvars Tip 3	243,7	95,6
Su	151,0	151,0
katkı	55,0	50,0
S/B	0,16	0,45
katkı %	4,9	12,6
Lif	234,0	30,0
toplam	2302,5	978,1
lifli toplam	2536,5	1008,1
Yayılma Tablası	115 mm	

Tablo 4.23 Buhar kürü uygulanan örneklerin basınç dayanımları

Buhar kürü süresi (gün)	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)
2	209	219
	224	
	223	
4	218	217
	216	
	218	
6	221	220
	226	
	215	
8	230	235
	241	
	235	



Şekil 4.10 Buhar kürü uygulanan örneklerin basınç dayanımları değeri

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 2, 4, 6 günlük buhar kürü uygulamalarında basınç dayanımları (218 MPa, 217 MPa, 220 MPa) birbirine yakındır. 6 günden sonraki buhar küründe basınç dayanım belirgin olarak artmıştır. Buhar küründe 6 güne kadar çok fazla basınç dayanım kazancı olmaması, 8 günlük buhar kürü uygulamasında ise ortaya çıkacak işletme giderleri ve büyük dayanım kazancı getirmemesi sebebiyle buhar kürü süresi 2 gün seçilmiş ve uygulanmıştır.

Tablo 4.21 ve Tablo 4.23'den de görüldüğü gibi otoklav kürü ile kıyaslandığında, 8 günlük buhar küründe bile basınç dayanımlarının düşük olduğu görülmektedir. Bu durum her iki kürün çok farklı içyapı oluşumuna yol açması ile açıklanabilir. Farklı kürler uygulanan örneklerin maksimum basınç altındaki kırılma formları da farklı olmuştur. Buhar kürü uygulanan örneklerin otoklav kürü uygulanan örneklere göre basınç yapılırken daha sünek bir davranış gösterdikleri gözlemlenmiştir. Otoklav kürü geçirmiş örnekler kırılma anında patlayarak parçalanırken, buhar kürü geçirmiş örnekler patlama göstermemiştir.

4.5 Mekanik Özelliklerin Gelişimine Karışımdaki Silis Dumanı içeriğinin Etkisi

Çalışmanın bu bölümünde ana iskeletin güçlenmesinde büyük katkısı olan silis dumanının karışım içerisindeki en uygun oranı incelenmiştir. Karışımlara çimento miktarının %0, %10, %20, %25, %30, %35, %40, %45 oranlarında silis dumanı ilavesi yapılarak yeni karışımlar (Tablo 4.24) hazırlanmıştır. Hazırlanan bu karışımlardan üçer adet 5 cm ayrıtlı küp örnek alınarak, otoklav kürü (2MPa –8 saat) altında basınç dayanımları belirlenmiştir.

Silis dumanı ilavesi karışımların işlenebilirliğini azalttığı için, aynı yayılma tablası değerini elde etmek için kullanılan akışkanlaştırıcı miktarı artırılmıştır. Örneğin SF0 karışımında akışkanlaştırıcı miktarı %3,9 iken SF45 karışımında bu değer %4,5'a kadar çıkmaktadır (Tablo 4.25, Tablo 4.26, Tablo 4.27)

Tablo 4.24 Karışım adları ve mikro silika yüzdeleri

Karışım adı	SF0	SF10	SF20	SF25	SF30	SF35	SF40	SF45
Silis dumanı yüzdesi	% 0	% 10	% 20	% 25	% 30	% 35	% 40	% 45

Tablo 4.25 Optimum mikro silis incelemesindeki karışım dizaynları

	SF%0		SF%10	
	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	0,0	0,0	83,0	37,7
Kuvars Tip 1	660,1	253,9	611,1	235,0
Kuvars Tip 2	328,2	128,7	304,1	119,3
Kuvars Tip 3	328,2	128,7	304,1	119,3
Su	151,0	151,0	151,0	151,0
katkı	32,0	29,1	38,0	34,5
S/B	0,21	0,63	0,19	0,57
katkı %	3,9	10,9	4,2	11,4
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0
Yayılma Tablası	114mm		115mm	
toplam	2329,4	957,4	2321,3	962,8
lifli toplam	2563,4	987,4	2555,3	992,8
Yayılma Tablası	110 mm		112 mm	

Tablo 4.26 Optimum mikro silis incelemesindeki karışım dizaynları

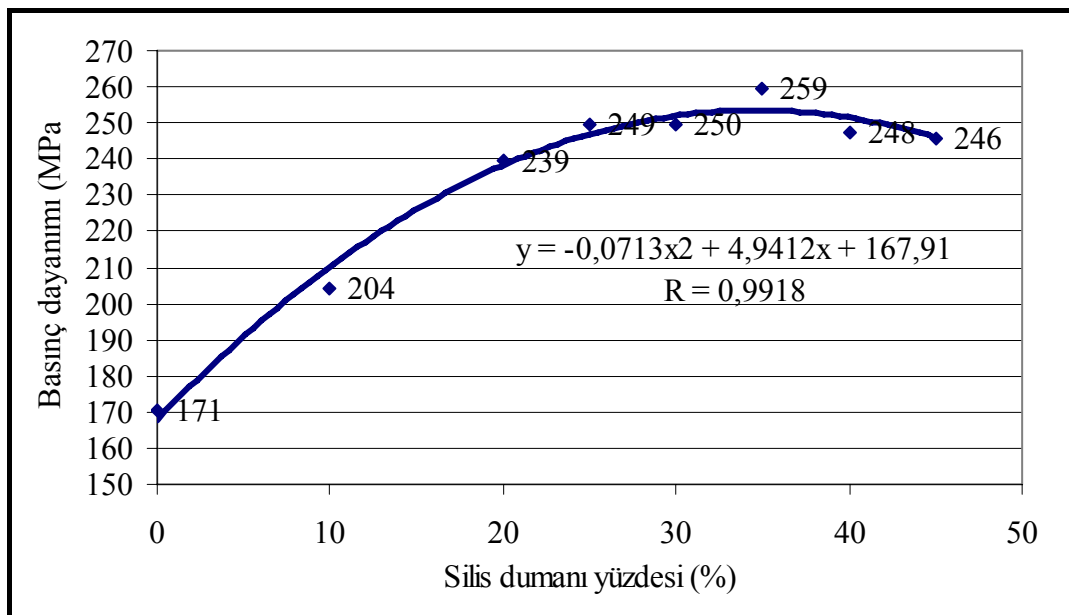
	SF%20		SF%25		SF%30	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,0	266,0
Silis dumanı	166,0	75,5	207,5	94,3	249,0	113,2
Kuars Tip 1	562,0	216,2	537,5	206,7	513,0	197,3
Kuars Tip 2	280,1	109,8	268,0	105,1	256,0	100,4
Kuars Tip 3	280,1	109,8	268,0	105,1	256,0	100,4
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
katkı	44,0	40,0	50,0	45,5	53,0	48,2
S/B	0,18	0,51	0,17	0,49	0,17	0,47
Katkı %	4,4	11,7	4,8	12,6	4,9	12,7
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2313,1	968,3	2312,1	973,8	2308,0	976,5
lifli toplam	2547,1	998,3	2546,1	1003,8	2542,0	1006,5
Yayılma Tablası	112 mm		115 mm		115 mm	

Tablo 4.27 Optimum mikro silis incelemesindeki karışım dizaynları

	SF%35		SF%40		SF%45	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	830,0	266,0	830,00	266,03
Silis dumanı	290,5	132,0	332,0	150,9	373,50	169,77
Kuars Tip 1	488,5	187,9	464,0	178,4	439,43	169,01
Kuars Tip 2	243,7	95,6	231,5	90,8	219,22	85,97
Kuars Tip 3	243,7	95,6	231,5	90,8	219,22	85,97
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,00	151,00
Katkı	55,0	50,0	57,0	51,8	59,00	53,64
S/B	0,16	0,45	0,16	0,44	0,15	0,42
Katkı %	4,9	12,6	4,9	12,4	4,90	12,31
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,00	30,00
toplam	2302,5	978,1	2296,9	979,7	2291,36	981,38
lifli toplam	2536,5	1008,1	2530,9	1009,7	2525,36	1011,38
Yayılma Tablası	115 mm		116 mm		118 mm	

Tablo 4. Silis dumanı miktarına göre karışımların basınç dayanım değerleri

Silis dumanı (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)
0	171	170
	171	
	169	
10	203	204
	202	
	206	
20	235	239
	239	
	242	
25	250	249
	259	
	237	
30	261	249
	237	
	250	
35	263	259
	251	
	262	
40	234	247
	260	
	248	
45	244	245
	250	
	242	



Şekil 4.11 Silis dumanı miktarına göre karışımların basınç dayanım değerleri

Şekil 4.11'den görüldüğü üzere, silis dumanın %35 oranına kadar ilavesi basınç dayanımını artırıcı etki oluştururken, mikro silikanın %35'in üzerinde artırılması basınç dayanımını düşürmektedir. Bu sonuçlar içerisinde silis dumanın en uygun kullanım oranının bu çalışmada %35 olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki kısımları için SF35 kontrol karışım olarak seçilmiş ve karşılaştırmalar bu örneğe göre yapılmıştır.

Ayrıca silis dumanı oranı arttıkça örnekler daha gevrek davranış gösterdiği gözlenmiştir. Özellikle silis dumanı oranı % 35 ve üzerinde olan örneklerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde, örneklerin patlayarak ve dağılarak gevrek bir şekilde kırıldığı gözlenmiştir. silis dumanı oranı azaldıkça patlama davranışı ortadan kalkmaktadır.

4.6 Mekanik Özelliklerin Gelişimine Puzolanik Bağlayıcı İkamesinin Etkisi

Reaktif pudra betonun önemli sorunlardan biri de normal betona göre oldukça yüksek miktarda bağlayıcıya ihtiyaç duymasıdır. Bu durum maliyeti etkilediği gibi yüksek hidrasyon ısısı problemine de yol açmaktadır.

Çalışmanın bu kısmında yüksek dozda çimento gerektiren bu karışımlara bağlayıcı olarak atık maddelerden olan puzolanik esaslı öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) ikame ederek otoklav kürü altında basınç dayanımlarındaki değişimleri incelenecektir.

Karışımlarda çimento yerine %20, %40, %60 oranlarında uçucu kül (UK) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ikame edilmiştir. İlk aşamada puzolanlar ayrı ayrı kullanılmıştır, sonraki aşamada ise toplamda %20, %30, %40 ve %60 oranlarında UK ve YFC kombinasyonları oluşturulmuştur.

4.6.1 Puzolanik Bağlayıcıların Ayır Ayır İkamesi

Hazırlanan karışımlarda çimento yerine %20, %40, %60 oranlarında uçucu kül veya öğütülmüş yüksek fırın cürufu ayrı ayrı ikame edilmiştir. Tablo 4.29'de oluşturulan karışımların adları ve bu karışımlardaki ikame yüzdeleri belirtilirken, Tablo 4.30 ve Tablo 4.31'de hazırlanan karışımların içerikleri görülmektedir.

Tablo 4.29 Puzolanik bağlayıcıların ikame yüzdeleri ve karışım adları

Karışım Adı	YFC %	UK %
UK 20	-	% 20
UK 40	-	% 40
UK 60	-	% 60
YFC 20	% 20	-
YFC 40	% 40	-
YFC 60	% 60	-

Tablo 4.30 Bağlayıcısında UK ikame edilen karışımların dizaynları

	KONTROL		UK20		UK40		UK60	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	664,0	212,8	498,0	159,6	332,0	106,4
Silis dumanı	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0
YFC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
UK	0,0	0,0	166,0	75,5	332,0	150,9	498,0	226,4
kuvars Tip 1	488,5	187,9	459,6	176,8	430,6	165,6	401,7	154,5
kuvars Tip 2	243,7	95,6	229,6	90,0	215,4	84,5	201,2	78,9
Kuvars Tip 3	243,7	95,6	229,6	90,0	215,4	84,5	201,2	78,9
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	58,0	52,7	62,0	56,4	65,0	59,1
S/B	0,16	0,5	0,17	0,43	0,17	0,42	0,17	0,40
Katkı %	4,9	12,6	5,2	12,5	5,5	12,7	5,8	12,7
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2302,5	978,1	2248,2	980,8	2194,9	984,5	2140,6	987,2
lifli toplam	2536,5	1008,1	2482,2	1010,8	2428,9	1014,5	2374,6	1017,2
Yayıma Tablası	115 mm		114mm		114mm		110mm	

Tablo 4.31 Bağlayıcısında YFC ikame edilen karışımların dizaynları

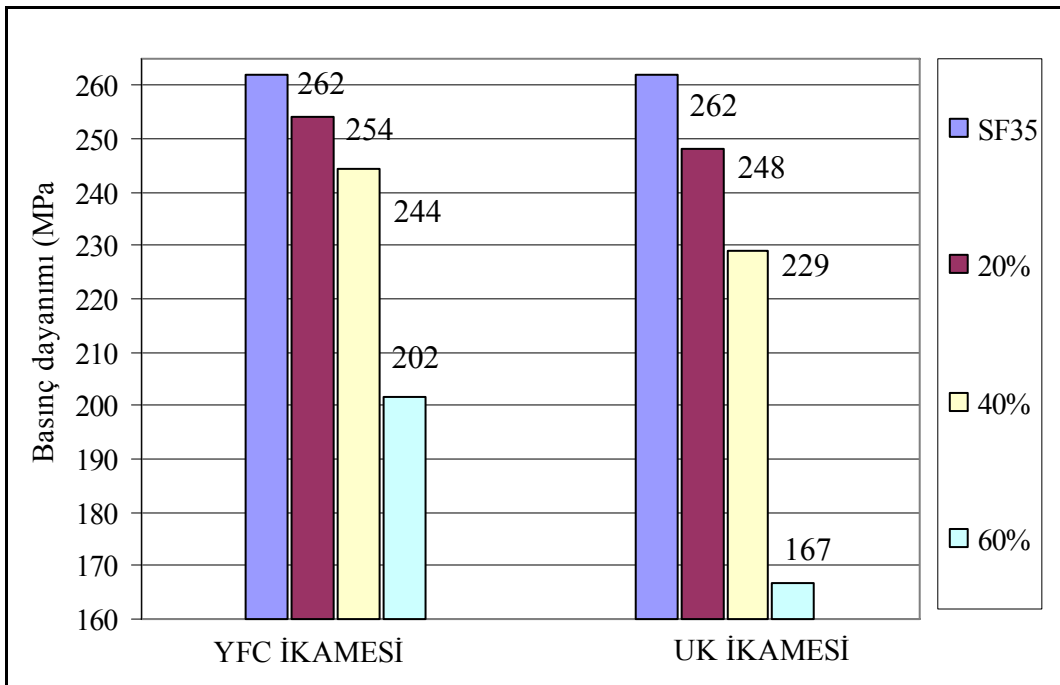
	KONTROL		YFC20		YFC40		YFC60	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	664,0	212,8	498,0	159,6	332,0	106,4
Silis dumanı	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0
YFC	0,0	0,0	166,0	59,3	332,0	118,6	498,0	177,9
UK	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
kuvars Tip 1	488,5	187,9	480,6	184,8	472,7	181,8	464,8	178,8
kuvars Tip 2	243,7	95,6	239,9	94,1	236,0	92,5	232,1	91,0
Kuvars Tip 3	243,7	95,6	239,9	94,1	236,0	92,5	232,1	91,0
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	55,0	50,0	55,0	50,0	55,0	50,0
S/B	0,16	0,5	0,16	0,45	0,16	0,44	0,16	0,4
Katkı %	4,9	12,6	4,9	12,4	4,9	12,2	4,9	12,0
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2302,5	978,1	2286,8	978,1	2271,1	978,1	2255,5	978,1
Lifli toplam	2536,5	1008,1	2520,8	1008,1	2505,1	1008,1	2489,5	1008,1
Yayılma Tablası	115mm		115mm		117mm		117mm	

Tablo 4.32 ve Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'den görüldüğü üzere, çimentonun farklı oranlarda YFC veya UK ile yer değiştirmesinde aynı ikame yüzdelerinde UK ikamesi YFC ikamesine göre daha fazla dayanım kayıplarına yol açmaktadır. Bu ikamelerde çimentonun YFC ile %60 oranında ikame edilmesi halinde bile 200 MPa üzerinde basınç dayanımları elde etmek mümkün olmuştur.

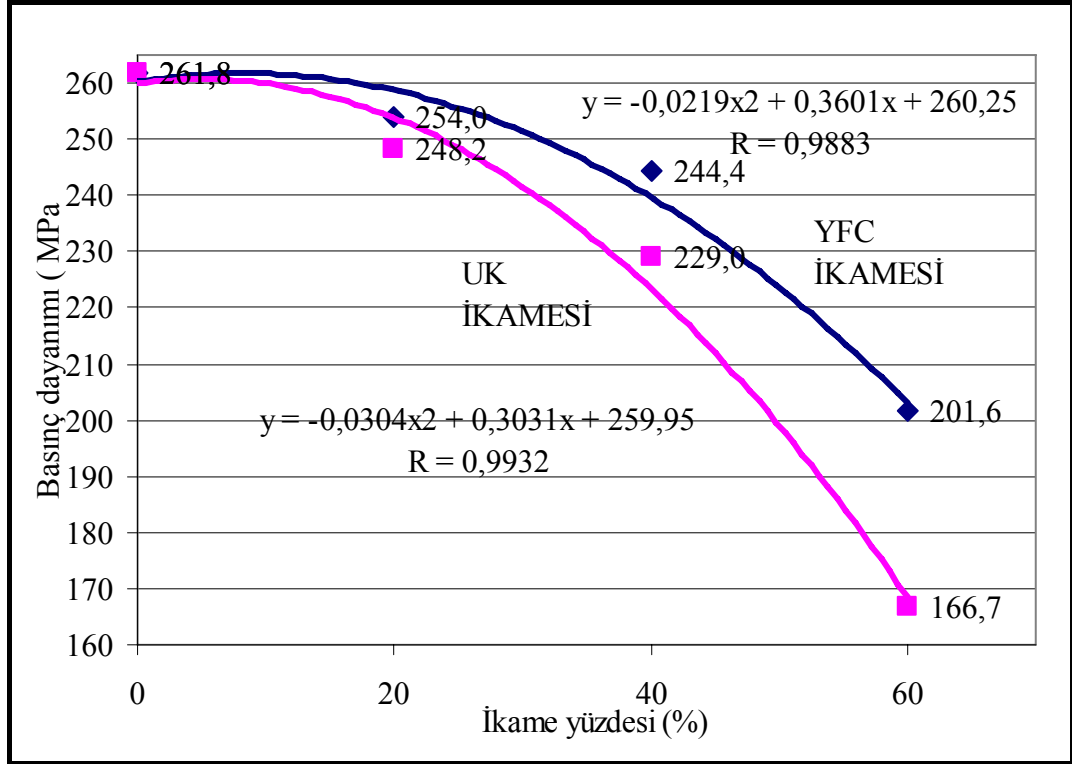
Kontrol karışımı olan çimento bağlayıcılı ve silis dumanından oluşan SF35'e göre YFC ve UK ikame edilmiş karışımların basınç dayanımları karşılaştırıldığında YFC'nin %40 ikamesine, UK'nın %20 ikamesine kadar otoklav kürü altında büyük basınç dayanımı kayıpları gözlenmemiştir. YFC40 ve UK20 karışımları ise klasik reaktif pudra betonlarına iyi bir alternatif olacağı görülmektedir. Öyle ki Bu karışımlarda 664 kg/m^3 (UK20) ve 498 kg/m^3 (YFC40) çimento kullanılmış olup, 830 kg/m^3 çimento içeren SF35 kontrol karışımının basınç dayanımının %94 (UK20) ve %93 (YFC40) 'ü elde edilmiştir. Bu durum reaktif pudra betonun, bağlayıcı olarak çimento yerine belirli oranlarda mineral katkı kullanarak üretilbileceğini göstermektedir

Tablo 4.32 Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikamesinde basınç dayanım değerleri

Karışım adı	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)
KONTROL SF35	272	262
	256	
	256	
YFC20	264	254
	252	
	245	
YFC40	241	244
	243	
	249	
YFC60	192	202
	203	
	208	
UK20	255	248
	246	
	242	
UK40	233	229
	224	
	228	
UK60	165	166
	165	
	168	



Şekil 4.12 Basınç dayanımının YFC ve UK ikamesi ile değişimi



Şekil 4.13 Basınç dayanımının UK veya YFC ikamesi ile değişimi

4.6.2 Puzolanik Bağlayıcıların Birlikte İkamesi

Çalışmanın bu bölümünde de bağlayıcı olarak çimento yerine toplamda %20, %40, %60 oranlarında uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu birlikte ikame edilmiştir. Tablo 4.33'te oluşturulan karışımların adları ve bu karışımlardaki ikame yüzdeleri belirtilirken, Tablo 4.34 ve Tablo 4.35'te hazırlanan karışımların içerikleri görülmektedir. Bu karışımlarda hem YFC için hem de UK için birinin ikame yüzdesi sabit tutularak diğerinin ikame yüzdesi arttırılmıştır

Tablo 4.33 Puzolanik bağlayıcıların kombinasyonlu ikame yüzdeleri ve karışım adları

KARIŞIM ADI	YFC %	UK %
YFC10-UK10	% 10	% 10
YFC10-UK20	% 10	% 20
YFC10-UK30	% 10	% 30
YFC20-UK10	% 20	% 10
YFC20-UK20	% 20	% 20
YFC30-UK10	% 30	% 10
YFC30-UK30	% 30	% 30

Tablo 4.34 YFC ve UK karışımlarının bir arada kullanıldığı karışım dizaynları

	KONTROL		YFC10-UK10		YFC10-UK20		YFC10-UK30	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	664,0	212,8	581,0	186,2	498,0	159,6
Silis dumanı	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0
YFC	0,0	0,0	83,0	29,6	83,0	29,6	83,0	29,6
UK	0,0	0,0	83,0	37,7	166,0	75,5	249,0	113,2
kuvars Tip 1	488,5	187,9	470,1	180,8	455,6	175,2	441,1	169,7
Kuvars Tip 2	243,7	95,6	234,7	92,0	227,6	89,3	220,5	86,5
Kuvars Tip 3	243,7	95,6	234,7	92,0	227,6	89,3	220,5	86,5
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	58,0	52,7	60,0	54,5	62,0	56,4
S/B	0,16	0,5	0,17	0,44	0,17	0,43	0,17	0,43
Katkı %	4,9	12,6	5,2	12,8	5,4	12,9	5,53	13,0
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2302,5	978,1	2269,0	980,8	2242,3	982,7	2215,7	984,5
lifli toplam	2536,5	1008,1	2503,0	1010,8	2476,3	1012,7	2449,7	1014,5
YayıllmaTablası	115 mm		115 mm		114 mm		114 mm	

Tablo 4.35 YFC ve UK karışımlarının bir arada kullanıldığı karışım dizaynları

	YFC20-UK10		YFC20-UK20		YFC30-UK10		YF30-UK30	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	581,0	186,2	498,0	159,6	498,0	159,6	332,0	106,4
Silis dumanı	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0	290,5	132,0
YFC	166,0	59,3	166,0	59,3	249,0	88,9	249,0	88,9
UK	83,0	37,7	166,0	75,5	83,0	37,7	249,0	113,2
Kuvars Tip 1	466,1	179,3	451,6	173,7	462,2	177,8	433,2	166,6
Kuvars Tip 2	232,8	91,3	225,7	88,5	230,8	90,5	216,6	85,0
Kuvars Tip 3	232,8	91,3	225,7	88,5	230,8	90,5	216,6	85,0
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	58,0	52,7	60,0	54,5	58,0	52,7	62,0	56,4
S/B	0,17	0,44	0,17	0,43	0,17	0,4	0,17	0,42
Katkı %	5,2	12,7	5,4	12,8	5,2	12,6	5,53	12,8
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2261,2	980,8	2234,5	982,7	2253,3	980,8	2200,0	984,5
lifli toplam	2495,2	1010,8	2468,5	1012,7	2487,3	1010,8	2434,0	1014,5
YayıllmaTablası	115		115		114		114	

Mineral katkı kombinasyonlarının basınç dayanımına etkisi Tablo 4.36, Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Buna göre basınç dayanımında, YFC10-UK10 kombinasyonu

ile kontrol karışımının performansı yakalanırken, YFC10-UK20 ile %97 ve YFC20-UK20 ile %92 oranında kontrol karışıma yaklaşarak da oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. UK'ün bağlayıcı olarak tek başına ikamesi ile kıyaslandığında YFC-UK kombinasyonlarının basınç dayanımı değişim daha düşük seviyelerde kaldığı görülmektedir (Tablo 4.32 ve Tablo 4.36).

