

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

REAKTİF PUDRA BETONLAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Seda ALTINTAŞ ŞAHİNOĞLU

EKİM 2010

TRABZON

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

REAKTİF PUDRA BETONLAR

İnşaat Mühendisi Seda ALTINTAŞ ŞAHİNOĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“İnşaat Yüksek Mühendisi”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05/10/2010
Tezin Savunma Tarihi : 20/10/2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Şirin KURBETCİ
Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU**

Enstitü Müdürü: Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU

Trabzon 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmama bilgileriyle, deneyimleriyle destek veren danışman hocam Prof. Dr. Şakir ERDOĞDU'ya deney çalışmalarında bana her türlü yardımda bulunan eşim Onur ŞAHİNOĞLU'na, çelik liflerin temin edilmesinde yardımcı olan Sn. Mehmet YERLİKAYA ve Beksa Çelik Kord San. ve Tic. Firmasına ve diyorit agregasını sağlayan Trabzon Oyak Beton Tesisine teşekkürü bir borç bilirim.

Seda ALTINTAŞ ŞAHİNOĞLU
Trabzon 2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.1.1. Beton Çeşitleri ve Temel Özellikleri	1
1.1.1.1. Birim Ağırlıklarına Göre Betonlar	2
1.1.1.2. Basınç Dayanımlarına Göre Betonlar	3
1.1.1.3. Üretildikleri Yere Göre Betonlar	3
1.1.1.4. Uygulandıkları Yere Göre Betonlar	5
1.1.2. Betonun Bileşenleri	10
1.1.2.1. Çimento	10
1.1.2.2. Agrega	10
1.1.2.2.1. Çakıl ve Kırma Taş Agregaların Karşılaştırılması	11
1.1.2.2.2. Mineral Agregalar	12
1.1.2.2.2.1. Magmatik Kayaçlar	13
1.1.2.2.2.2. Sedimanter (Tortul) Kayaçlar	14
1.1.2.2.2.3. Metamorfik Kayaçlar	15
1.1.2.3. Beton Karışım Suyu	16
1.1.2.4. Katkılar	17
1.1.2.4.1. Kimyasal Katkılar	18
1.1.2.4.2. Mineral Katkılar	19
1.2. Reaktif Pudra Betonlar	19
1.2.1. Gelişim Aşaması	19
1.2.2. Reaktif Pudra Betonların Genel Tanımı	20
1.2.3. Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri	22

1.2.3.1.	Basınç ve Çekme Dayanımı	22
1.2.3.2.	Eğilme Dayanımı	24
1.2.3.3.	Kırılma Enerjisi	24
1.2.3.4.	Elastisite Modülü	25
1.2.4.	Reaktif Pudra Betonun Özelliklerine Etkiyen Faktörler	28
1.2.4.1.	Çimento Tipi Etkisi	28
1.2.4.2.	Su İçeriği	28
1.2.4.3.	Agrega Tipi ve En Uygun Tane Dağılımı	29
1.2.4.4.	Mineral Katkıların Etkisi	31
1.2.4.4.1.	Silis Dumanı	33
1.2.4.5.	Süper Akışkanlaştırıcıların Etkisi	35
1.2.4.6.	Çelik Liflerin Etkisi	36
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	39
2.1.	Amaç	39
2.2.	Kullanılan Malzemeler	39
2.2.1.	Çimento	39
2.2.2.	Silis Dumanı	39
2.2.3.	Agrega	40
2.2.3.1.	Kullanılan Agregaların Genel Özellikleri	40
2.2.4.	Süper Akışkanlaştırıcı Katkı	41
2.2.5.	Çelik Lifler	42
2.2.6.	Karışım Suyu	42
2.3.	Beton üretimi	43
2.3.1.	Elek Analizi Deneyi	43
2.3.2.	Tasarımların Karışım Oranları	46
2.3.3.	Karıştırma İşlemi	47
2.3.4.	Yayılma Tablası Deneyi	48
2.3.5.	Yerleştirme İşlemi	49
2.3.6.