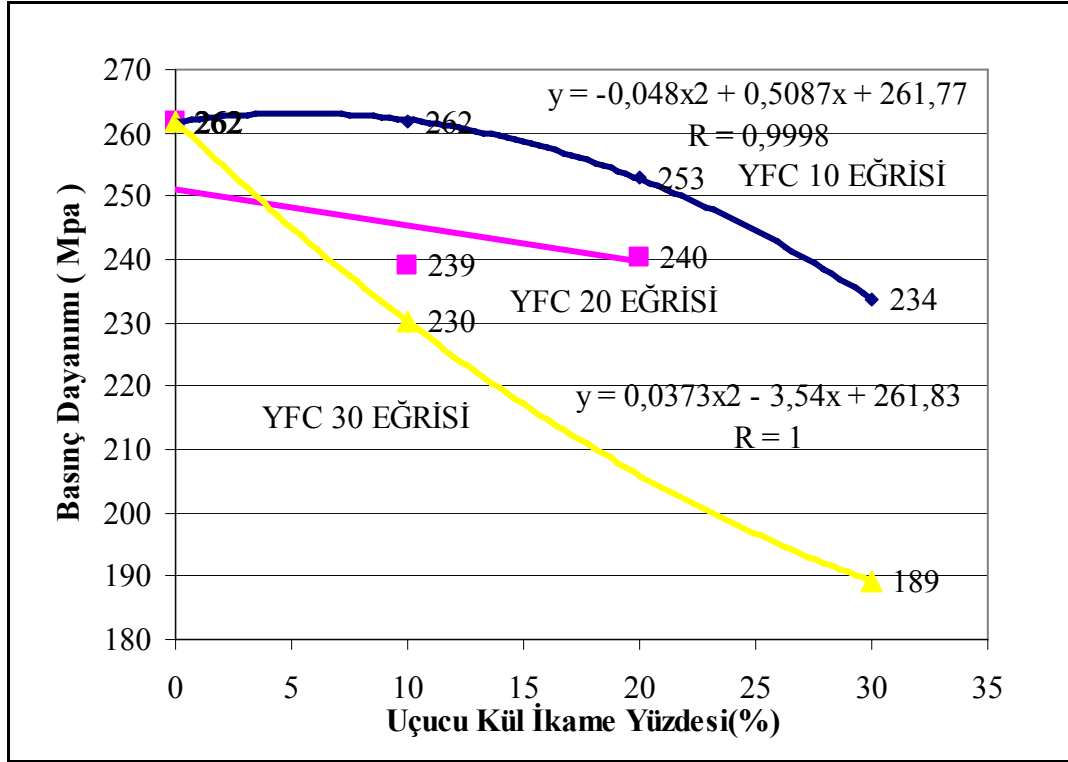
YFC ve UK kombinasyonlarının %60 gibi yüksek oranda yer değiştirmelerde otoklav kürü altında basınç dayanım değerleri gözlemlendiğinde, YFC30-UK30 karışımı ortalama 189 MPa basınç dayanımı verirken, UK60 166 MPa YFC 60 202 MPa basınç dayanımı vermiştir. Bu da YFC-UK yerine YFC'nın tek başına kullanımına tercih edilebileceği düşünülmektedir.

Şekil 4.14'ü incelediğinde üç eğride de toplam %40 ikame oranına bakıldığında, yani YFC10-UK30, YFC20-UK20, YFC30-UK10 karışımlarının sırasıyla basınç dayanımlarının 233 MPa, 240 MPa, 230 MPa olduğu görülmektedir. Bu da %40 ikameye kadar otoklav kürü altında dayanımlar da büyük düşüşlerin gözlenmediği ve kontrol karışımı olan SF35 ve birbirine yakın basınç dayanımı değerleri elde edilebileceğini göstermektedir.

%40 ikame yüzdesine kadar mineral katkıları ile hazırlanan karışımlardan YFC10 serisi (YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30) incelendiğinde, bu karışımlar otoklav kürü altında kontrol karışımına göre fazla basınç dayanımı kaybı göstermemişlerdir.

Tablo 4.36 YFC ve UK ikamesinde basınç dayanımları

Karışım Adı	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)
Kontrol SF35	272	262
	256	
	256	
YFC10-UK 10	270	262
	255	
	260	
YFC10 - UK20	255	253
	249	
	253	
YFC10 - UK30	231	234
	234	
	235	
YFC20 -UK10	240	239
	231	
	243	
YFC20 - UK20	240	240
	240	
	238	
YFC30 - UK 10	234	230
	232	
	224	
YFC30 - UK 30	187	189
	186	
	193	



Şekil 4.14 Basınç dayanımının UK veya YFC ikamesi ile değişimi

4.7 YFC ve/veya UK İkamesinde Silis Dumanının Azaltılmasının Mekanik Özelliklere Etkisi

CaO/SiO₂ oranı düşük olan çimento hamurları, nem kaçışının önlendiği koşullarda 150 °C üzerindeki sıcaklıklara ısıtılırsa içyapıda güçlü bir tobermorit jeli oluşur. Bu nedenle, hidrotermal reaksiyonlara maruz kalacak çimento hamurlarının CaO/SiO₂ oranının düşük olması istenir. Bu durum sisteme uygun miktarda ve reaktif formda SiO₂ ilave edilerek sağlanabilir. Sisteme silis ihtiyacını karşılaması için ilave edilen silis dumanı yanında bağlayıcı olarak ikame edilen mineral katkıları da (YFC ve/veya UK) sistemdeki reaktif silis miktarı arttırılmaktadır.

Tablo 4.37’de bu çalışmada kullanılan çimento, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufunun kimyasal içeriklerindeki CaO ve SiO₂ miktarları gösterilmiştir. Karışımlardaki CaO/SiO₂ oranını bulurken CaO molar ağırlığı 56,08, SiO₂ molar ağırlığı da 60,08 olarak alınmıştır. 1 m³ içerisinde çimentodan, silis dumanından,

yüksek fırın cürufundan ve uçucu külden gelen CaO ve SiO₂ miktarlarının toplamının oranlanması ile CaO/SiO₂ oranları belirlenmiştir.

Tablo 4.38, Tablo 4.39, Tablo 4.40'ta daha önce bu çalışmada yapılmış incelemelerdeki karışımların CaO/SiO₂ oranları ve bu çalışmalardan elde edilmiş basınç dayanım değerleri verilmiştir.

Tablo 4.37 Karışım içindeki malzemelerin CaO, SiO₂ yüzdeleri

Malzeme tipi	CaO yüzdesi	SiO ₂ yüzdesi
Çimento	62,92	20,06
Yüksek fırın cürufu	34,20	39,66
Uçucu kül	26,96	42,14
Silis dumanı	0,49	92,26

Tablo 4.38 Optimum silis dumanı yüzdesi incelemesindeki CaO / SiO₂ oranı basınç dayanımı

	SF%0	SF%10	SF%20	SF%25	SF%30	SF%35	SF%40	SF%45
CaO miktarı	9,37	9,38	9,39	9,39	9,40	9,40	9,40	9,41
SiO ₂ miktarı	2,77	4,04	5,31	5,95	6,58	7,22	7,86	8,49
CaO/SiO ₂ oranı	3,38	2,32	1,77	1,58	1,43	1,30	1,20	1,11
Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	171	204	239	249	249	259	248	245

Tablo 4.39 YFC veya UK ikamesindeki CaO / SiO₂ oranı basınç dayanımı

	KNTR	UK%20	UK%40	UK%60	YFC%20	YFC%40	YFC%60
CaO miktarı	9,40	8,29	7,19	6,08	8,48	7,56	6,64
SiO ₂ miktarı	7,22	7,65	8,43	9,04	7,65	8,08	8,52
CaO/SiO ₂ oranı	1,30	1,08	0,85	0,67	1,11	0,94	0,78
Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	262	248	229	167	254	244	202

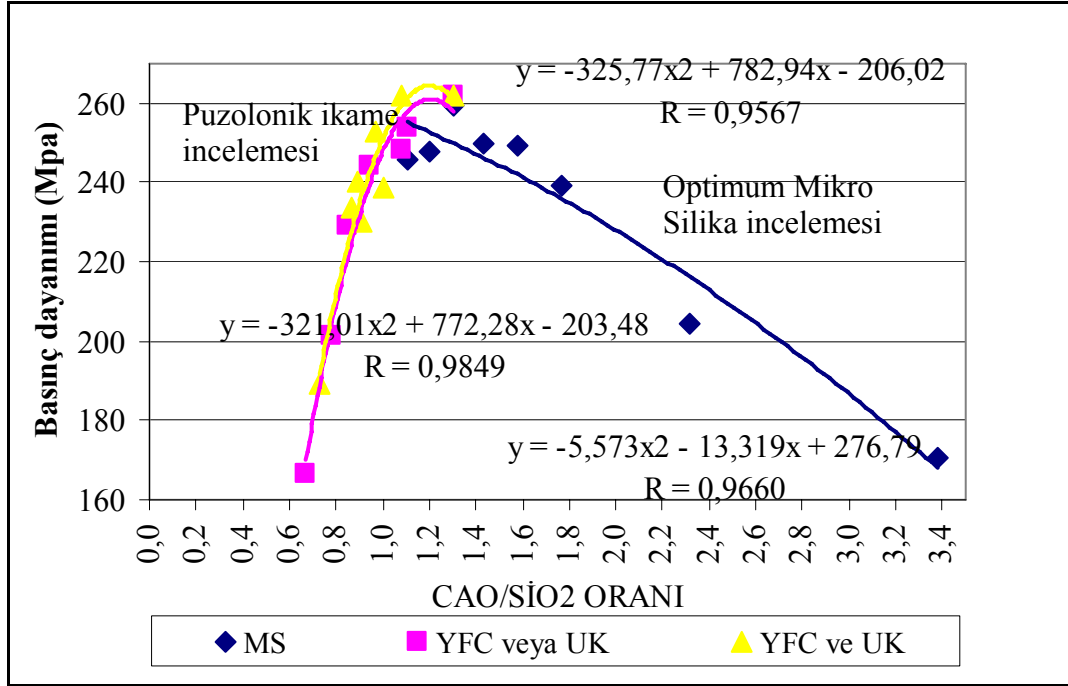
Tablo 4.40 YFC ve UK ikamesindeki CaO / SiO₂ oranına göre basınç dayanımı

	KNTR	YFC10- UK10	YFC10- UK20	YFC10- UK30	YFC20- UK10	YFC20- UK20	YFC30- UK10	YFC30- UK30
CaO miktarı	9,40	8,39	7,84	7,28	7,93	7,38	7,47	6,36
SiO ₂ miktarı	7,22	7,74	8,04	8,35	7,95	8,26	8,17	8,78
CaO/SiO ₂ oranı	1,30	1,08	0,97	0,87	1,00	0,89	0,91	0,73
Basınç Dayanımı Ortalaması (MPa)	262	262	253	234	239	240	230	189

Şekil 4.15'te optimum silis dumanı ve puzolanik ikamelerdeki (YFC ve/veya UK) CaO/SiO₂ oranlarının otoklav kürü altında basınç dayanımına etkisi gösterilmiştir. Şekil 4.15'ten görüldüğü üzere silis dumanı miktarının mekanik özelliklere etkisi incelemesinde, sistemdeki silis oranı arttırıldıkça CaO/SiO₂ oranı azalmış ve basınç dayanımı değeri de yükselmiştir. Ancak %35 silis dumanı içeriğinden sonra silis dumanı, basınç dayanımında azaltıcı etki oluşturmuştur. Puzolanik bağlayıcı ikamesi bölümünde ise karışımlarda ikame edilen UK ve/veya YFC ile sistemdeki silis oranı arttırılmış ve CaO/SiO₂ oranı düşürülmüştür. Bu karışımlarda da CaO/SiO₂ oranı azaldıkça, basınç dayanımı değeri de kontrol karışım olan SF35 karışımının basınç değerinin gerisinde kalmıştır.

Bu çalışmadaki gerek en uygun silis dumanı oranının incelemesinde; gerekse puzolonik bağlayıcıların ayrı ayrı ve birlikte ikamelerinde; karışımların otoklav kürü altında elde edilen basınç dayanımlarından, CaO/SiO₂ oranı 1,25–1.35 olan karışımların maksimum basınç dayanımları verdiği gözlenmiştir (Şekil 4.15).

Çıkan sonuçlar doğrultusunda, çalışmanın bundan sonraki aşamasında sisteme ilave edilen mineral katkıları ile artan reaktif silis sebebiyle sistemden belli oranda silis dumanı çekilerek, CaO/SiO₂ oranı sabit, benzer basınç dayanımı verebilecek karışımların oluşturulabileceği görülmektedir.



Şekil 4.15 CaO / SiO₂ oranı-basınç dayanımı grafiği

Kontrol karışımı (SF35) ve seçilen puzolanik bağlayıcı (YFC ve/veya UK) ikameli karışımlarda silis dumanı azaltmasına gidilerek CaO/SiO₂ oranı 1,30 olacak şekilde karışımlarda düzeltme yapılmıştır.

Yeni karışımlardaki kontrol karışıma göre içerdikleri silis dumanı yüzdeleri ve karışım dizaynları Tablo 4.41 ve Tablo 4.42’de verilmiştir. Tablo 4.43’de silis dumanı miktarı azaltılmış karışımların otoklav kürü altındaki basınç dayanımları ve mikro silis yüzleri görülmektedir.

Tablo 4.41 Mikro silis azaltmasındaki karışım dizaynları

	KONTROL		YFC10-UK10		YFC10-UK20		YFC10-UK30	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	664,0	212,8	581,0	186,2	498,0	159,6
Silis dumanı	290,5	132,0	205,0	93,2	157,4	71,5	109,7	49,9
YFC	0,0	0,0	83,0	29,6	83,0	29,6	83,0	29,6
UK	0,0	0,0	83,0	37,7	166,0	75,5	249,0	113,2
Kuars Tip 1	488,5	187,9	520,6	200,2	534,3	205,5	548,0	210,8
Kuars Tip 2	243,7	95,6	259,5	101,8	266,2	104,4	272,9	107,0
Kuars Tip 3	243,7	95,6	259,5	101,8	266,2	104,4	272,9	107,0
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	55,0	50,0	35,0	31,8	34,0	30,9	33,0	30,0
S/B	0,164	0,455	0,166	0,456	0,174	0,467	0,176	0,461
Katkı %	4,9	12,6	3,4	8,5	3,4	8,5	3,40	8,2
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2337,5	978,1	2260,6	959,9	2239,1	959,9	2212,2	958,1
lifli toplam	2571,5	1008,1	2494,6	989,9	2473,0	989,9	2446,5	988,1
Yayılma tablası	115 mm		115 mm		113 mm		113 mm	
SiO2		7,22		6,43		6,00		5,58
CaO		9,40		8,38		7,82		7,27
CaO/SiO2		1,302		1,303		1,303		1,303

Tablo 4.42 Sistemdeki mikro silis azaltmasının incelenmesindeki karışım dizaynları

	KONTROL		YFC20-UK20		UK20		YFC40	
	kg	dm3	kg	dm3	Kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	498,0	159,6	664,0	212,8	498,0	159,6
Silis dumanı	290,5	132,0	120,0	54,5	194,6	88,5	141,0	64,1
YFC	0,0	0,0	166,0	59,3	0,0	0,0	332,0	118,6
UK	0,0	0,0	166,0	75,5	166,0	75,5	0,0	0,0
Kuars Tip 1	488,5	187,9	552,4	212,5	516,2	198,5	561,0	215,8
Kuars Tip2	243,7	95,6	275,1	107,9	257,3	100,9	279,3	109,5
Kuars Tip 3	243,7	95,6	275,1	107,9	257,3	100,9	279,3	109,5
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
katkı	55,0	50,0	38,0	34,5	38	38,2	35,0	31,8
S/B	0,164	0,455	0,183	0,492	0,17	0,462	0,177	0,497
katkı %	4,9	12,6	4,0	9,9	3,7	10,1	3,6	9,3
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2337,5	978,1	2265,7	962,7	2244,8	966,3	2304,9	959,9
lifli toplam	2571,5	1008,1	2499,7	992,7	2478,8	996,3	2538,9	989,9
Yayılma tablası	115		115		114		117	
SiO2		7,22		5,65		6,36		5,79
CaO		9,40		7,36		8,29		7,55
CaO/SiO2		1,302		1,303		1,303		1,303

Tablo 4.43, Tablo 4.44 ve Şekil 4.16’da silis dumanı miktarının basınç dayanımına etkisi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Buna göre %40 ikame oranına kadar CaO/SiO₂ oranı 1,30 sabit tutulacak şekilde karışımlardaki silis miktarının azaltılması basınç dayanımlarının artmasına ve kontrol karışımı olan SF35 karışımını yakalamasını sağlamıştır. Tablo 4.44’den görüleceği üzere kontrol karışımı olan SF35’e göre YFC10-UK10, YFC10-UK20, UK20 karışımlarında sırasıyla %7,%7,%6 basınç dayanımı artışı gözlenmiştir.

Çimento yerine %40 oranında UK ve/veya YFC kullanımı durumunda ise mikro silisteki azaltma karışımlara göre farklı olmak üzere basınç dayanımında bir miktar düşüşe yol açmıştır. Tablo 4.44’den de görüleceği üzere kontrol karışımı olan SF35’e göre YFC10-UK30,YFC20-UK20 ve YFC 40 karışımlarının basınç dayanımlarında sırasıyla %7, %14, %5 dayanım kayıpları gözlenmiştir. Bu dayanım kayıpları için karışım içerisinde bulunan yüksek miktardaki puzolanik bağlayıcı ikamesi neden gösterilebilir.

Sistemde alternatif silis kaynağı (UK ve/veya YFC) kullanılması durumunda, karışımdaki mikro silis miktarının azaltılabileceği görülmektedir. Böyle bir azaltma hidrasyon ısısı açısından avantaj sağlayacağı gibi, hem silis maliyetinden, hem de akışkanlaştırıcı katkı maliyetinden tasarruf sağlamaktır. Çünkü azalan mikro silis kullanım oranı ile birlikte aynı işlenebilirliği sağlayan akışkanlaştırıcı katkı miktarını da azaltmaktadır. Bu yüzden mikro silis miktarı azaltılmasıyla birlikte süper akışkanlaştırıcı miktarında da azaltmaya gidilmiştir.

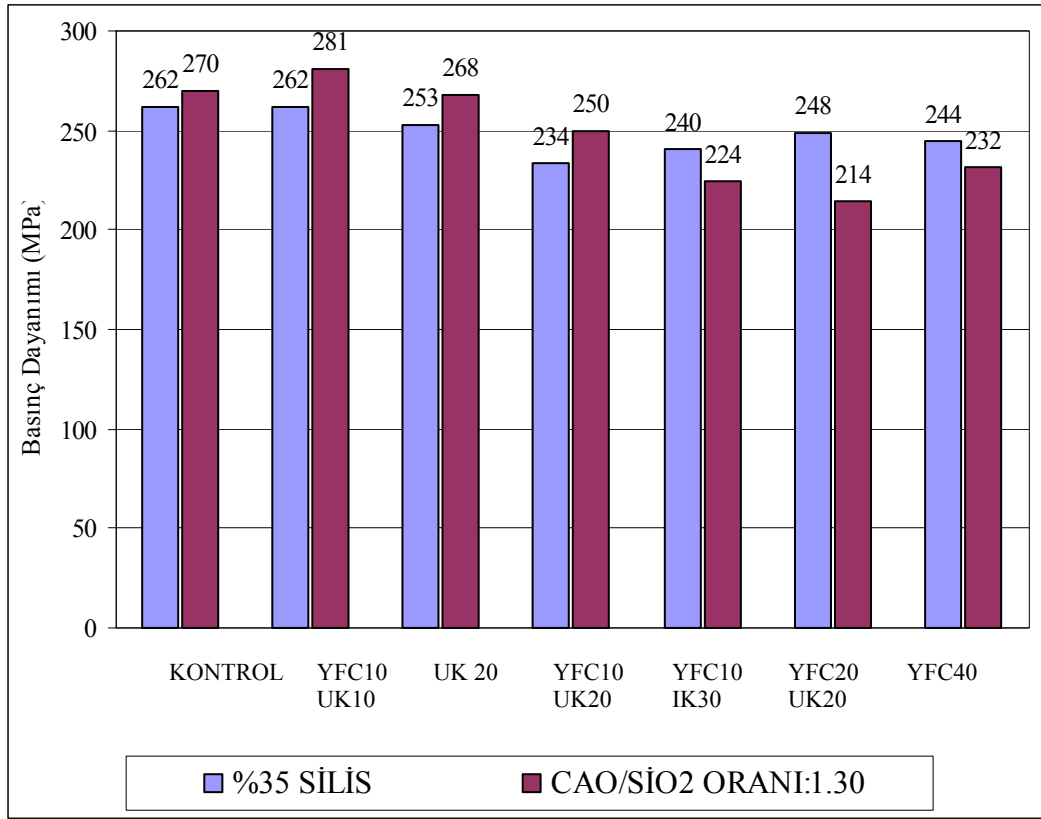
Çalışmanın bu bölümünden çıkan sonuçlar doğrultusunda bağlayıcı yerine atık puzolanik maddelerin (UK ve/veya YFC) ikamesi çimento tasarrufu kadar mikro silis ve süper akışkanlaştırıcı tasarrufu sağladığı söylenebilir. Böylece mineral katkılar ile reaktif pudra betonun basınç dayanımı özelliğinin, çimento bağlayıcılığı ve silis dumanından oluşan klasik RPB’ye göre iyileştirilebileceği görülmektedir

Tablo 4.43 CaO / SiO₂ oranları 1,30 olan karışımların basınç dayanımları

Karışım Adı	Basınç dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)
KONTROL SF35	281	270
	267	
	262	
YFC10-UK 10	285	281
	283	
	276	
UK 20	269	268
	267	
	268	
YFC10 - UK20	251	249
	244	
	254	
YFC10 - UK30	220	224
	226	
	226	
YFC20 - UK20	216	214
	214	
	213	
YFC40	235	231
	225	
	234	

Tablo 4.44 Mikro silis miktarına göre basınç dayanımlarının kıyaslanması

Karışım Adı	En uygun MS yüzdesi	En uygun MS örneklerin basınç dayanımı (MPa)	Azaltılmış MS yüzdesi (çimentoya ağırlına göre)	Azaltılmış MS yüzdesi (Toplam bağlayıcıya göre)	MS azaltılmış örneklerin basınç dayanımı (MPa)
SF35	%35	262	%35	%35	270
YFC10-UK10		262	%30	%25	281
YFC10-UK20		234	%27	%19	250
YFC10-UK30		240	%22	%13	224
YFC20-UK 20		248	%24	%14	214
UK20		253	%29	%23	268
YFC40		244	%28	%17	231



Şekil 4.16 Azaltılmış Mikro silis karışımlarının basınç dayanımı grafiği

4.8 Mineral Katkılarla Geliştirilen Reaktif Pudra Betonlarının Farklı Kürler Altında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Beton üretiminin en önemli aşamalarından birisi de betonun kür edilmesi işlemidir. Genel anlamıyla kür; betonun mukavemet kazanması için çimento hidrasyonunu ilerletmek amacıyla kullanılan yöntem ve yapılan uygulamalara verilen addır. Çalışmanın bu aşamasına kadar hazırlanan tüm örnekler otoklav kürü (2MPa – 8 Saat) altında kür edilmiş ve basınç dayanımı değerleri incelenmiştir.

Çalışmanın bu kısmında ise seçilen mineral katkıli RPB karışımlarının farklı kür koşulları (standart kür, buhar kürü ve otoklav kürü) altındaki basınç dayanımları, eğilme dayanımları, tokluk değerleri incelenmiştir.

4.8.1. Eğilme Dayanımlarının ve Tokluk Değerlerinin Belirlenmesi:

Eğilme davranışının inceleneceği deneysel çalışmanın bu kısmında 4/4/16 cm'lik prizmatik kalıplar kullanılmıştır. Bu örnekler öncelikle eğilme deneyine tabi tutulmuş sonrasında kırılmış ve her iki parçada basınç deneyi uygulanmıştır (Şekil 4.17).

Numunelerin eğilme dayanımı ve toklukları mesnet açıklığı 13 cm olan 3 noktalı eğilme deneyi ile belirlenmiştir. Elektromekanik servo kontrollü eğilme presinde deney gerçekleştirilmiştir. Deney deplasman kontrollü olarak 0.8 mm/dak şeklinde gerçekleştirilmiştir. 3 noktalı eğilme deneyinde numunelerin orta nokta deplasmanları 0.001 mm hassasiyetinde optik encoder kullanarak belirlenmiş ve her bir numune için yük deplasman grafikleri 2.5 mm orta nokta deplasmanına kadar eş zamanlı olarak elde edilmiştir. Numunelerin tokluğunda ise, 2.5 mm orta nokta deplasmanına kadar yük deplasman eğrisi altında kalan alan göz önüne alınmıştır.



Şekil 4.17 Eğilme deneyi ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneyi

Çalışmanın bu bölümde kontrol karışımı ve mineral katkılarla geliştirilen karışımlar (YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, UK20, YFC40) kullanılmıştır. Karışım dizaynlarında YFC40 ve YFC10-UK30 dışındakilerde değişiklik yapılmamıştır (Tablo 4.41, Tablo 4.42). %40 ikame içeren bu iki

karışımlardaki silis azaltmasında aşırı dayanım kayıpları gözlenmesi sebebiyle, sistemden çekilen silis dumanının bir kısmı tekrar sisteme ilave edilmiştir. Çekilen silisin bir kısmının tekrar sisteme sokulmasıyla bu karışımların da kontrol karışımına (SF35) yakın basınç dayanımı vermesi amaçlanmıştır. YFC40 ve YFC10-UK30 karışımlarında CaO/SiO₂ oranı 1,20 olacak şekilde silis dumanı artırımı yapılmıştır (Tablo 4.45).

Kontrol karışımına göre silis dumanı azaltması çalışmasında, otoklav kürü altında %15 basınç dayanımı kaybına uğrayan YFC20-UK20 bu incelemede karışımlara dahil edilmemiştir.

Karışımların standart kürede 2,7,28,56 günlük eğilme dayanımları ve tokluk değerleri Tablo 4.46 ve Tablo 4.47’de yük deplasman ilişkileri de Şekil 4.19, Şekil 4.20, Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de; Buhar ve otoklav kürü sonrası eğilme dayanımları Tablo 4.48’de, yük deplasman ilişkisi ise Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’te verilmiştir. Farklı kür koşullarına göre eğilme dayanımı ilişkisi Şekil 4.25, Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’de sunulmuştur.

Tablo 4.45 CaO/SiO₂ oranı 1,20 olan karışımların karışım dizaynları

	YFC10-UK30		YFC40	
	kg	dm ³	kg	dm ³
Çimento	498,0	159,6	498,0	159,6
Silis dumanı	141,0	64,1	173,5	78,9
YFC	83,0	29,6	332,0	118,6
UK	249,0	113,2	0,0	0,0
Kuvars Tip1	529,5	203,6	541,8	208,4
Kuvars Tip 2	263,8	103,5	269,9	105,8
Kuvars Tip 3	263,8	103,5	269,9	105,8
Su	151,0	151,0	151,0	151,0
ACE	33,0	30,0	23,0	20,9
S/B	0,18	0,46	0,16	0,46
ACE %	3,40	8,2	2,3	5,9
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2212,2	958,1	2259,1	949,0
Yayılma Tablası	115 mm		115 mm	
lifli toplam	2446,2	988,1	2493,1	979,0

Şekil 4.18’de eğilme sonrası iki parçaya ayrılmış örnek görülmektedir. Şekilden görüleceği üzere matris içerisinde dağılmış olan 6 mmlik düz liflerin kopmadığı matristen sıyrıldığı gözlenmiştir.

Tüm küllerde maksimum yük sonrası çelik liflerin matris içindeki dağılımına göre maksimum yükten sonra yük deplasman eğrisinin azalan kısmında iniş ve çıkışlar gözlenmiştir. Bu durum gerilme altındaki liflerin gerilme köprülenmesi üstlenmesi ile açıklanabilir. Gerilme köprülenmesi lif ile matris ara yüzeyindeki aderans kuvvetleri sayesinde gerçekleşmiştir. Gerilme altındaki lifler deplasman arttıkça ve çatlak açıldıkça matristen aşama aşama sıyrılacak veya lif matris aderansı çok kuvvetli ise ya da lifin matris içerisinden sıyrılmasına engel olacak kanca, yüzeyindeki pürüz, çentik v.b. olması durumunda da sıyrılamayarak kopacaktır. Liflerin bu şekilde gerilme köprüsü görevi üstlenmelerinden dolayı matris çatlasa bile enkesit hala yük taşıyabilmektedir. Bu davranışta RPB’yi geleneksel betondan ayırmaktadır.



Şekil 4.18 Eğilme deneyi sonrası kırılan örnekteki lif dağılımı

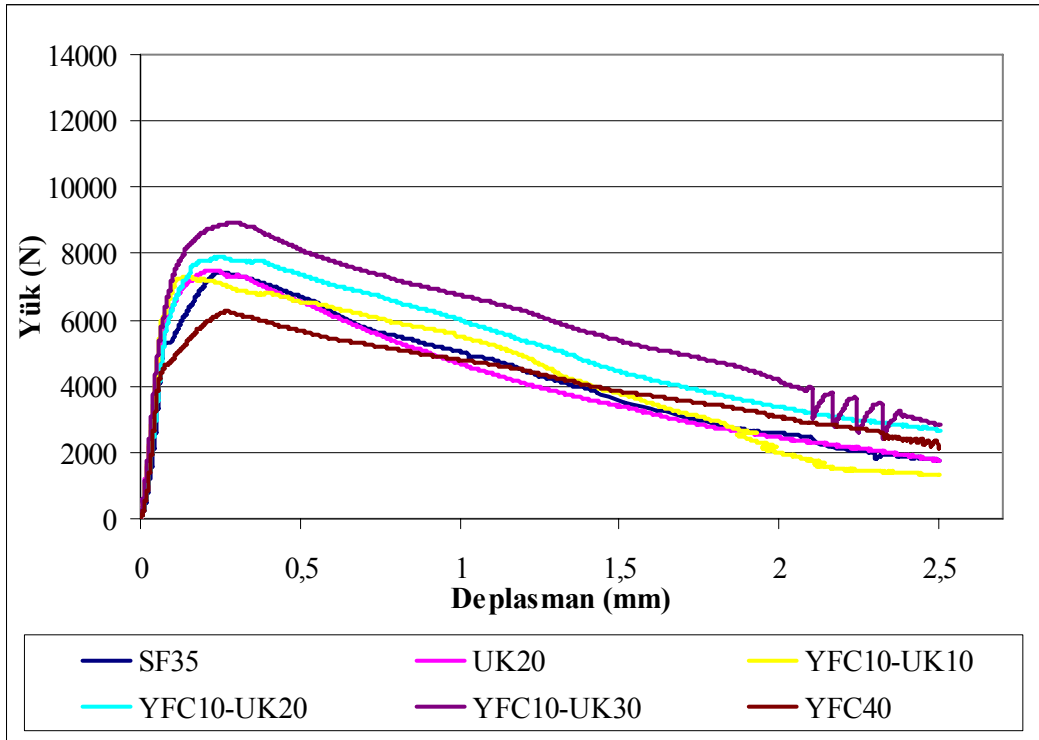
SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının 2 ve 7 günlük standart kür sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.46'de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.19, Şekil 4.20'de verilmiştir.

2 ve 7 günlük standart kür sonrası elde edilen yük deplasman grafikleri incelendiğinde, özellikle 2 günlük tüm numunelerin yük deplasman grafiğinin azalan kısmında artan orta nokta deplasmanına karşılık ani yük değişimleri gözlenmemiştir. Bu durum 2 günlük standart kürde tutulan örneklerde, liflerin yapı matrisine yeterli tutunmayı sağlayamadığı ve kolaylıkla matristen sıyrılabileceğini göstermektedir (Şekil 4.19). 7 günlük standart kür uygulamasının yük deplasman eğrisinde ise kontrol karışımı ve UK20 karışımı dışındaki diğer karışımlarda da ani yük değişimleri gözlenmemiştir. Bu durum mineral bağlayıcı ikame yüzdesi artan karışımlarda hidrasyonun, kontrol karışıma göre daha yavaş devam ettiği ve 7 günlük standart kür de lif ile matris arasında güçlü aderans kuvvetlerinin oluşmadığı göstermektedir.

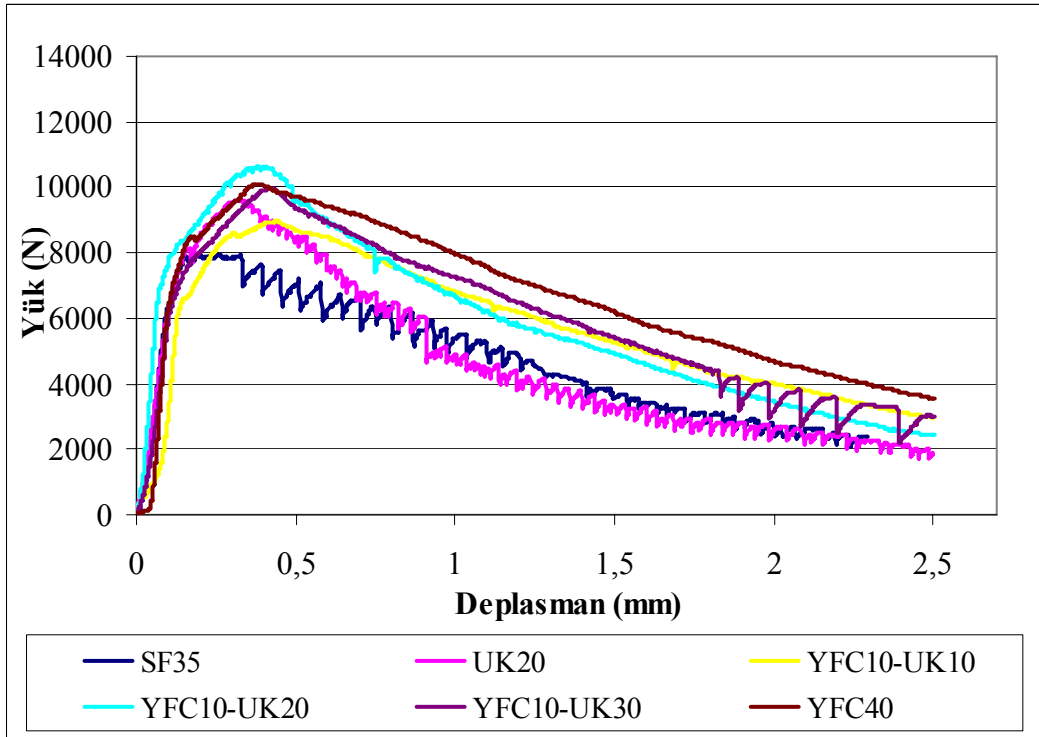
Genel olarak mineral katkılı karışımların 2 ve 7 günlük standart kürlerinde kontrol karışımının eğilme dayanımı değerini yakaladığı, tokluk değerinde ise kontrol karışımı aştığı görülmektedir (Tablo 4.46).

Tablo 4.46 2 gün ve 7 gün standart kür uygulanan örneklerin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri

Karışımlar	2 gün standart kür			7 gün standart kür		
	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (Mpa)	Tokluk Ort. (N.mm)	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (Mpa)	Tokluk Ort. (N.mm)
SF35 KONTROL	7545,8	23,0	10375,8	7760,9	23,6	11252,1
UK20	7448,7	22,7	11101,5	10131,2	30,9	14353,1
YFC10-UK10	7662,2	23,3	11791,8	9221,7	28,1	9221,7
YFC10-UK20	8624,6	26,3	13873,3	11480,5	35,0	17193,5
YFC10-UK30	7937,7	24,2	11983,2	10129,6	30,9	15868,0
YFC40	7319,8	22,3	11264,7	10331,8	31,5	16305,0



Şekil 4.19 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların 2 gün standart kür sonrası yük deplasman eğrileri



Şekil 4.20 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların 7 gün standart kür sonrası yük deplasman eğrileri

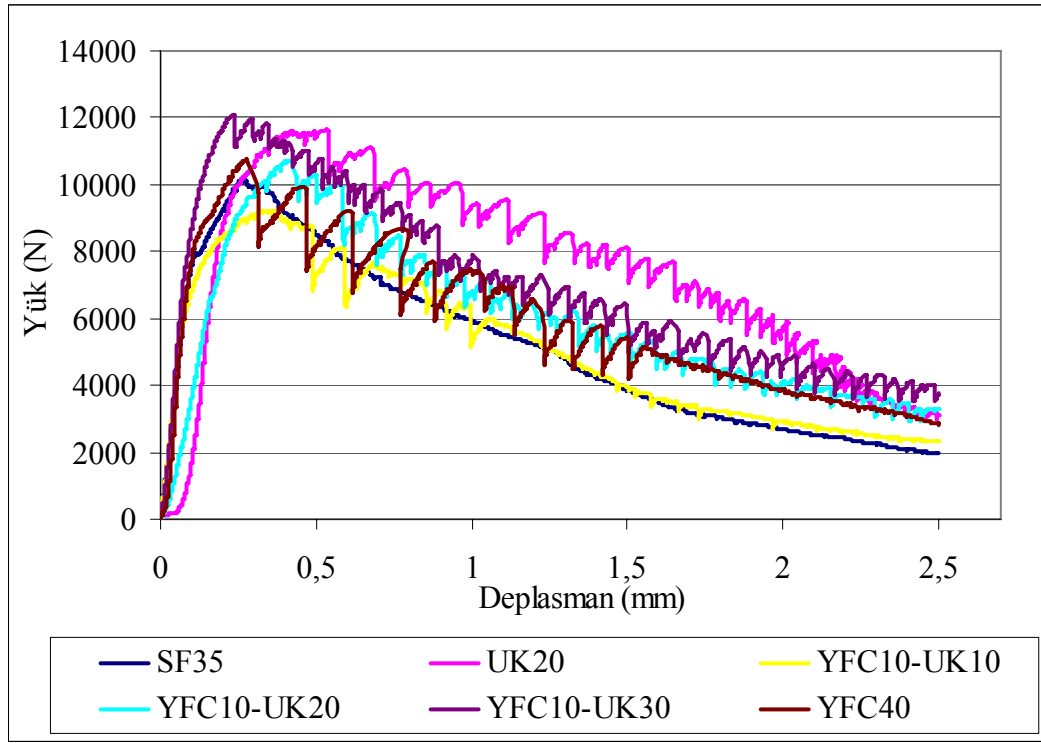
SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının 28 ve 56 günlük standart kür sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.47’de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.21, Şekil 4.22’de verilmiştir.

28 ve 56 günlük standart kür sonrası elde edilen yük deplasman grafikleri incelendiğinde özellikle yük deplasman grafiğinin azalan kısmında artan orta nokta deplasmanına karşılık ani yük değişimleri diğer kürlere kıyasla daha belirgin gözlenmiştir. Bu durum 28 ve 56 günlük standart kürde tutulan örneklerde, lifler ile yapı matrisi arasında oluşan aderans kuvvetlerinin güçlendiğinin göstermektedir. (Şekil 4.21 ve Şekil4.22).

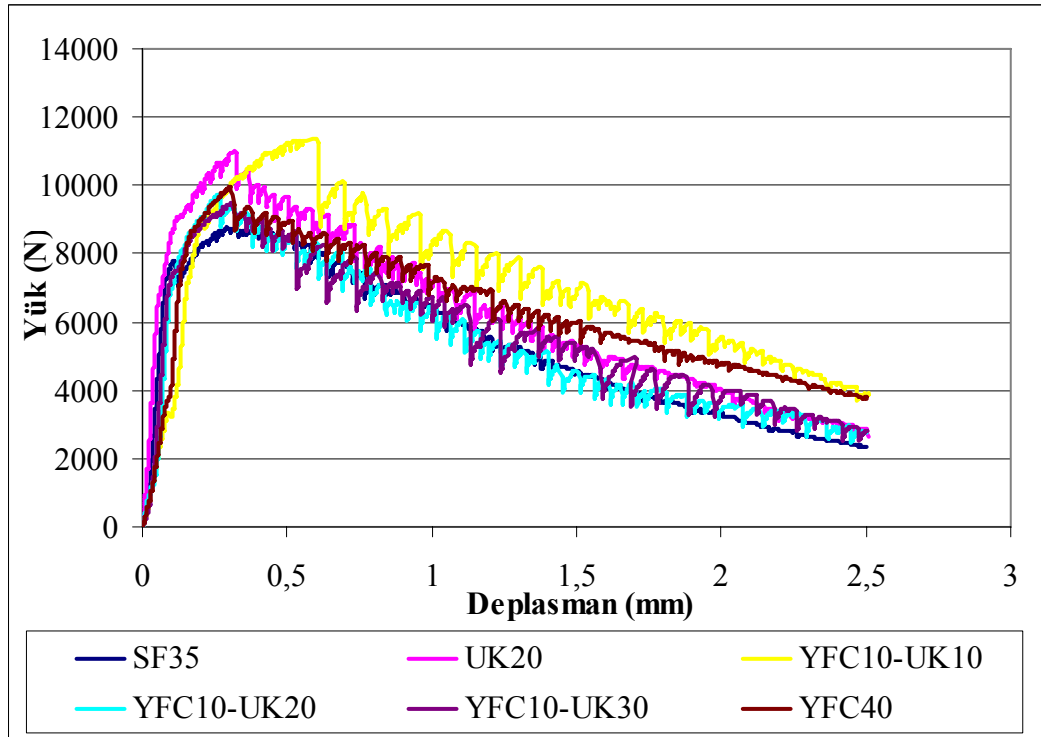
Genel olarak mineral katkılı karışımların 28 ve 56 günlük standart kürlerinde kontrol karışımının eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinin aştığı görülmektedir. 2 ve 7 günlük standart kür, yük deplasman eğrileri ile karşılaştırıldığında, 28 ve 56 günlük standart kür sonrası karışımların göstermiş oldukları yük deplasman eğrisi karışımlarda birbirlerine benzer olmuştur.

Tablo 4.47 28 gün ve 56 gün standart kür uygulanan örneklerin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri

	28 gün standart kür			56 gün standart kür		
	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (Mpa)	Tokluk Ort. (N.mm)	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (Mpa)	Tokluk Ort. (N.mm)
SF35 KONTROL	9394,5	28,6	12675,6	9377,8	28,6	12946,3
UK20	11365,3	34,6	17905,2	11195,3	34,1	16133,3
YFC10-UK10	10082,4	30,7	15027,9	11631,9	35,4	16700,4
YFC10-UK20	11640,8	35,5	15697,2	9070,2	27,6	12559,7
YFC10-UK30	12705,7	38,7	18531,9	9322,5	28,0	14077,4
YFC40	11316,0	34,5	16212,0	9453,0	28,8	14024,1



Şekil 4.21 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların 28 gün standart kür sonrası yük deplasman eğrileri



Şekil 4.22 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların 56 gün standart kür sonrası yük deplasman eğrileri

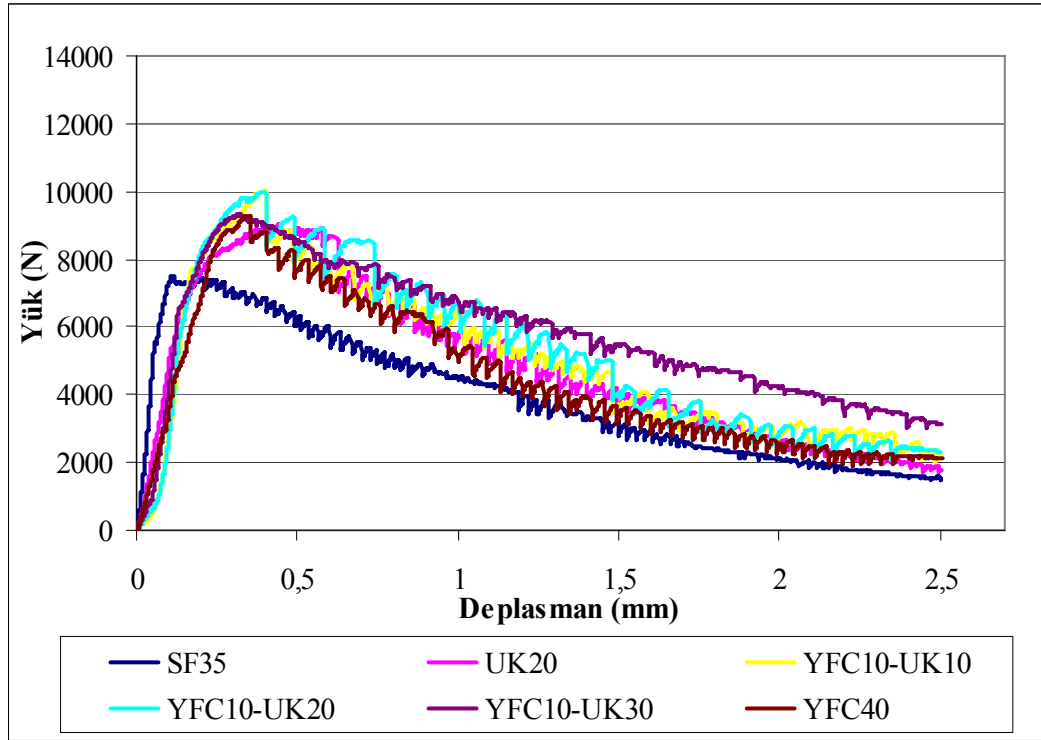
SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının buhar ve otoklav kürleri sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.48’de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.23, Şekil 4.24’de verilmiştir.

Buhar ve otoklav kürleri sonrası elde edilen yük deplasman grafikleri incelendiğinde, özellikle yük deplasman grafiğinin azalan kısmında artan orta nokta deplasmanına karşılık ani yük değişimleri diğer kürlere (28 ve 56 gün standart kür) kıyasla azaldığı grafiklerde daha kısa iniş ve çıkışların olduğu görülmektedir. (Şekil 4.23 ve Şekil 4.24). Eğrideki bu değişkenliğin azalması otoklav ve buhar kürlerinde, 28 günlük standart küre göre çelik lifler ile matris arasında daha zayıf yapışma kuvvetinin oluştuğunu göstermektedir.

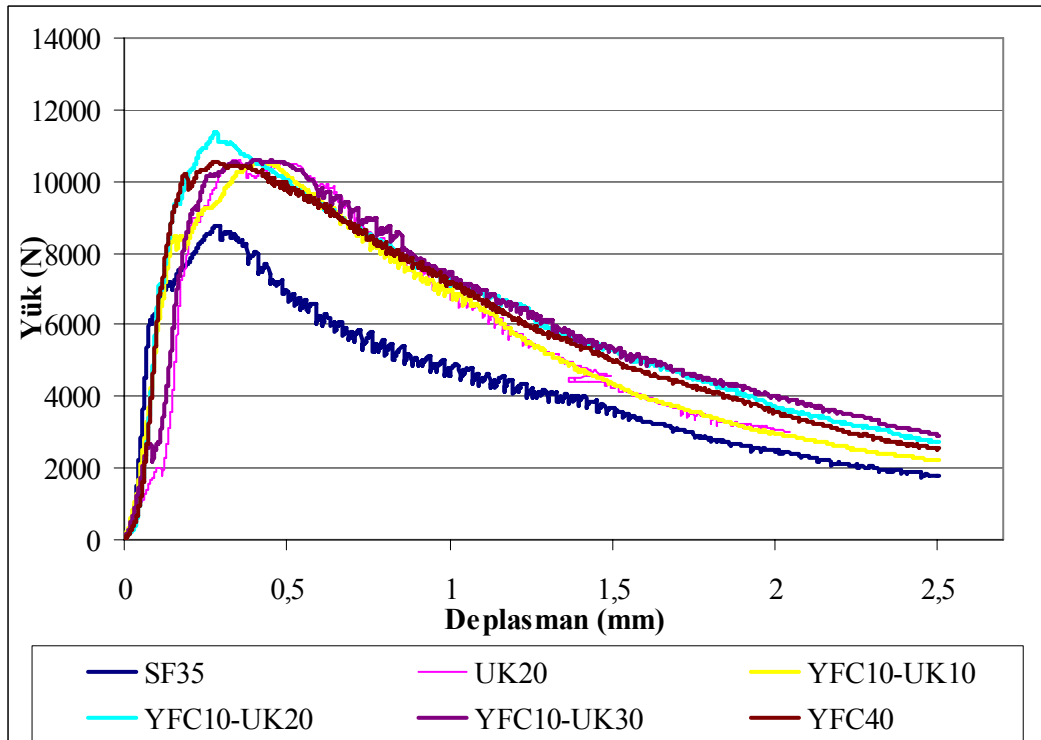
Genel olarak mineral katkılı karışımların buhar ve otoklav kürlerinde kontrol karışımının eğilme dayanımı ve tokluk değerlerinin aştığı görülmektedir. Hem buhar hem de otoklav kür yük deplasman eğrilerinde her iki kürde de minimum eğilme kuvveti kontrol karışımında oluşurken, maksimum eğilme kuvveti de YFC10-UK10 karışımında görülmüştür.

Tablo 4.48 Buhar veya otoklav kürü uygulanan örneklerin eğilme dayanımları ve tokluk değerleri

	Buhar kürü			Otoklav kürü		
	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (Mpa)	Tokluk Ort. (N.mm)	Pmax ort. (N)	Eğilme Dayanımı Ort. (MPa)	Tokluk Ort. (N.mm)
SF35 KONTROL	7680,1	23,4	9357,0	9378,5	28,6	11628,3
UK20	6717,8	30,7	12602,9	10445,7	31,8	15351,1
YFC10-UK10	10280,2	31,8	13466,4	10241,1	31,2	14218,7
YFC10-UK20	10632,3	30,2	11674,3	11125,2	33,9	15009,1
YFC10-UK30	9322,5	26,1	12156,7	10750,4	32,8	15122,7
YFC40	10259,4	29,5	12273,9	11101,9	33,8	15519,7



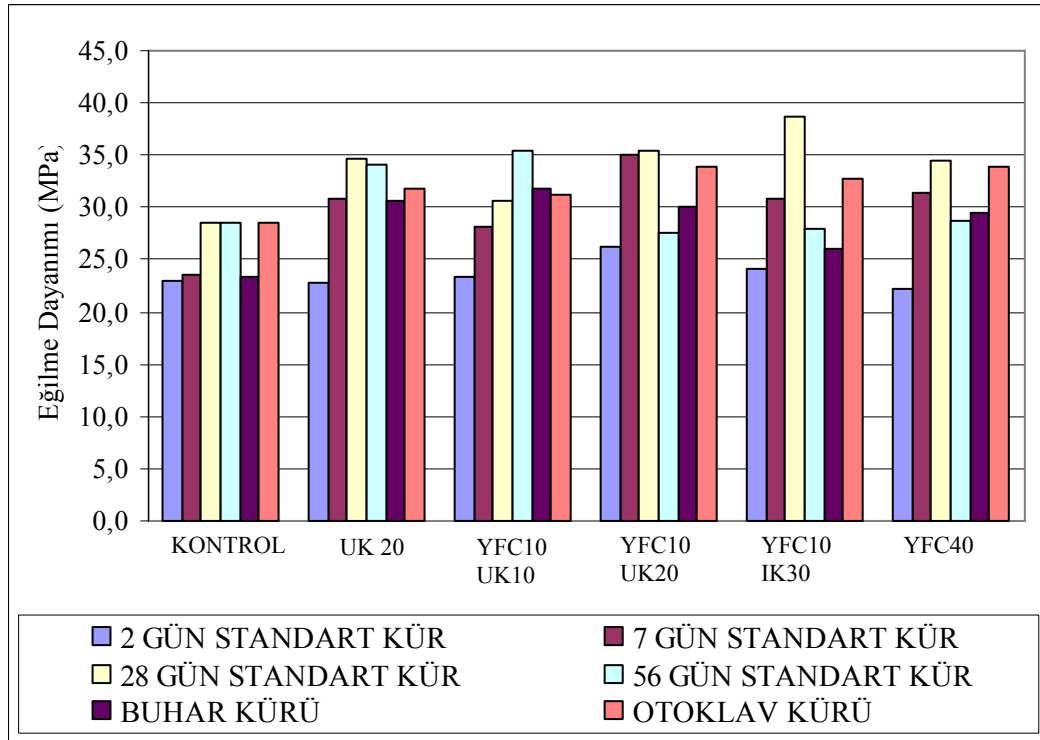
Şekil 4.23 Kontrol (SF35) ve mineral katkılı karışımların buhar kürü sonrası yük deplasman eğrileri



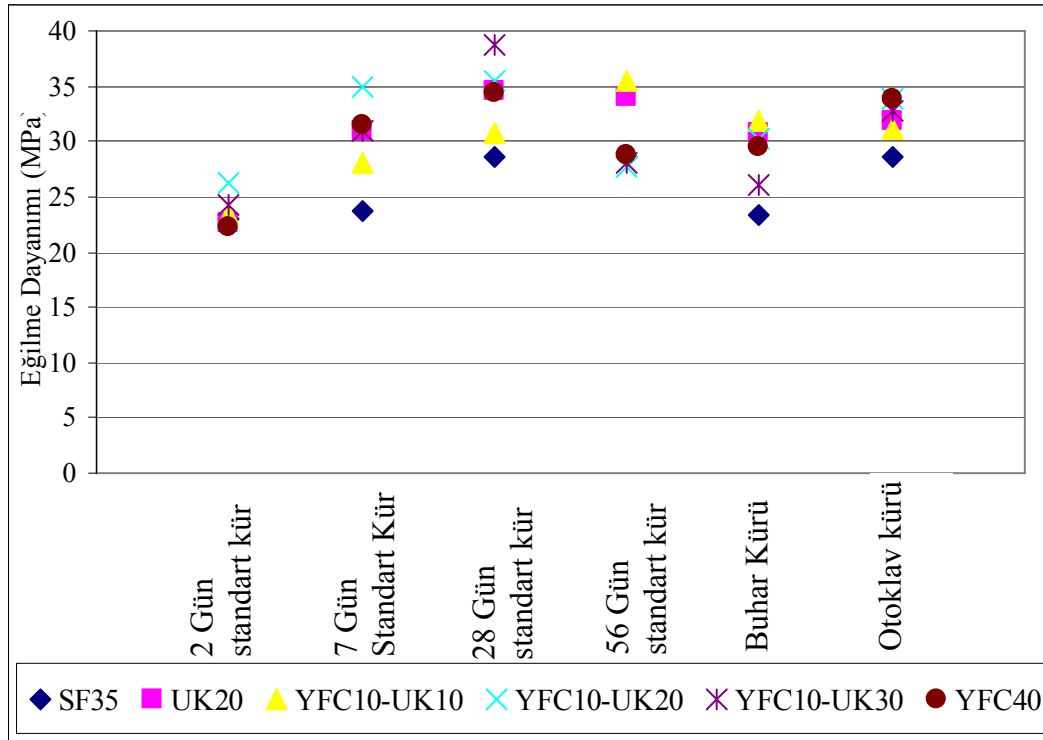
Şekil 4.24 Kontrol (SF35) ve mineral katkılı karışımların otoklav kürü sonrası yük deplasman eğrileri

SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının farklı kürler sonrası eğilme dayanımı değerleri ilişkileri Şekil 4.25, Şekil 4.26'da verilmiştir.

Genel olarak mineral katkılı karışımların kontrol karışımından daha iyi performans gösterdiği görülmektedir. Mineral katkılı tüm karışımların (YFC ve/veya UK) eğilme dayanımları ve tokluk değerleri sadece çimento ve mikro silis içeren kontrol karışımdan daha yüksektir. Bu durum ikame edilen mineral katkıların çelik lif, bağlayıcı ve agrega ara yüzeylerini iyileştirmeleriyle açıklanabilir.



Şekil 4.25 Kontrol (SF35) ve mineral katkılı karışımların farklı kür koşulları altında eğilme dayanımı



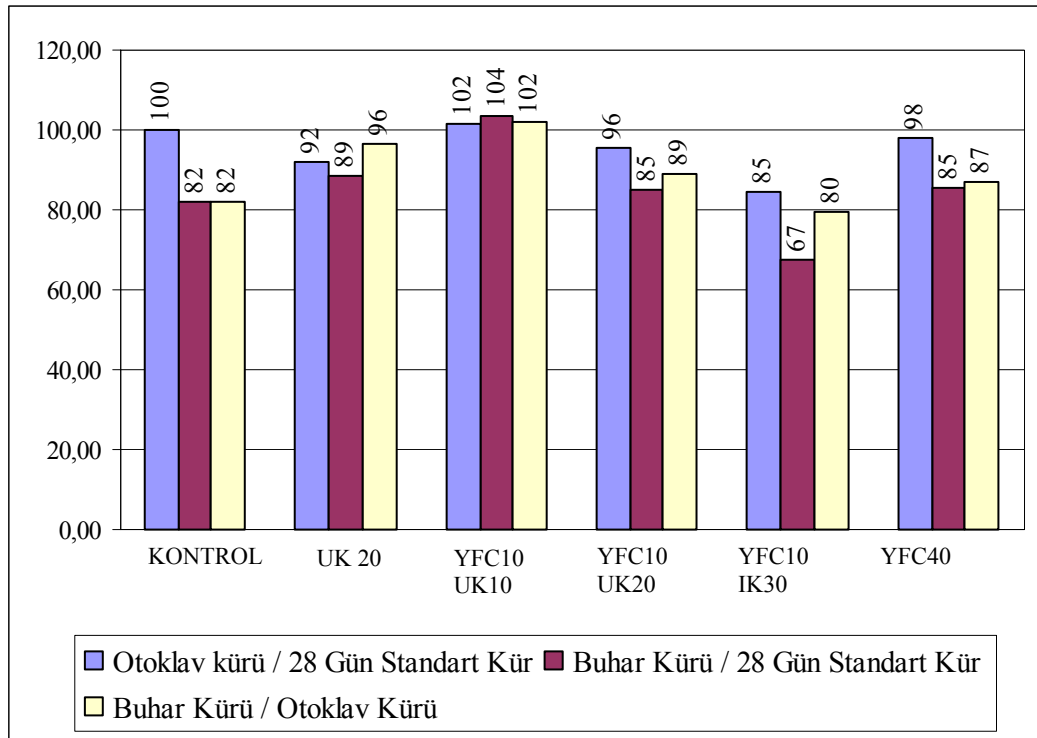
Şekil 4.26 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli farklı kür koşulları altında eğilme dayanımı değerleri grafiği

SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının farklı kürler sonrası eğilme dayanımı ilişkileri ise Tablo 4.49’da ve Şekil 4.27’de verilmiştir.

Tablo 4.49’da ve Şekil 4.27’de otoklav kürünün ve buhar kürünün 28 günlük standart kürü; buhar kürünün de otoklav kürünü eğilme dayanımları bakımından ne oranda yakaladığı görülmektedir. Tüm karışımlarda otoklav kürü eğilme dayanımları, 28 günlük standart kür eğilme dayanımlarını yakalamıştır. Buhar kürü eğilme dayanımları ise otoklav kürü eğilme dayanımlarına göre daha geride kalmıştır. Bu da otoklav kürü eğilme dayanımları ile 28 günlük standart kür eğilme dayanımlarını 1 günde yakalanabileceğini göstermektedir. YFC10-UK10 karışımı diğer karışımlardan farklı olarak gerek buhar kürü gerekse otoklav küründe birbirine çok yakın eğilme dayanımı değerleri vermiştir.

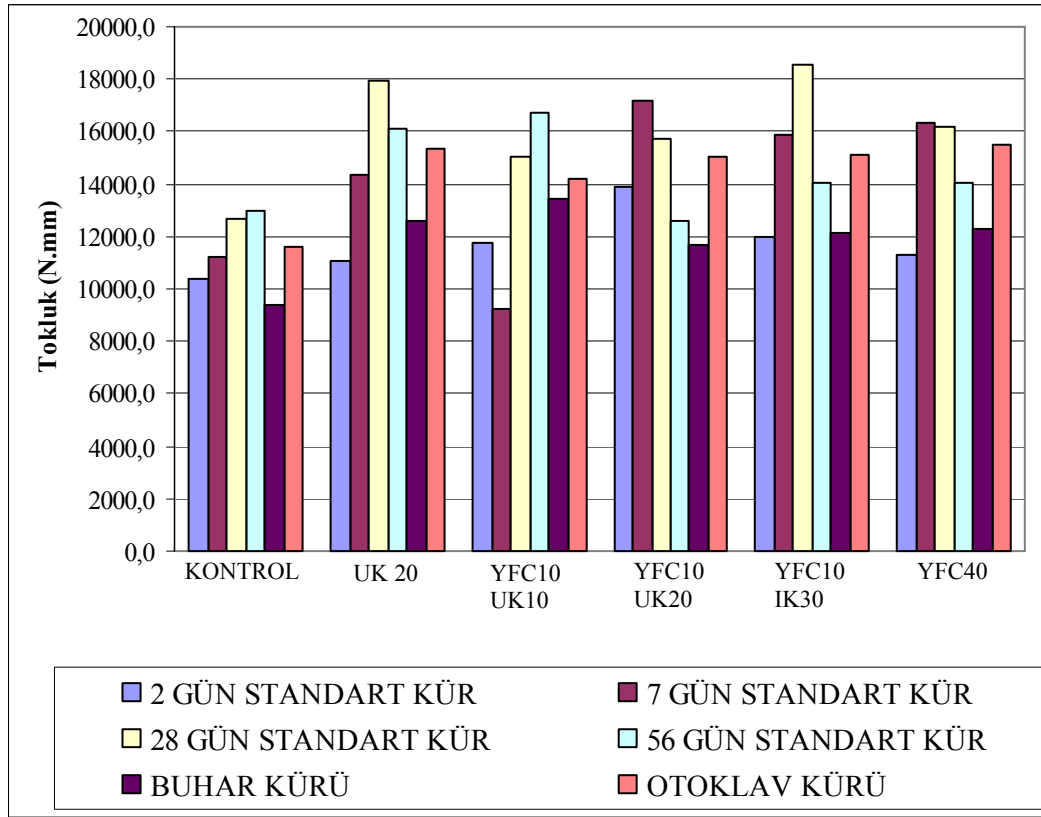
Tablo 4.49 Farklı kür koşulları altında eğilme değerlerinin karşılaştırılması

	Otoklav Kürü / 28 Gün Standart Kür eğilme dayanımları (%)	Buhar kürü / 28 gün standart kür eğilme dayanımları (%)	Buhar Kürü / Otoklav kürü eğilme dayanımları (%)
SF35	99,83	81,75	81,89
UK 20	91,91	88,66	96,47
YFC10-UK10	101,57	103,63	102,03
YFC10-UK20	95,57	85,01	88,95
YFC10-UK30	84,61	67,37	79,62
YFC40	98,11	85,43	87,08

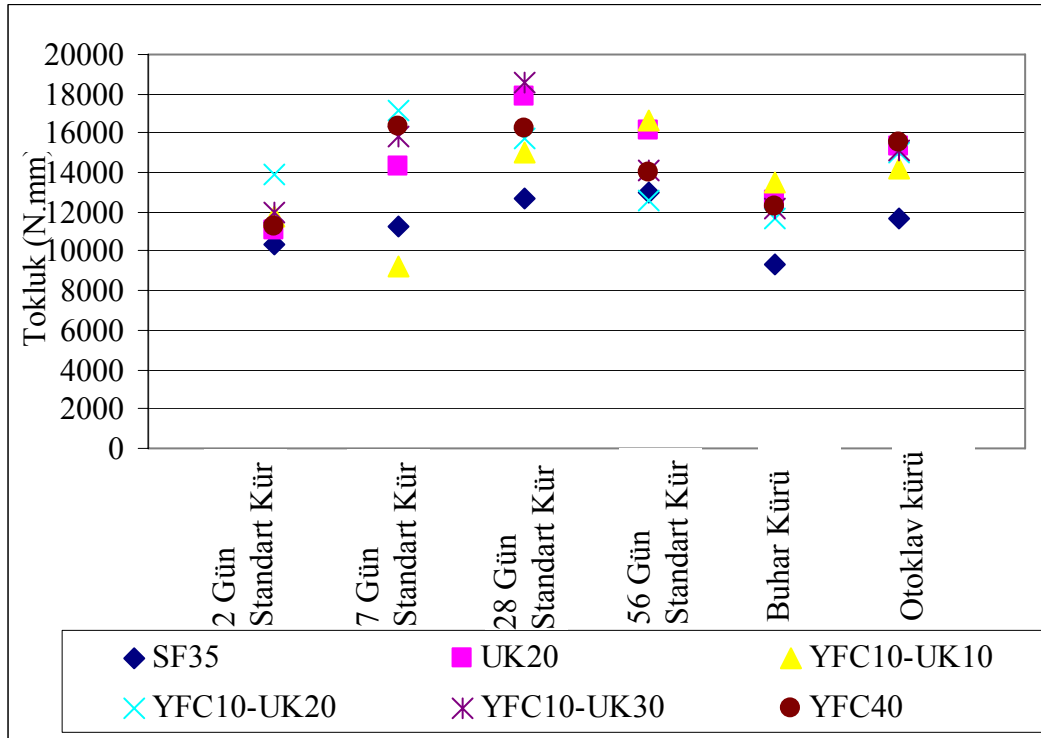


Şekil 4.27 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların farklı kür koşulları altında eğilme değerlerinin karşılaştırılması

SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının farklı kürler sonrası tokluk değerleri ilişkileri Şekil 4.28, Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.28 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli farklı kür koşulları altında tokluk değerleri grafiği



Şekil 4.29 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların farklı kür koşulları tokluk değerleri

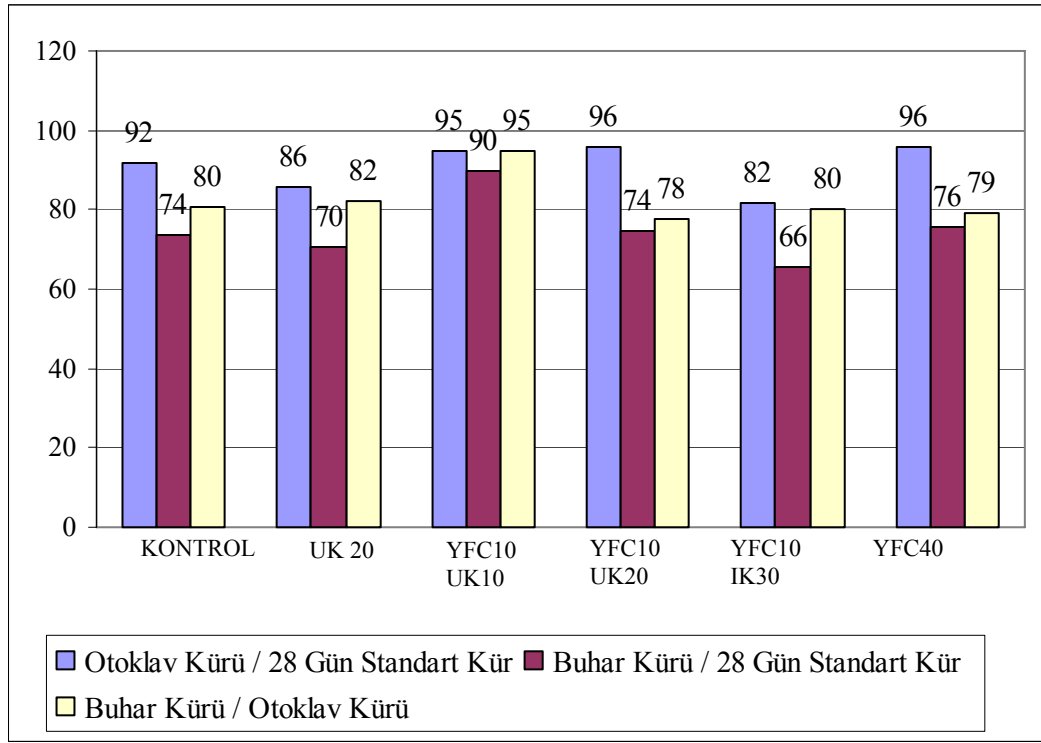
SF35 (Kontrol), UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40 karışımlarının farklı kürler sonrası tokluk değerleri ilişkileri ise Tablo 4.50’de ve Şekil 4.30’da verilmiştir.

Tablo 4.50’de ve Şekil 4.30’da otoklav kürünün ve buhar kürünün 28 günlük standart kürü; buhar kürünün de otoklav kürünü tokluk değerleri bakımından ne oranda yakaladığı görülmektedir. Tüm karışımlarda otoklav kürü tokluk değerleri, 28 günlük standart kür tokluk değerlerine %85 ile %95 oranında yaklaşmıştır. Buhar kürü tokluk değerleri ise otoklav kürü tokluk değerlerine göre daha geride kalmıştır. Bu da otoklav kürü ile tokluk değerlerinin de kısmen de olsa 28 günlük standart kürü 1 günde yakalanabileceğini göstermektedir.

Çıkan sonuçlar doğrultusunda eğilme dayanımı ve tokluk değerleri bakımından, otoklav kürü ilk yatırımı ve işletme maliyeti bakımından yüksek olmasına rağmen 28 günlük standart kür dayanımını 1 günde sağlaması bakımından iyi bir alternatiftir.

Tablo 4.50 Farklı kür koşulları altında tokluk değerlerinin karşılaştırılması

	Otoklav Kürü / 28 Gün Standart Kür tokluk değeri (%)	Buhar kürü / 28 gün standart kür tokluk değeri (%)	Buhar Kürü / Otoklav kürü tokluk değeri (%)
SF35	91,74	73,82	80,47
UK20	85,74	70,39	82,10
YFC10-UK10	94,62	89,61	94,71
YFC10-UK20	95,62	74,37	77,78
YFC10-UK30	81,60	65,60	80,39
YFC40	95,73	75,71	79,09



Şekil 4.30 Kontrol (SF35) ve mineral katkıli karışımların farklı kür koşulları altında tokluk değerlerinin karşılaştırılması

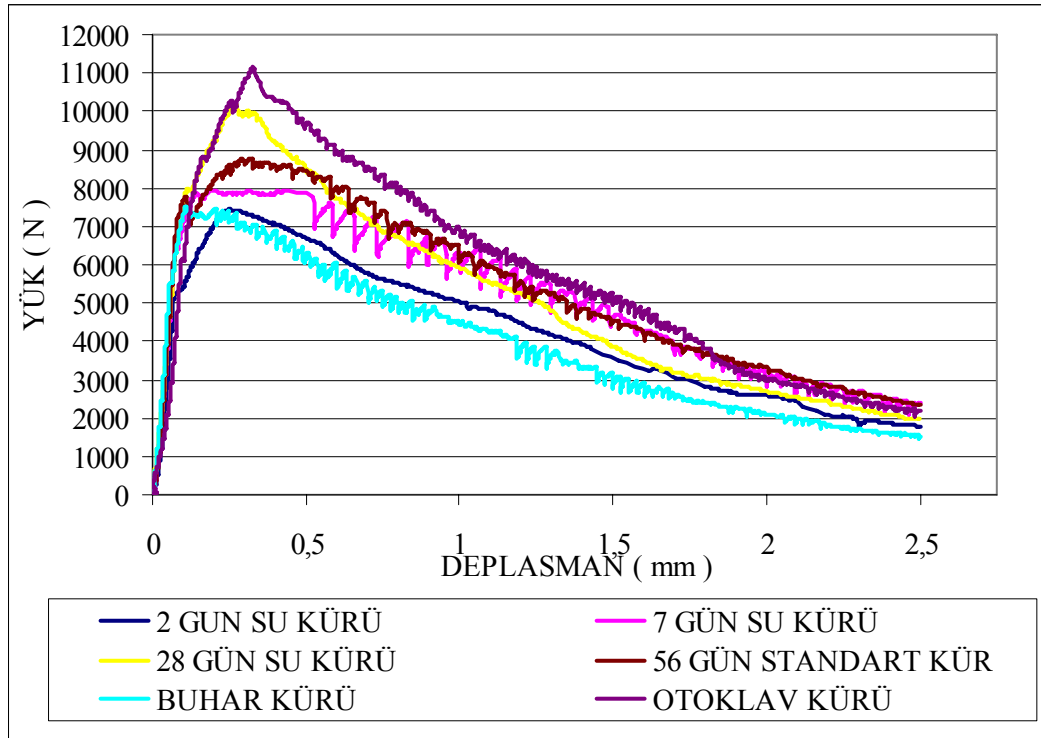
SF35 (Kontrol) karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.51’de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.31’de verilmiştir.

SF 35’in farklı kürler altındaki yük deplasman grafikleri incelendiğinde, özellikle yük deplasman grafiğinin azalan kısmında, artan orta nokta deplasmanına karşılık ani yük değişimleri, bağlayıcısında mineral katkı kullanılan diğer karışımlara kıyasla daha kısa iniş ve çıkışların olduğu görülmektedir. (Şekil 4.31).

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında, buhar kürünün bir miktar dayanım ve tokluk kaybına yol açtığı, otoklav küründe ise 28 günlük performansın 1 günde yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum otoklav kürünün kontrol karışımı için kısa sürede yüksek dayanım ve tokluk değeri sağlama artısına sahip olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.51 SF35 Kontrol karışımının eğilme ve tokluk değerleri

SF35	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max Eğilme (MPa)	Eğilme Ort. (MPa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	6611,7	7545,8	20,1	23,0	9168,4	10375,8
	7437,3		22,7		10552,6	
	8588,6		26,2		11406,4	
7 gün standart kür	7945,6	7760,9	24,2	23,6	12918,6	11252,1
	6752,6		20,6		8692,0	
	8584,5		26,2		12145,7	
28 gün standart kür	8338,4	9394,5	25,4	28,6	11327,3	12675,6
	10159,2		31,0		12800,6	
	9685,9		29,5		13898,8	
56 gün standart kür	9572,4	9377,8	29,2	28,6	10909,9	12946,3
	8766,1		26,7		13394,5	
	9794,9		29,8		14534,6	
Buhar kürü	7347,8	7680,1	22,4	23,4	8820,6	9357,0
	7494,6		22,8		9847,2	
	8197,8		25,0		9403,3	
Otoklav kürü	11145,6	9378,5	34,0	28,6	14512,9	11628,3
	8222,1		25,1		9483,0	
	8767,9		26,7		10888,8	



Şekil 4.31 SF35 kontrol karışımın farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

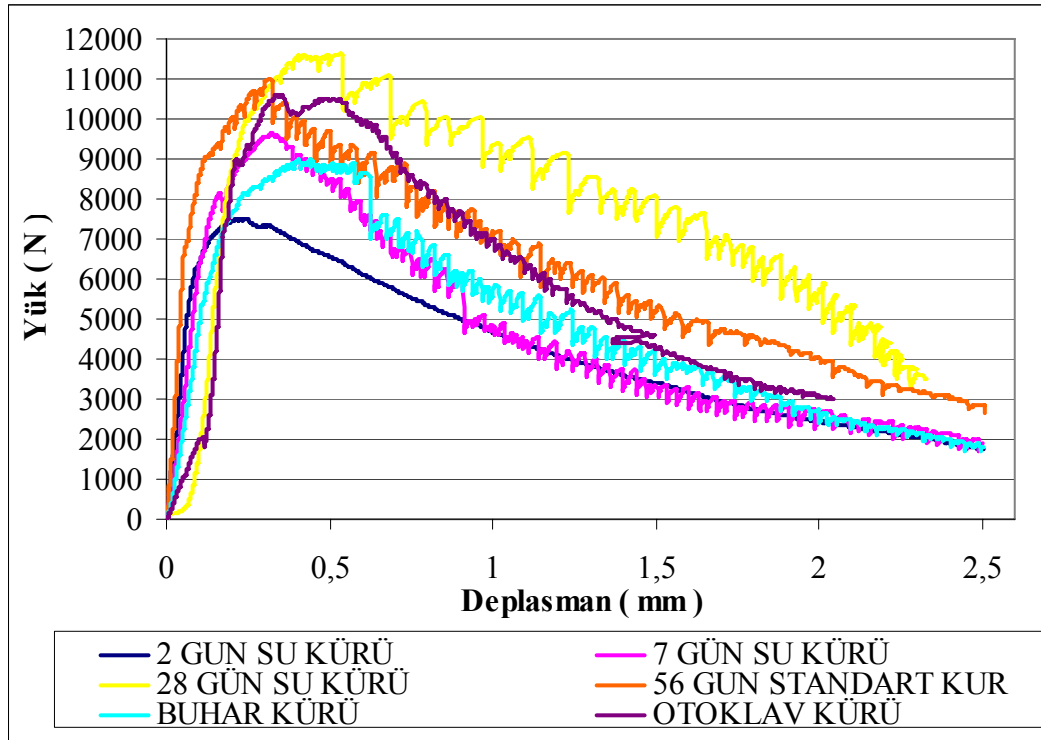
UK20 karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.52’de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.32’da verilmiştir.

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında, UK20 karışımında da buhar kürünün bir miktar dayanım ve tokluk kaybına yol açtığı, otoklav küründe ise 28 günlük performansın 1 günde kısmen yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum otoklav kürünün kısa sürede yüksek dayanım ve tokluk değeri sağlama artısına sahip olduğunu bu karışımında da göstermektedir.

2 günlük standart kür uygulaması görmüş örneklerin maksimum yük sonrası yük deplasman eğrisi, diğer kürlerde kür edilmiş örneklerden farklı olarak, ani yük değişimleri gözlenmeden azaldığı görülmektedir. Bu durumda UK20 karışımında lif ile matris arasında kuvvetli bir aderansın 2 günlük standart kür uygulaması ile oluşmadığı göstermektedir.

Tablo 4.52 UK20 karışımının eğilme ve tokluk değerleri

UK20	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max. Eğilme (MPa)	EğilmeOrt. (MPa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	7493,1	7448,7	22,8	22,7	10486,9	11101,5
	5365,5		16,3		7760,3	
	9487,4		28,9		15057,3	
7 gün standart kür	9877,0	10131,2	30,1	30,9	15312,8	14353,1
	10879,5		33,1		16134,9	
	9637,0		29,4		11611,5	
28 gün standart kür	11613,8	11365,3	35,4	34,6	19737,8	17905,2
	10481,3		31,9		15252,8	
	12000,8		36,6		18725,1	
56 gün standart kür	10372,1	11195,3	31,6	34,1	13482,0	16133,3
	10969,8		33,4		15633,3	
	12244,0		37,3		19284,5	
Buhar kürü	11140,3	10076,4	33,9	30,7	13069,9	12602,9
	9013,0		27,5		12135,8	
	0,0		0,0		0,0	
Otoklav kürü	11235,3	10445,7	34,2	31,8	19006,2	15351,1
	9491,9		28,9		13241,4	
	10609,9		32,3		13805,5	



Şekil 4.32 UK20 karışımının farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

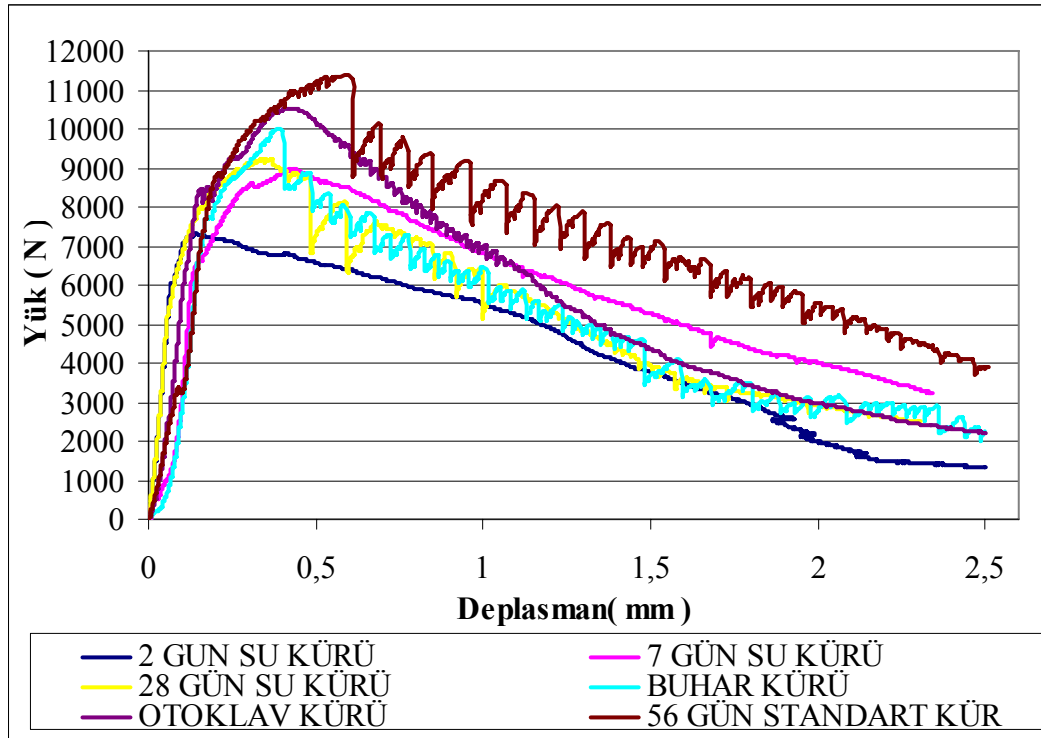
YFC10-UK10 karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.53'te; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.33'de verilmiştir.

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında YFC10-UK10 karışımının diğer karışımlardan farklı olarak buhar kürünün dayanım ve tokluk kaybına yol açmadığı ve otoklav kürü ile birlikte 28 günlük performansın yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum YFC10-UK10 karışımında 28 günlük standart küre otoklav kürü olduğu kadar buhar küründe iyi bir alternatif olduğunu göstermektedir.

2 ve 7 günlük standart kür uygulaması görmüş örneklerin maksimum yük sonrası yük deplasman eğrisi, diğer kürlerde kür edilmiş örneklerden farklı olarak, ani yük değişimleri gözlenmeden azaldığı görülmektedir. Bu durumda YFC10-UK10 karışımında lif ile matris arasında kuvvetli bir aderansın oluşmadığı görülmektedir.

Tablo 4.53 YFC10-UK10 karışımının eğilme ve tokluk değerleri

YFC10-UK10	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max eğilme (Mpa)	Eğilme Ort. (Mpa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	7324,6	7662,2	22,3	23,3	11469,4	11791,8
	6213,7		18,9		9017,0	
	9448,1		28,8		14889,0	
7 gün standart kür	8966,4	9221,7	27,3	28,1	14205,7	14778,8
	9477,0		28,9		15351,9	
	0,0		0,0		0,0	
28 gün standart kür	9225,5	10082,4	28,1	30,7	12831,1	15027,9
	10169,6		31,0		14687,2	
	10852,1		33,1		17565,3	
56 gün standart kür	10309,7	11631,9	31,4	35,4	15133,1	16700,4
	11329,8		34,5		17862,4	
	13256,1		40,4		17105,6	
Buhar kürü	9965,1	10280,2	30,4	31,8	12454,3	13466,4
	10932,1		33,3		14478,5	
	9943,3		30,3		11722,7	
Otoklav kürü	11071,7	10241,1	33,7	31,2	15459,4	14218,7
	10527,2		32,1		14025,7	
	9124,5		27,8		13171,0	



Şekil 4.33 YFC10-UK10 karışımın farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

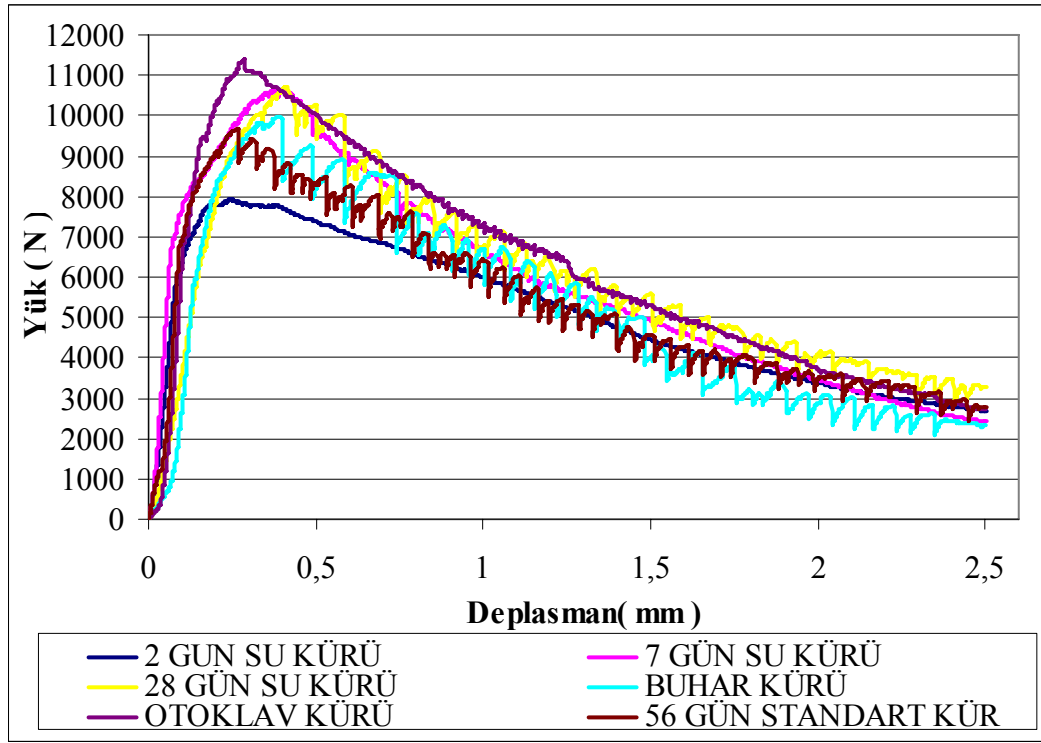
YFC10-UK20 karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.54'te; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.34'da verilmiştir.

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında YFC10-UK20 karışımında da buhar kürünün bir miktar dayanım ve tokluk kaybına yol açtığı, otoklav küründe ise 28 günlük performansın 1 günde kısmen yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum otoklav kürünün kısa sürede yüksek dayanım ve tokluk değeri sağlama artısına sahip olduğunu bu karışımda da göstermektedir.

2 ve 7 günlük standart kür uygulaması görmüş örneklerin maksimum yük sonrası yük deplasman eğrisi diğer kürlerde kür edilmiş örneklerden farklı olarak ani yük değişimleri gözlenmeden azaldığı görülmektedir. Bu durumda YFC10-UK20 karışımında da lif ile matris arasında kuvvetli bir aderansın oluşmadığı görülmektedir.

Tablo 4.54 YFC10-UK20 karışımının eğilme ve tokluk değerleri

YFC10-UK20	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max eğilme (Mpa)	Eğilme Ort. (Mpa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	7922,5	8624,6	24,1	26,3	12758,9	13873,3
	6636,9		20,2		9674,3	
	11314,4		34,5		19186,7	
7 gün standart kür	12053,7	11480,5	36,7	35,0	19163,8	17193,5
	10637,7		32,4		14691,5	
	11750,2		35,8		17725,2	
28 gün standart kür	10820,0	11640,8	33,0	35,5	14908,3	15697,2
	13377,5		40,8		17263,4	
	10725,1		32,7		14919,8	
56 gün standart kür	7123,8	9070,2	21,7	27,6	9612,6	12559,7
	10408,3		31,7		14539,1	
	9678,5		29,5		13527,3	
Buhar kürü	9862,3	10632,3	30,0	30,2	10344,3	11674,3
	9929,1		30,3		13004,3	
	12105,4		36,9		15950,9	
Otoklav kürü	10801,5	11125,2	32,9	33,9	14794,2	15009,1
	11186,6		34,1		14715,9	
	11387,5		34,7		15517,2	



Şekil 4.34 YFC10-UK20 karışımın farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

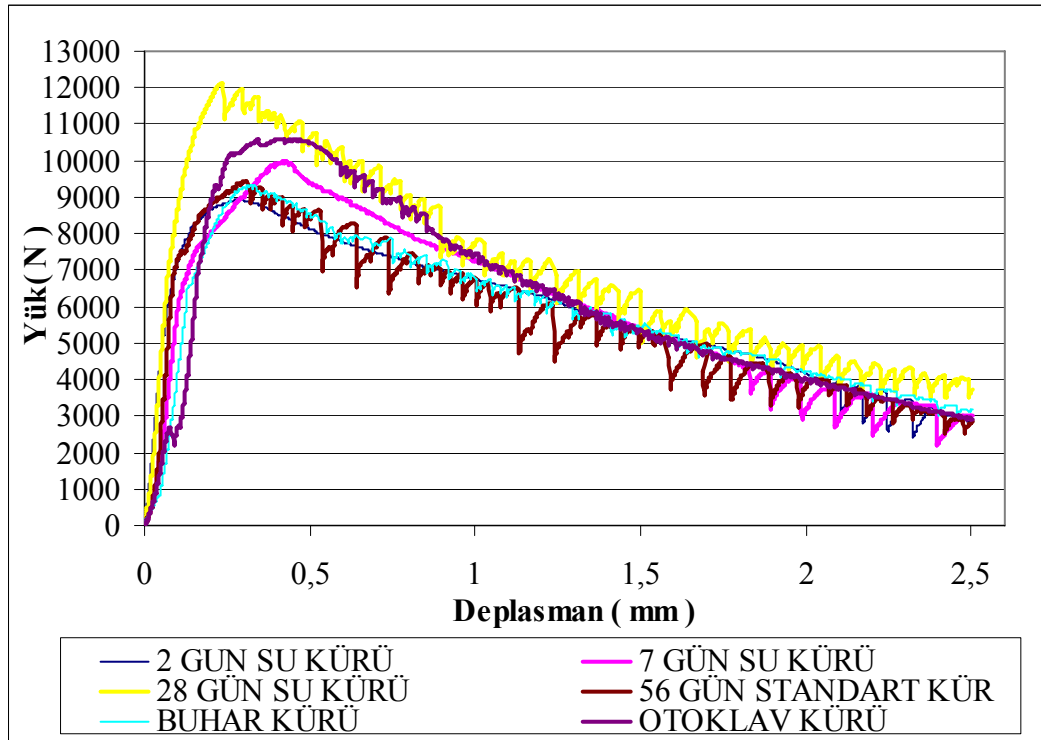
YFC10-UK30 karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.55’de; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.35’te verilmiştir.

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında YFC10-UK20 karışımında da buhar kürünün bir miktar dayanım ve tokluk kaybına yol açtığı, otoklav küründe ise 28 günlük performansın 1 günde kısmen yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum otoklav kürünün kısa sürede yüksek dayanım ve tokluk değeri sağlama artısına sahip olduğunu bu karışımda da göstermektedir.

2 ve 7 günlük standart kür uygulaması görmüş örneklerin maksimum yük sonrası yük deplasman eğrisi diğer kürlerde kür edilmiş örneklerden farklı olarak ani yük değişimleri gözlenmeden azaldığı görülmektedir. Bu durumda YFC10-UK30 karışımında da lif ile matris arasında kuvvetli bir aderansın oluşmadığı görülmektedir.

Tablo 4.55 YFC10-UK30 karışımının eğilme ve tokluk değerleri

YFC10-UK30	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max eğilme (Mpa)	Eğilme Ort. (Mpa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	6593,3	7937,7	20,1	24,2	8610,1	11983,2
	8294,7		25,3		12696,5	
	8925,1		27,2		14642,8	
7 gün standart kür	9796,0	10129,6	29,8	30,9	15380,9	15868,0
	10602,3		32,3		17342,1	
	9990,4		30,4		14880,9	
28 gün standart kür	12699,9	12705,7	38,7	38,7	18894,1	18531,9
	12095,0		36,9		17508,2	
	13322,3		40,6		19193,4	
56 gün standart kür	9845,3	9190,6	30,0	28,0	15902,3	14077,4
	8265,3		25,2		12144,9	
	9461,1		28,8		14185,1	
Buhar kürü	9330,4	9322,5	28,4	26,1	14529,6	12156,7
	7788,8		23,7		9783,7	
	10848,4		33,1		10848,0	
Otoklav kürü	8973,7	10750,4	27,3	32,8	13394,4	15122,7
	10610,0		32,3		15435,2	
	12667,4		38,6		16538,5	



Şekil 4.35 YFC10-UK30 karışımının farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

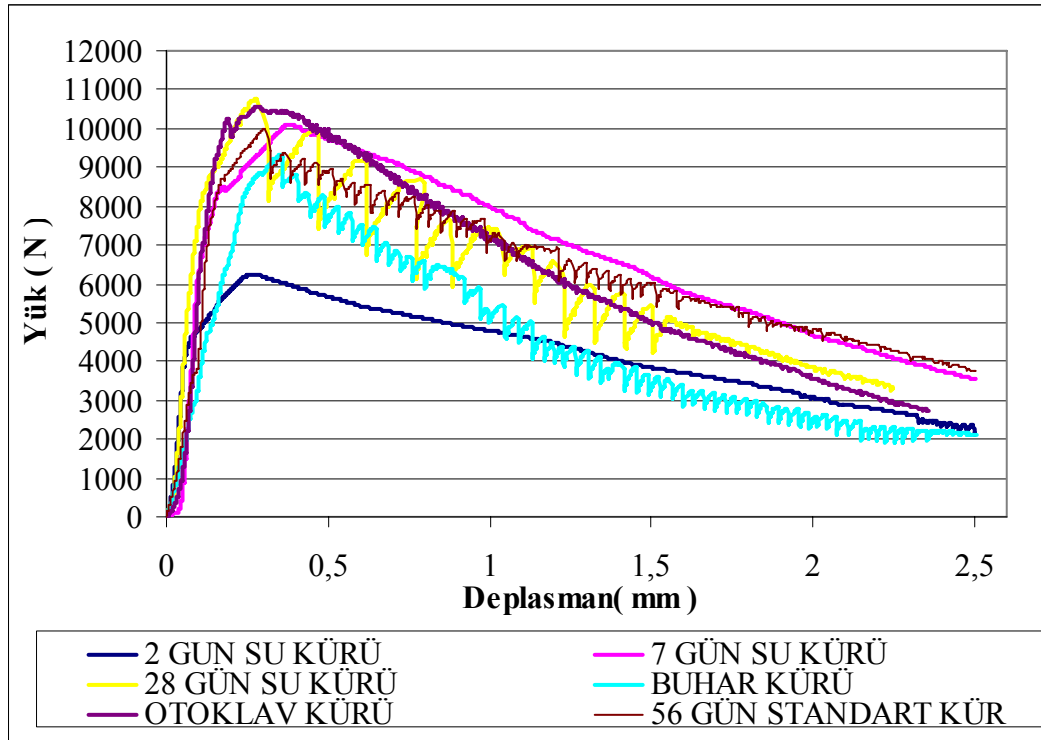
YFC40 karışımının farklı kür koşulları sonrası eğilme dayanımı ve tokluk değerleri Tablo 4.56’da; yük deplasman ilişkileri ise Şekil 4.36’te verilmiştir.

28 günlük standart kür ile kıyaslandığında, YFC40 karışımında da buhar kürünün bir miktar dayanım ve tokluk kaybına yol açtığı, otoklav küründe ise 28 günlük performansın 1 günde yakalandığı açık olarak görülmektedir. Bu durum otoklav kürünün kısa sürede yüksek dayanım ve tokluk değeri sağlama artısına sahip olduğunu bu karışımda da göstermektedir.

2 ve 7 günlük standart kür uygulaması görmüş örneklerin maksimum yük sonrası yük deplasman eğrisi diğer kürlerde kür edilmiş örneklerden farklı olarak ani yük değişimleri gözlenmeden azaldığı görülmektedir. Bu durumda YFC40 karışımında da lif ile matris arasında kuvvetli bir aderansın oluşmadığı görülmektedir.

Tablo 4.56 YFC40 karışımının eğilme ve tokluk değerleri

YFC40	Pmax (N)	Pmax ort. (N)	Max eğilme (Mpa)	Eğilme Ort. (Mpa)	Tokluk (N.mm)	Tokluk Ort. (N.mm)
2 gün standart kür	6513,4	7319,8	19,8	22,3	8536,0	11264,7
	9190,7		28,0		14784,3	
	6255,4		19,1		10473,8	
7 gün standart kür	10459,6	10331,8	31,9	31,5	15857,4	16305,0
	10107,0		30,8		16582,5	
	10428,7		31,8		16475,1	
28 gün standart kür	10754,4	11316,0	32,8	34,5	15304,4	16212,0
	12232,4		37,3		17147,1	
	10961,2		33,4		16184,4	
56 gün standart kür	8653,8	9453,0	26,4	28,8	12933,5	14024,1
	9969,1		30,4		15803,1	
	9736,2		29,7		13335,6	
Buhar kürü	10040,5	10259,4	30,6	29,5	13266,1	12273,9
	9295,0		28,3		11281,6	
	11442,7		34,9		10848,0	
Otoklav kürü	10546,0	11101,9	32,1	33,8	15037,7	15519,7
	13427,7		40,9		18189,2	
	9332,2		28,4		13332,2	



Şekil 4.36 YFC40 karışımının farklı kür koşulları altında yük deplasman eğrileri

4.8.2 Eğilme Sonrası Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde kontrol karışımı ve mineral katkılarla geliştirilen karışımların (YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, UK20, YFC40) eğilme sonrası her örnekteki iki parça için basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. Tablo 4.57, Tablo 4.58, Tablo 4.59’de dayanım değerleri ve Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de de farklı kür koşulları altında eğilme sonrası basınç dayanımındaki değişim ilişkilendirilmiştir.

Tablo 4.60 ve Şekil 4.39’dan ise, eğilme sonrası basınç dayanımlarında farklı kürler arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Otoklav kürünün ve buhar kürünün 28 günlük standart kür basınç dayanımlarını ne oranda arttırdığını görülmektedir. Ayrıca Tablo 4.60’da otoklav kürünün basınç dayanımları ile buhar kürü basınç dayanımlarının da karşılaştırılması yapılmıştır.

Tablo 4.58, Tablo 4.59’ten görüldüğü üzere, seçilen tüm karışımlar 2 günlük basınç dayanımı bile 100 MPa’ın oldukça üzerindedir. 28 gün standart kürde ise 200

MPa basınç dayanımı eşiğini aşmışlardır. 2 ve 7 günlük standart kürlerde karışımlar arasındaki görülen dayanım farklılıkları 28 ve 56 günlük standart kürde görülmemiş (Şekil 4.38), karışımlar birbirlerine yakın basınç dayanımı değerleri vermişlerdir.

Tablo 4.57 2 günlük ve 7 günlük standart kürde eğilme sonrası basınç dayanımı

Karışım Adı	2 Günlük Standart Kür		7 Günlük Standart Kür	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım ortalaması (MPa)
KONTROL SF35	174	163	176	172
	166			
	156			
	163			
	163			
	157			
YFC10-UK 10	153	149	194	191
	140			
	142			
	154			
	154			
	152			
UK 20	145	143	189	188
	140			
	144			
	142			
	144			
	143			
YFC10 - UK20	140	141	189	186
	144			
	148			
	145			
	133			
	135			
YFC10 - UK30	130	131	174	172
	127			
	132			
	134			
	136			
	129			
YFC40	116	116	167	165
	118			
	114			
	115			
	115			
	119			

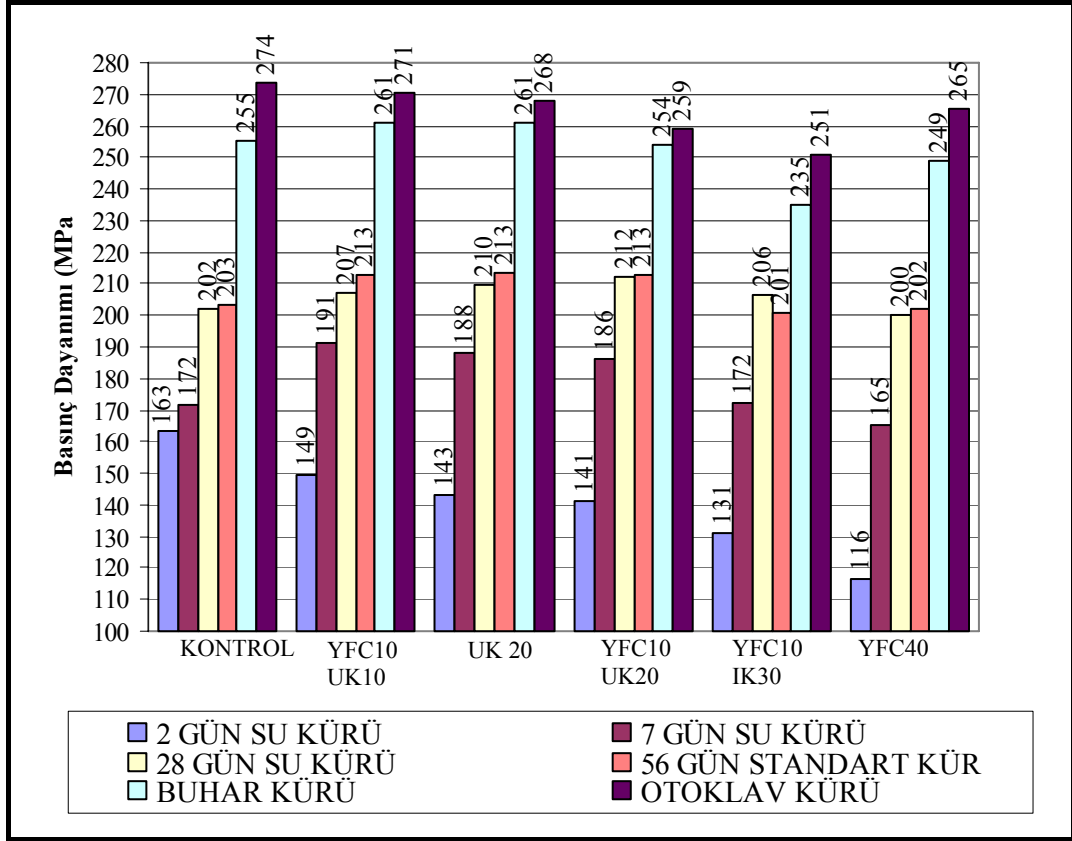
Tablo 4.58 28 günlük ve 56 günlük standart kürde eğilme sonrası basınç dayanımı

Karışım adı	28 günlük standart kür		56 günlük standart kür	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)
KONTROL SF35	205	202	209	203
	198		205	
	203		193	
	202		202	
	208		207	
	197		206	
YFC10-UK 10	207	207	207	213
	212		214	
	206		211	
	204		217	
	211		213	
	201		214	
UK 20	201	210	209	213
	220		200	
	217		213	
	216		233	
	213		215	
	192		211	
YFC10 – UK20	198	212	219	213
	217		219	
	219		194	
	214		210	
	210		216	
	217		219	
YFC10 – UK30	201	206	193	201
	198		193	
	218		214	
	210		197	
	209		213	
	204		195	
YFC40	203	200	204	202
	201		200	
	203		203	
	193		200	
	201		206	
	201		201	

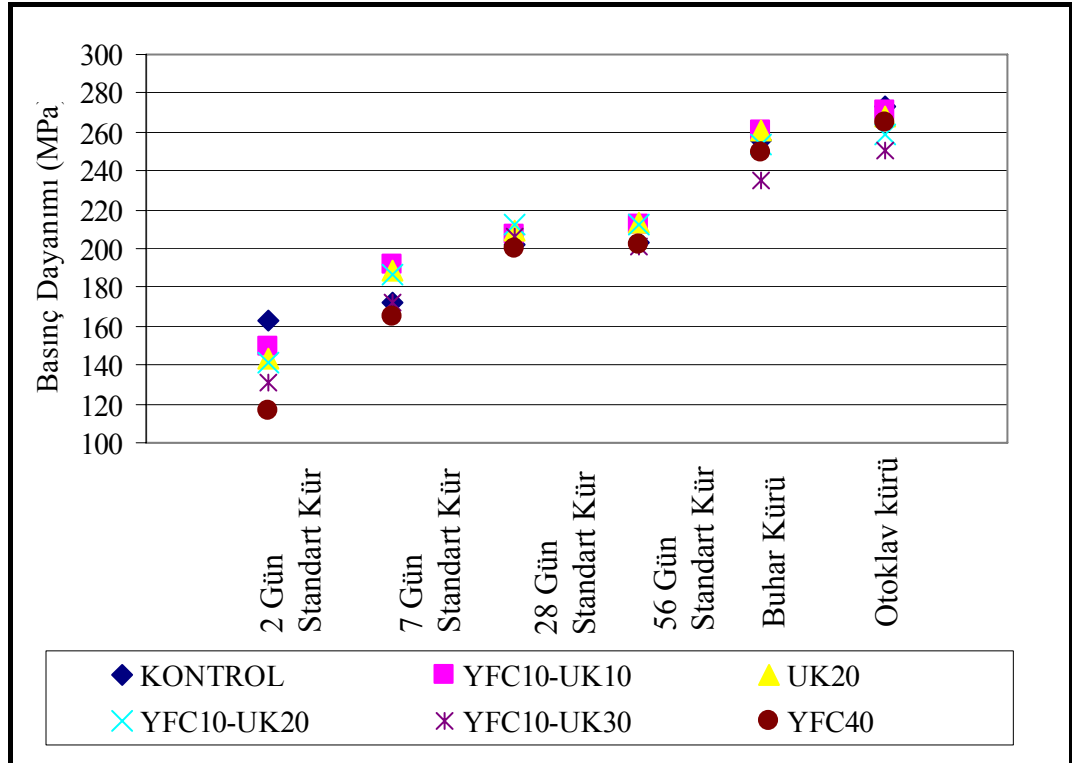
Otoklav küründe ise tüm karışımlar 250 MPa basınç dayanımı değerini aşmıştır. Ayrıca 28 ve 56 günlük standart kürde karışımlar arasındaki dayanım farklılığı düşük düzeydeyken otoklav ve buhar küründe bu farklılık daha belirgindir (Şekil 4.38).

Tablo 4.59 Buhar veya otoklav kürlerinde eğilme sonrası basınç dayanımı

Karışım adı	Buhar kürü		Otoklav kürü	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Ortalaması (MPa)
KONTROL SF35	271	255	-	273
	247		-	
	260		-	
	248		274	
	249		271	
	256		275	
YFC10-UK 10	270	261	265	270
	252		264	
	261		261	
	260		274	
	266		283	
	256		276	
UK 20	268	261	274	268
	276		262	
	265		263	
	237		279	
	257		263	
	261		264	
YFC10 – UK20	258	254	265	259
	240		261	
	245		262	
	252		251	
	263		256	
	263		257	
YFC10 – UK30	228	234	258	250
	236		252	
	242		246	
	238		251	
	231		251	
	231		243	
YFC40	247	249	261	265
	261		256	
	237		268	
	254		262	
	247		267	
	247		274	



Şekil 4.37 Karışımların farklı kür koşulları altında eğilme sonrası basınç dayanımı grafiği



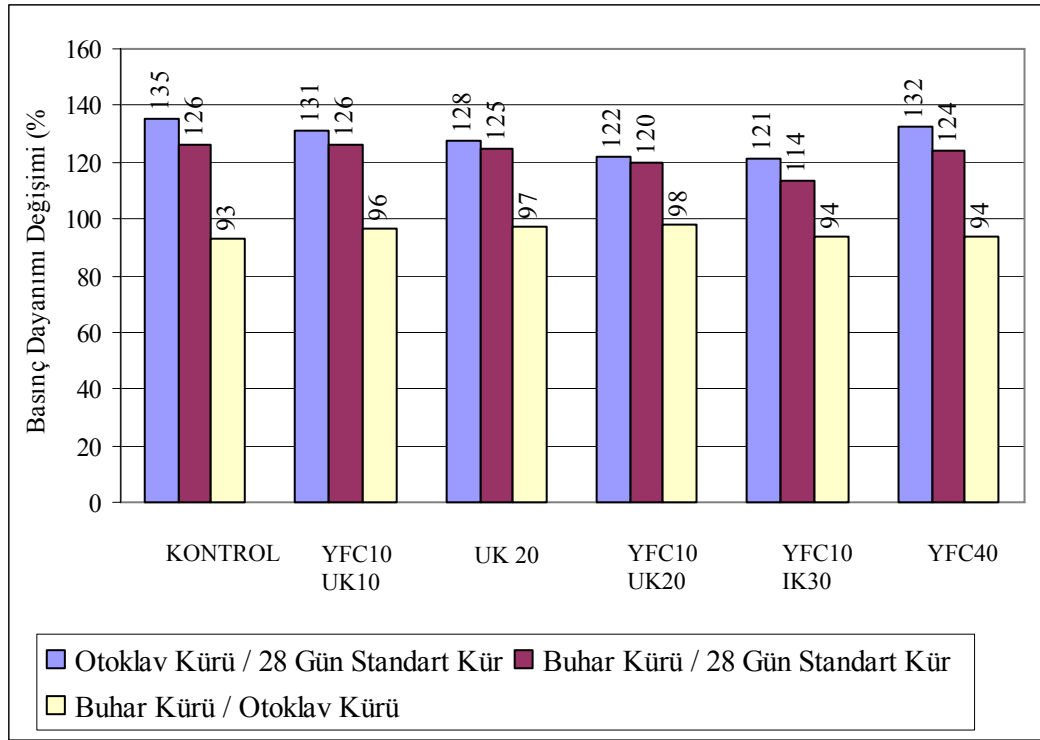
Şekil 4.38 Karışımların farklı kür koşulları altında eğilme sonrası basınç dayanımı grafiği

Tablo 4.60 ve Şekil 4.39'dan görüleceği üzere, eğilme sonrası basınç dayanımı değerlerinde otoklav kürü basınç dayanımı, 28 günlük standart kür uygulaması basınç dayanımını %21 ile %35 oranında arttırırken buhar kürü uygulaması da %13 ile %25 oranında basınç dayanımı değerlerini arttırmıştır.

Eğilme dayanımı ve tokluk değerlerini aksine basınç dayanımı değerlerinde 3 gün uygulanan buhar küründe önemli gelişmeler sağlanmıştır. Buhar küründe 28 günlük standart kür dayanımları aşılmış ve otoklav kürüne yakın dayanım değerleri elde edilmiştir. Tablo 4.60 ve Şekil 4.39'dan de görüleceği üzere buhar kürü görmüş örneklerin basınç dayanımı değerleri otoklav kürü görmüş örneklerin basınç dayanımı değerlerinin %90 ve üzerinde yakalamıştır.

Tablo 4.60 Farklı kür koşulları altındaki eğilme sonrası basınç değerlerinin karşılaştırılması

	Otoklav Kürü / 28 Gün Standart Kür Basınç Dayanımları (%)	Buhar Kürü / 28 Gün Standart Kür Basınç Dayanımları (%)	Buhar Kürü / Otoklav Kürü Basınç Dayanımları (%)
SF35	135,4	126,4	93,3
YFC10-UK10	130,9	126,2	96,4
UK20	127,9	124,5	97,3
YFC10-UK20	122,0	119,6	98,0
YFC10-UK30	121,3	113,7	93,6
YFC40	132,3	124,2	93,9



Şekil 4.39 Farklı kür koşulları altında eğilme sonrası basınç dayanımı değerlerinin karşılaştırılması

4.9 Mineral Katkılarla Geliştirilen Reaktif Pudra Betonlarının Elastisite Modüllerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın bu bölümünde SF35 kontrol, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40, UK20 karışımlarının otoklav kürü altında elastisite modülleri incelenmiştir. Karışım dizaynlarında herhangi bir değişiklik olmayıp daha önce Tablo 4.41, Tablo 4.42’de verilmiş olan dizaynlar kullanılmıştır. YFC40 ve YFC10-UK30 karışımında Tablo 4.45 kullanılmıştır.

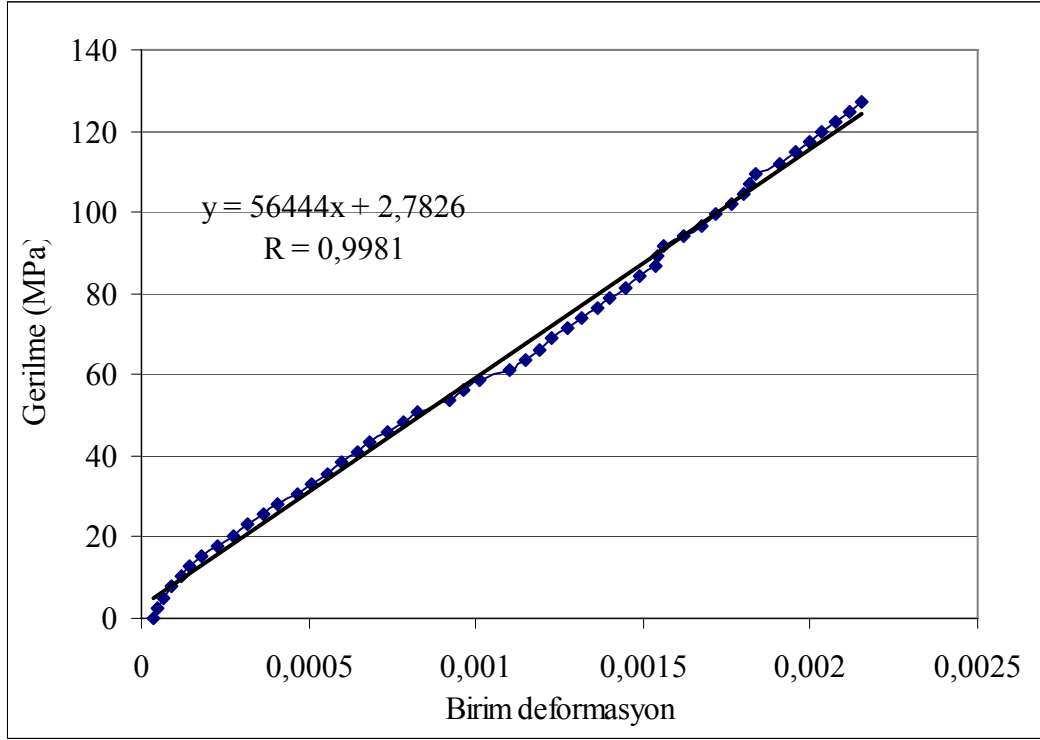
Elastisite modülü belirlenmesinde ELE marka 300 ton kapasiteli oynar başlıklı hidrolik pres kullanılmıştır. Yükleme sırasında yükleme hızının ilgili Amerikan standartlarında (ASTM C39, 1993) 1,5 ile 3,5 kg/cm²/sn (0.15-0.35 MPa/sn) arasında olması gerektiği önerilmektedir. Deneyde örnek boyutu dikkate alınarak 10/20 cm silindir örnekler için 240 kg/sn yükleme hızı (0,306 MPa /sn’lik) kullanılmıştır.

Betonu oluşturan agrega ve çimento hamuru elastik davranış göstermesine rağmen kompozit bir malzeme olan beton, yüksek gerilme seviyelerinde, elastik bir malzeme değildir. Basınç dayanımının %25-%40'ından daha yüksek gerilmelerde elastik özelliğini yitirmektedir. Sünme etkisinin yok edilmesi ve deformasyon çerçevesinin numuneye tam olarak oturmasını sağlamak için 2 ön yükleme yapılmıştır. Örneklerin basınç dayanımlarının 240 MPa civarında olduğu düşünülerek %30 oranında (70 MPa) iki ön yükleme yapılmış, sonrasında da %50 oranında (120 MPa) ana yükleme yapılmıştır. Ana yüklemede deformasyonlar, deformasyon çerçevesine bağlı 1/1000 hassasiyetli mekanik komparatör kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 4.40).

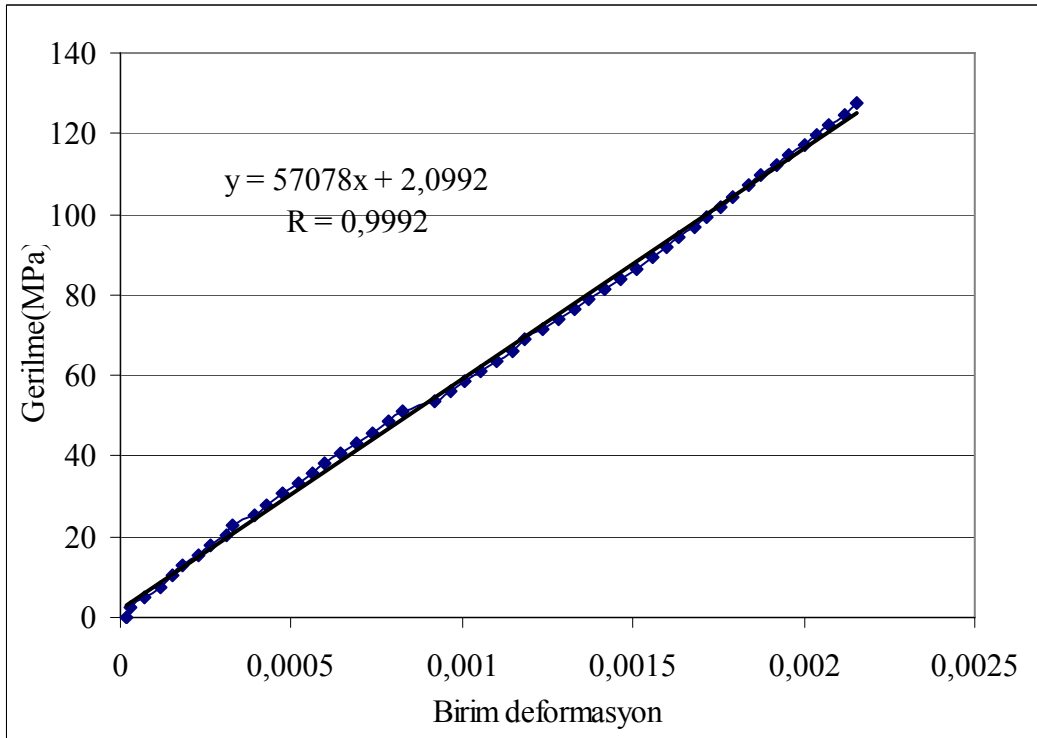
SF35 kontrol, UK20, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40, karışımlarının gerilme birim deformasyon ilişkisi sırasıyla Şekil 4.41, Şekil 4.42, Şekil 4.43, Şekil 4.44, Şekil 4.45, Şekil 4.46'de verilmiştir. Tablo 4.61 ve Şekil 4.47'te ise elastisite deneyi sonucu karışımların elastisite modülleri verilmiştir.



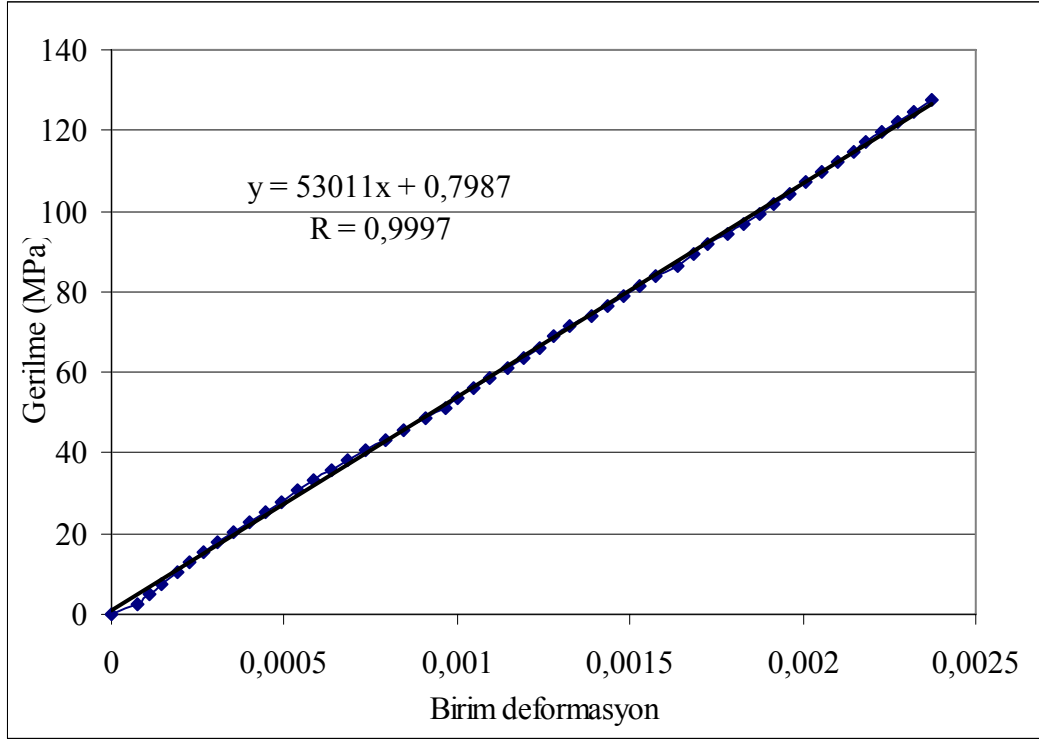
Şekil 4.40 Elastisite modülleri belirlenecek örnekler ve deformasyon çerçevesi



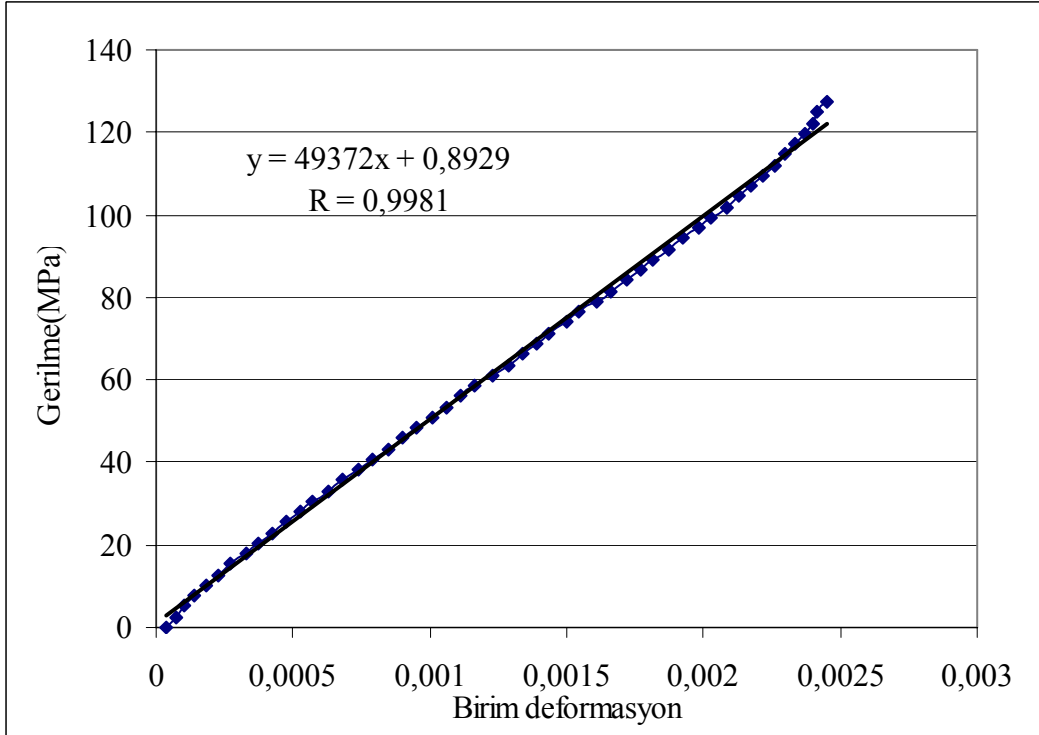
Şekil 4.41 SF35 Kontrol karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi



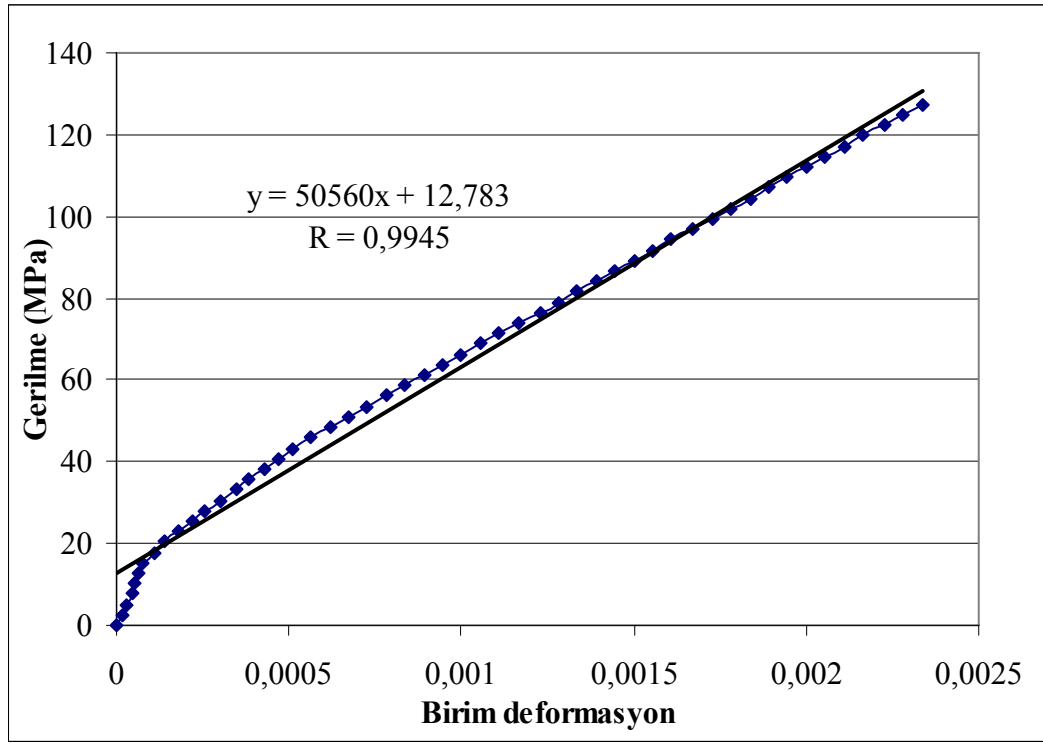
Şekil 4.42 UK20 karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi



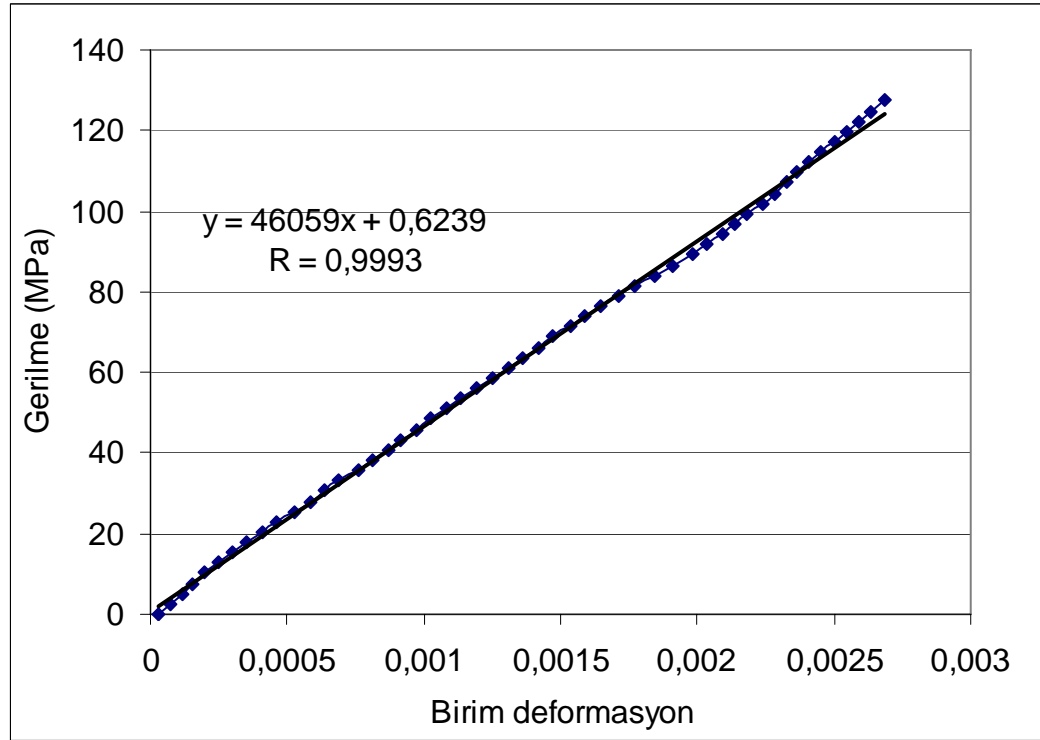
Şekil 4.43 YFC10-UK10 karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.44 YFC10-UK20 karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi



Şekil 4.45 YFC10-UK30 karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi

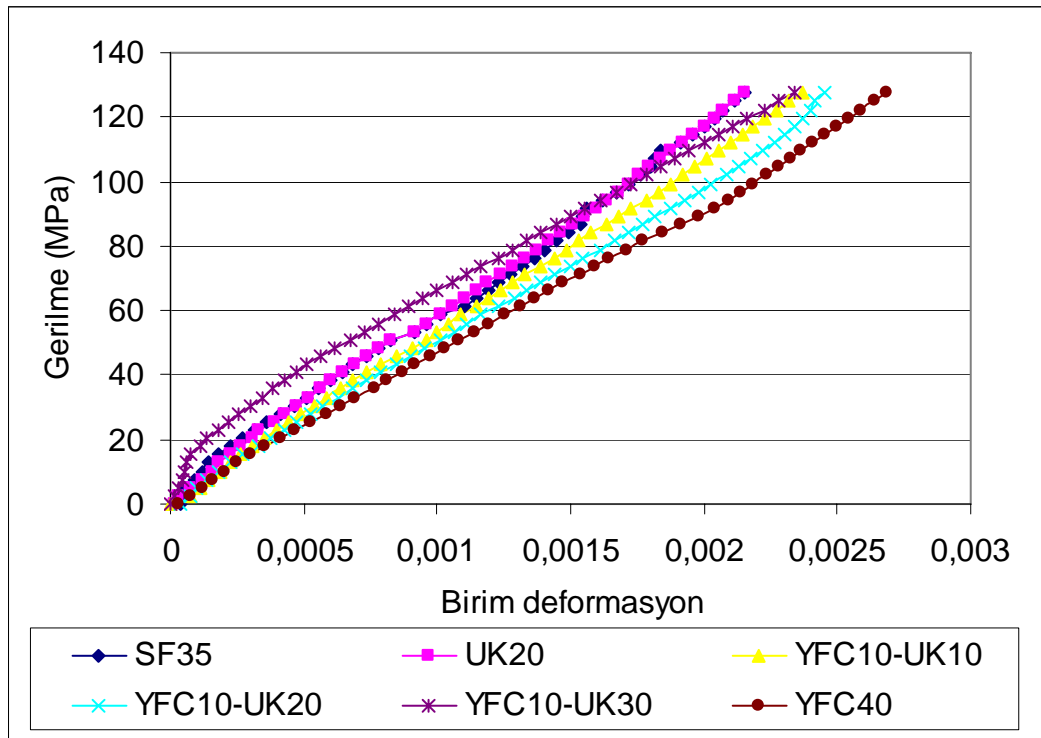


Şekil 4.46 YFC40 karışımının gerilme birim deformasyon ilişkisi

Şekil 4.47 ve Tablo 4.61 incelendiğinde mineral katkıları ile geliştirilen reaktif pudra betonlarının elastisite modülleri RPB konusunda daha önce yapılmış çalışmalarda elastisite modülü değerlerine benzer sonuçlar vermiştir.

Şekil 4.47 incelendiğinde aynı gerilme altında, kontrol karışımının (SF35) ve bağlayıcısında mineral katkı ikame edilmiş karışımların deformasyonları incelendiğinde UK20 karışımı kontrol karışımına benzer davranış sergilerken diğer karışımlarda, ikame yüzdesi arttıkça örneklerin birim deformasyon değerleri de artmaktadır.

Birim deformasyondaki artış elastisite modüllerinin de düşmesine neden olmaktadır. Bu bulgu kontrol (SF35) karışımının basınç dayanımı deneyinde patlayarak parçalanması, mineral katkılı karışımlarda ise patlama davranışının olmaması ile örtüşmektedir.



Şekil 4.47 Tüm karışımları gerilme birim deformasyon ilişkileri

Tablo 4.61 Karışımların elastisite modülleri

Karışım Adı	Elastisite Modülü (MPa)
SF35 KONTROL	56000
UK20	57000
YFC10-UK10	53000
YFC10-UK20	49000
YFC10-UK30	50000
YFC40	46000

4.10 Mineral Katkılarla Mekanik Özellikleri Geliştirilen Reaktif Pudra Betonlarına Priz Aşamasında Sıkıştırma Uygulanması

Bu çalışmanın son aşamasında eğilme, basınç dayanımları ve elastisite modülleri incelenen karışımlara (SF35 kontrol, YFC10-UK10, YFC10-UK20, YFC10-UK30, YFC40, UK20) priz aşamasında özel kalıpta 25 tonluk (32 MPa) sıkıştırma basıncı uygulayarak otoklav kürü altındaki basınç dayanımları incelenmiştir.

Kalıba basınçla yerleştirilen RPB’da hava boşlukları ve fazla su atılmaktadır. Böylelikle daha kararlı bir içyapı oluşturulmaktadır. Ancak presin etkisiyle harcın kalıptan dışarı sızması için, karışımların daha katı kıvamda oluşturulması gereklidir. Bu aşamada sistemin suyunu azaltmaktan ziyade, akışkanlığı sağlayan kimyasal katkıda miktarca azaltmaya giderek, S/B oranı çok değiştirilmeden karışım dizaynlarında değişiklik yapılmıştır. Daha az katkı ile daha kuru karışımlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Sıkıştırma sırasında harcanacak ek enerjiye karşılık karışım içerisindeki akışkanlaştırıcı miktarını azaltarak katkı tasarrufuna gidilmiştir. Hazırlanan karışımlar Tablo 4.62 ve Tablo 4.63’te, katkı azaltma miktarı da Tablo 4.64’te verilmiştir. Karışımların aynı yayılma tablası değeri vermesi sağlanmış ve karışım

için kullanılabilir minimum akışkanlaştırıcı katkı oranına kadar katkıda azaltmaya gidilmiştir.

Hazırlanan karışımlar özel kalıba (Şekil 4.48) elle yerleştirdikten sonra sıkıştırma aletiyle beton örneklere 25 tonluk basınç uygulanmıştır. 8 saat boyunca bu basınç altında tutulan örneklerden elde edilen basınç dayanımları ve basınç dayanımlarındaki artış Tablo 4.65 ve Şekil 4.49'de verilmiştir.

Priz sırasında uygulanacak sıkıştırma ile basınç dayanımları tüm karışımda 300 MPa değerini geçmiştir. Tablo 4.64, Tablo 4.65 ve Şekil 4.49'dan görüldüğü üzere mineral katkılı tüm karışımlar kontrol karışımının basınç dayanımı değerini aşmış veya ona yakın değerler vermiştir. Karışımlardaki basınç dayanımı artışı %12 ile %20 arasında değişmektedir. Bu durum uygulanan basınçla fazla suyun kalıp boşluklarından uzaklaştırılmasına, kimyasal büzülmenin dengelenmesiyle oluşturulan daha sıkı içyapı ile açıklanabilir.

Tablo 4.65'ten görüleceği üzere karışımlarda ağırlıkça 1 m³'de %20 ile %60 oranında akışkanlaştırıcı azaltmasına gidilmiştir. Sıkıştırma uygulamak ek bir maliyet oluştururken akışkanlaştırıcı katkıda tasarrufu sağlamaktadır.

Tablo 4.62 Priz aşamasında sıkıştırma uygulanan karışımların beton dizaynları

	KONTROL SF %35		YFC10-UK10		YFC10-UK20	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	830,0	266,0	664,0	212,8	581,0	186,2
Silis dumanı	290,5	132,0	205,0	93,2	157,4	71,5
YFC	0,0	0,0	83,0	29,6	83,0	29,6
UK	0,0	0,0	83,0	37,7	166,0	75,5
Kuvars Tip1	488,5	187,9	520,6	200,2	534,3	205,5
Kuvars Tip 2	243,7	95,6	259,5	101,8	266,2	104,4
Kuvars Tip 3	243,7	95,6	259,5	101,8	266,2	104,4
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	44,0	40,0	24,5	22,3	22,1	20,1
S/B	0,16	0,44	0,16	0,44	0,17	0,45
Katkı%	3,9	10,0	2,4	6,0	2,2	5,5
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
Toplam	2291,5	968,1	2250,1	950,4	2227,1	948,2
lifli toplam	2525,5	998,1	2484,1	980,4	2461,1	978,2
Yayılma Tablası	110,0mm		110,0mm		112,0mm	

Tablo 4.63 Priz aşamasında sıkıştırma uygulanan karışımların beton dizaynları

	YFC10-UK30		UK20		YFC40	
	kg	dm3	kg	dm3	kg	dm3
Çimento	498,0	159,6	664,0	212,8	498,0	159,6
Silis dumanı	141,0	64,1	194,6	88,5	173,5	78,9
YFC	83,0	29,6	0,0	0,0	332,0	118,6
UK	249,0	113,2	166,0	75,5	0,0	0,0
kuvars Tip 1	529,5	203,6	516,2	198,5	541,8	208,4
kuvars Tip 2	263,8	103,5	257,3	100,9	269,9	105,8
kuvars Tip 3	263,8	103,5	257,3	100,9	269,9	105,8
Su	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0	151,0
Katkı	23,0	20,9	26,6	24,2	13,4	12,2
S/B	0,17	0,45	0,16	0,44	0,16	0,44
Katkı%	2,37	5,7	2,6	6,4	1,3	3,4
Lif	234,0	30,0	234,0	30,0	234,0	30,0
toplam	2202,2	949,0	2233,1	952,3	2249,5	940,3
lifli toplam	2436,2	979,0	2467,1	982,3	2483,5	970,3
Yayılma Tablası	112,0mm		110,0mm		109,0mm	

Tablo 4.64 Sıkıştırma uygulanan karışımlardaki katkı azaltma yüzdeleri

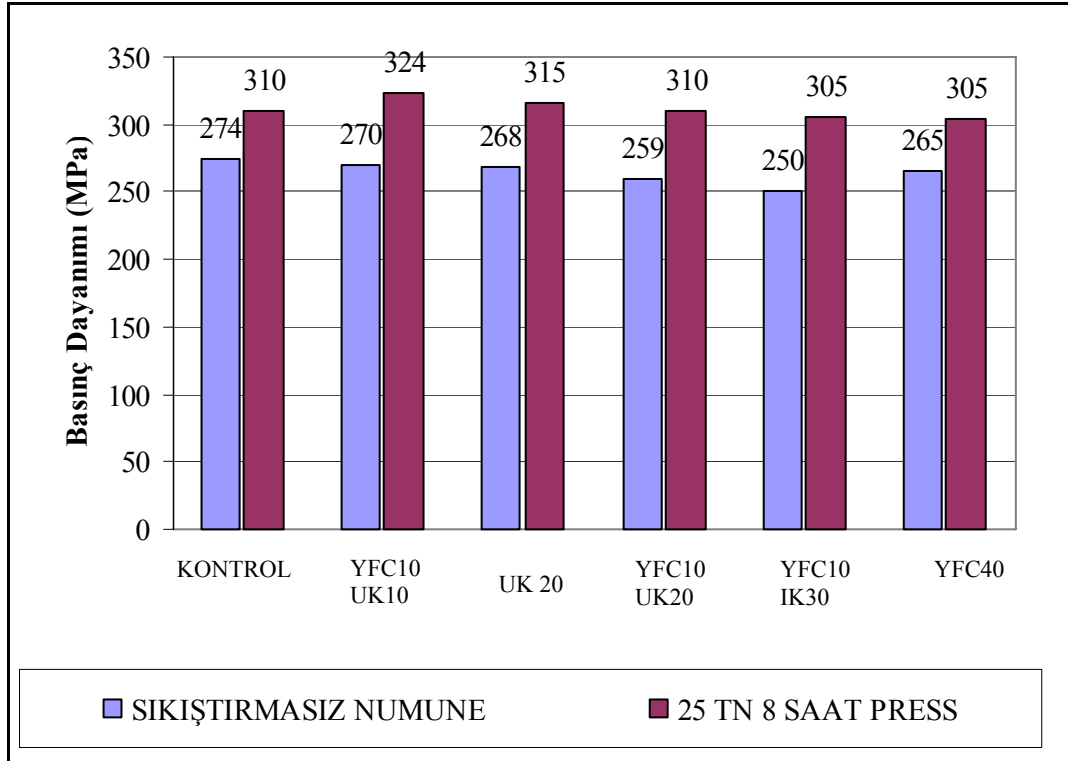
Karışım Adı	Elle kalıba yerleştirme		Sıkıştırma uygulayarak kalıba yerleştirme		Akışkanlaştırıcı katkının Azaltılma oranı (kg /m ³)
	Katkı miktarı (kg/m ³)	Katkı yüzdesi %	Katkı miktarı (kg/m ³)	Katkı yüzdesi %	
SF35 KONTROL	55	4,9	44	3,9	%20
UK20	38	3,7	26,6	2,6	%30
YFC10-UK10	35	3,4	24,5	2,4	%30
YFC10-UK20	34	3,4	22,1	2,2	%35
YFC10-UK30	33	3,4	23	2,3	%30
YFC40	35	3,6	13,4	1,3	%60

Tablo 4.65 Sıkıştırma uygulanan karışımlardaki basınç dayanımları ve dayanım artış yüzdesi

Karışım adı	Elle kalıba yerleştirme	Sıkıştırma uygulayarak kalıba yerleştirme	Basınç dayanımındaki artış yüzdesi (%)
KONTROL SF35	274	310	13,38
YFC10-UK 10	271	324	19,48
UK 20	268	315	17,65
YFC10 - UK20	259	310	19,78
YFC10 - UK30	251	305	21,81
YFC40	265	305	14,89



Şekil 4.48 Sıkıştırma için kullanılan özel çelik kalıp ve sıkıştırma mekanizması



Şekil 4.49 Sıkıştırmanın basınç dayanımı üzerindeki etkisi

Sıkıştırma ile tüm karışımlarda otoklav kürü altında 300 MPa üzerinde basınç dayanımı elde etmek mümkün olmuştur. Uygulama sırasında harcanacak ek enerjiye karşılık karışım içerisindeki akışkanlaştırıcı miktarını azaltarak katkı tasarrufuna gidilmiştir.

Deneysel çalışmaların sonuçları göstermektedir ki malzeme ve deneysel teknolojinin gelişmesi betonun mekanik özelliklerini de yansıtmakta ve betonu da bir gelişen teknoloji ürünü haline getirmektedir.

BÖLÜM BEŞ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

İlk dört bölümde ayrıntılı olarak açıklanan deneysel çalışmaların sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Yüksek oranda puzolanik özellikleri olan silis dumanının belli bir orana kadar sisteme ilavesi basınç dayanımını artırıcı etki oluştururken, en uygun değerinden sonra artırılması basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Basınç dayanımı deneyinde silis dumanının oranı arttıkça örneklerin kırılma davranışlarının değiştiği, kırılma anında patlayarak kırıldığı sünekliklerinin azaldığı gözlenmiştir. Silis dumanının bu davranışı ve yüksek maliyeti göz önüne alınca, en uygun değerinin aşılmaması ve uçucu kül, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların ikamesi ile sistem için alternatif silis kaynakları düşünülmelidir.

Mineral katkıları ile sistemden silis dumanı çekilmesi ile elde edilen karışımların bağlayıcısında, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve/veya uçucu kül olan tüm karışımlar, kontrol karışımı adı verilen bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı ve optimum silis dumanı ile en yüksek basınç dayanımının elde edildiği (SF35) karışımının mekanik özelliklerini sağlamaktadır. Mineral katkıları ile hazırlanan bu karışımların en büyük olumlu yönü dayanım kaybına yol açmadan, sistemin reaktif silis ihtiyacının mineral katkılardan sağlanmasıdır. Böylelikle sistemden pahalı bir malzeme olan silis dumanının ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi azaltılarak kontrol karışımına göre daha ekonomik karışımlar oluşturulmuştur.

Mineral katkılı karışımlardaki bağlayıcı yerine ikame edilen puzolanik özellikleri düşük atık maddelerin (öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve/veya uçucu kül) yüzdesi arttıkça tokluk değerleri yükselmiş, elastisite modülü değeri de azalmıştır. Diğer bir deyişle, aynı gerilme altında mineral katkılı karışımlar, sadece çimento bağlayıcısı ve optimum silis dumanı içeren kontrol karışımına göre daha fazla deforme olmuşlardır. Bu durum basınç dayanımı deneylerinde de, bağlayıcı yerine mineral katkılı ikame

edilmiş karışımların, patlama göstermeden kırılmaları ile örtüşmektedir. Bunun sonucunda, mineral katkıları ile enerji yutabilme kapasitesi yükselen yapı matrisinin, daha sünek davranacağını görülmektedir.

Bağlayıcının, farklı oranlarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu veya uçucu kül ile yer değiştirmesinde aynı ikame yüzdelerinde uçucu kül ikamesi, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikamesine göre daha fazla basınç dayanımı kayıplarına yol açmaktadır.

Farklı kür tiplerinde basınç dayanımları karşılaştırıldığında, mineral katkılı karışımların 2 günlük standart kür sonrası basınç dayanım değerleri 100 MPa'ın üzerinde iken, 28 günlük standart kür sonrası 200 MPa'ın civarındadır.

Tablo 5.1, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te mineral katkıları ile hazırlanmış karışımların maliyetleri hakkında fikir vermesi adına işçilik ve nakliye giderleri eklenmeden yaklaşık üretim maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Mineral katkıları ile hazırlanan RPB karışımlarında, bağlayıcı yerine puzolanik özellikleri düşük, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve/veya uçucu kül kullanarak sistemdeki silis dumanı oranını azaltmak, karışımların maliyetlerini de %15'e varan oranlarda azaltmaktadır.

Kür koşulları bakımından değerlendirmek gerekir ise, otoklav kürü basınç dayanımında, 28 gün standart kür basınç dayanımına oranla büyük dayanım kazançları sağlar iken, eğilme dayanımı ve tokluk konusunda ancak 28 günlük standart kür eğilme dayanımı ve tokluk değerlerini yakalayabilmiştir.

Buhar kürü basınç dayanımında otoklav kürü basınç dayanımını yakalasa da eğilme dayanımında ve tokluk değerinde, otoklav kürü ve 28 günlük standart kür eğilme dayanımı ve tokluk değerinin gerisinde kalmıştır. Bu durum eğilme ve tokluk konusunda otoklav kürünün, 28 günlük standart kür değerlerini bir günde verdiğini, basınç dayanımında ise 28 günlük standart kürün çok çok üstünde dayanım kazançlarını sağladığını göstermektedir.

Bu noktada otoklav kür tipi, özellikle basınç dayanımının önemli olduğu, ön üretilmiş elemanların (kolon, temel, v.b.) üretiminde istenilen yüksek dayanımı elde etme konusunda gerekli iken; eğilme dayanımının önemli olduğu ön üretilmiş elemanlarda (kiriş, aşıklar, v.b.) ise 28 günlük dayanımı 1 günde vermesi bakımından iyi bir alternatiftir.

Tablo 5.1 Karışımlardaki malzemelerin yaklaşık maliyetleri

Malzeme	Maliyet
Çimento	120 YTL / Ton
Mikro silis	520 € / Ton
Öğütülmüş yüksek fırın cürufu	25 YTL / Ton
Uçucu kül	15 YTL / Ton
Akışkanlaştırıcı katkı maddesi	1700 € / Ton
Çelik lifler	2000 € / Ton
Kuvars agregası	100 YTL / Ton

Tablo 5.2 Karışımların maliyet ve dayanım karşılaştırılması

Karışımlar	Maliyet (%)	Basınç dayanımı (MPa)			Elastisite Modülü (GPa)
		Otoklav kürü	Buhar Kürü	28 gün Standart Kür	
Kontrol	100	273	255	202	56
UK20	90	268	261	210	53
YFC10-UK10	90	270	261	207	57
YFC10-UK20	87	259	254	212	49
YFC10-UK30	84	250	234	206	50
YFC40	85	265	249	200	46

Tablo 5.3 Karışımların maliyet ve dayanım karşılaştırılması

Karışımlar	Maliyet (%)	Eğilme dayanımı (MPa) , (Tokluk değeri (N.mm))		
		Otoklav kürü	Buhar Kürü	28 gün Standart Kür
Kontrol	100	28,6 (11628)	23,4 (9357)	28,6 (12675)
UK20	90	31,8 (15351)	30,7 (12602)	34,6 (17905)
YFC10-UK10	90	31,2 (14218)	31,8 (13466)	30,7 (15027)
YFC10-UK20	87	33,9 (15009)	30,2 (11674)	35,5 (15967)
YFC10-UK30	84	32,8 (15122)	26,1 (12156)	38,7 (18531)
YFC40	85	33,8 (15519)	29,5 (12274)	34,5 (16212)

Tüm kür tiplerinde maksimum yük sonrası çelik liflerin matris içindeki dağılımına göre maksimum yükten sonra yük deplasman eğrisinin azalan kısmında iniş ve çıkışlar gözlenmiştir. Bu durum gerilme altındaki liflerin gerilme köprülenmesini üstlenmesi ile açıklanabilir. Gerilme köprülenmesi lif ile matris ara yüzeyindeki aderans kuvvetleri sayesinde gerçekleşmiştir. Gerilme altındaki lifler deplasman arttıkça ve çatlak açıldıkça matristen aşama aşama sıyrılacak veya lif matris aderansı çok kuvvetli ise ya da lifin matris içerisinden sıyrılmasına engel olacak kanca, yüzeyindeki pürüz, çentik v.b. olması durumunda da sıyrılamayarak kopacaktır. Liflerin bu şekilde gerilme köprüsü görevi üstlenmelerinden dolayı matris çatlasa bile enkesit hala yük taşıyabilmektedir. Bu davranışta RPB'yi geleneksel betondan ayıran en önemli özelliktir.

Tablo5.4'ten görüleceği üzere priz aşamasında sıkıştırma uygulamak ile mineral katkılı tüm karışımlarda 300 MPa üzerinde basınç dayanımı elde etmek mümkün olmuştur. Uygulama sırasında harcanacak ek enerjiye karşılık, karışım içerisindeki akışkanlaştırıcı miktarını azaltarak maliyetlerde tasarrufa gidilebilmektedir.

Tablo 5.4 Priz sırasında sıkıştırma uygulamasının maliyetteki ve dayanımlardaki değişimi

Karışımlar	Elle kalıba yerleştirme		Sıkıştırma ile kalıba yerleştirme		Basınç dayanımı artışı (%)
	Maliyet (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Maliyet (%)	Basınç dayanımı (MPa)	
Kontrol	100	273	98	310	14
UK20	90	268	88	315	18
YFC10-UK10	90	270	88	325	20
YFC10-UK20	86	259	84	310	20
YFC10-UK30	84	250	82	305	22
YFC40	85	265	83	305	15

Çalışma sonuçları, bağlayıcı yerine puzolanik özellikleri düşük, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi atık maddeleri değerlendirerek te, bünyesinde sadece çimento ve silis dumanından oluşan klasik RPB karışımına göre daha ekonomik ve daha iyi mekanik davranışlar sergileyen, mineral katkılı RPB'lerin üretilebileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 517, (1970). Recommended Practices For Atmospheric Pressure Steam Curing, *ACI Standard*, American Concrete Institute.
- ACI Committee 517, (1980). Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric pressure steam, *ACI Journal*, Vol 77, 429-449 American Concrete Institute.
- Alaee, F.J. (2002). Retrofitting of Concrete Structures Using High Performance Fibre reinforced Cementitious composite, *PhD Thesis*, Department of civil Engineering Cardiff University.
- Alabaş, V. (2002). Buhar Kürü Yönteminin Beton Basınç Dayanımına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İzmir: Dokuz Eylül üniversitesi.
- Banthia, N., Yan, N. & Bindiganalive, V., (2000), Development and Application of High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, *Fifth Rilem Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)*, Lyon, France.
- Baradan, B. (2000). Yapı malzemesi II (6.baskı), İzmir: D.E.Ü Müh. Fak. Basım Yayın.
- Betterman, L. R., Ouyang, C. & Shah, S. P. (1995), Fiber-Matrix interaction in Microfiber-Reinforced Mortar, *Advanced Cement Based Materials*, 2, 53-61.
- Blais, P.Y. & Couture, M. (1999). Precast, prestressed pedestrian bridge – world's first reactive powder concrete structure, *PCI journal New technology*, september-october 99, 61-70
- Bornemann, R. & Schmidt, M. (2003). Betonda Pudra Malzemelerin İşlevi (Sönmez, R.Çev.), *Hazır Beton*, Yıl:10, Mayıs-Haziran.

- Chan, Y-W. & Chu, S-H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and Concrete Composites*, (34), 1167-1172.
- Collepari, M., Troli, R., Coppola, L. & Collesparti, S. (2004). Mechanical Properties of modified reactive powder concrete, *Cement and Concrete Composites*, (34), 51-62.
- Dauriach, C. (1997). Special Concrete May Give Steel Stiff Competition, *Seattle Daily Journal of Commerce*, May 9
- Duyar, O. (2006). Kendiliğinden yerleşen betonlar, *Hazır Beton*, Yıl:13 Mart-Nisan 25-27.
- Feylessoufi, A. (1996). Water environment and Nanostructural Network In A Reactive Powder Concrete, *Cement and Concrete Composites*, (18), 23-29.
- Hanson, J.A. (1963). Optimum Steam Curing Procedure in precasting Plants, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol 60, 75-100, Chicago: PCI
- Hijorth, L. (1983). Development and Application of High Density Cement Based Materials, *Phill. Trans. Roy. Soc.*, A310, 167-173, London
- Khoury, A. (1992). Effect of Very Fine Aggregate on Concrete Strength. *Materials and Structures*, 27, 185-194.
- Long, G., Wang X. & Xie Y. (2002). Very High-Performance Concrete with Ultrafine Powders. *Cement and Concrete Research*, Volume 32, 601-605.
- Malthota, V.M., eds (1992). Advances in concrete technology, Ottawa: Canmet.

- Matte, V. & 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, Volume 21*, 1-9
- Mehta, P.K. & Monterio, P.J.M (1997). *Concrete mikrostructure, properties and materials*. Indian Concrete Institute, Indian edition.
- Mindess, S. & Young J.F, Darwin D. (1991). *Concrete*, NJ: Prentice Hall.
- Mobasher, B. & Yu Li, C., (1996). Mechanical Properties of Hybrid Cement-Based Composite, *ACI Materials Journal, Vol. 93, No. 3*, 284-292.
- Naaman, A. E. & Reinhardt, H. W., (1995), Characterization of high performance fiber reinforced cement composites-HPFRCC, Pre-Proceedings, *2nd Intemational Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC-95)*.(2) 1-23. Michigan.
- Naaman, A. E. & Homrich, J. R. (1989). Tensile Stress-Strain Properties of SIFCON. *ACI Materials Journal. Vol. 86, No. 3. May-June, 1989.* (244-251).
- Neville, A.M., (1995). *Properties of Concrete*. New York: Longman.
- Okamura, H. (1997). Self Compacting High-Performance Concrete. *Concrete International, 7*, 50-54.
- Öztekın, E. (1977). Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında kullanılan Isıl İşlemler-Eğilme Dayanımına Etkileri, *Doç. Tezi*, K.T.Ü. İnşaat Mimarlık Fak. Trabzon.
- Öztekın, E. (1980). Beton Sertleşmesinin Hızlandırılmasında Kullanılan ısııl işlemler, *Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi*, Ankara.

- Postacıoğlu B. (1986). *Beton Cilt 1 Bağlayıcı malzemeler* İ.T.Ü İnşaat Fakóltesi, İstanbul.
- Richard, P. & Cheyrez M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research, Volume 25*, 17.
- Ramyar, K. (2004). *Dimensional stability of concrete*, Dimensional stability of concrete yüksek lisans derdi ders notları, E.Ü.
- Shaheen E.A.H. (2004). Carbon fibre reinforced reactive powder concrete (CFRRPC) anchorage system *Ph.D.*, Calgaria Üniversitesi , Alberta.
- Taşdemir, M.A., Oktar O. N., Atahan H.N. (2003). Yüksek dayanımlı betonlarda çimento hamurunun boşluk yapısının beton özelliklerine etkisi, *İtü Dergisi (2)* 23-24
- Taşdemir, M.A., Oktar, O. N., Moral, H.. (1996). Sensivity of concrete properties to the pore Structural of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research Vol 26, no 11* 1619-1627.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, *İtü Dergisi (1)* 125-144.
- Telford T., (1988). Condensed silika fume in concrete, *FIP State of art report*, 37
- Tokyay, M. ve Erdoğan K., (2002). Cürufklar ve cürufllu çimentolar, *TÇMB/AR-GE/Y97-2* (4. baskı), Ankara
- Türkel, S. ve Felekoğlu, B. (2004). Yükleme hızının beton basınç dayanımına ve elastisite modülüne etkisi, *DEÜ Müh. Fak. Fen ve Müh. Dergisi (6)*, 65-75
- Uğurlu, A. (1994). Önyapımlı Betonların Kür edilmesi, *Türkiye Mühendislik*

Haberleri, Sayı 371, 52-57.

Uyan, M. (1982). Isıl İşlem Uygulaması İle Birlikte Katkı Kullanımının Beton Özelliklerine etkisi, *Doç Tezi*, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.

Vandewalle, L., (1996), "Influence of the Yield Strength of Steel Fibres on the Toughness of Fibre Reinforced High Strength Concrete", *Proceedings, the CCMS Symposium, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry, Chicago*, 496-505.

Walraven, J. (1999), The evolution of concrete, *Structural Concrete, Journal of fib, (Pl)*, 3-11.

Yang, Q., Zhang, S., Huang, S. & He, Y. (2000). Effect of Ground quartz Sand on properties of High Strength concrete in the Steam-autoclaved curing, *Cement and Concrete Research*, 1993-1998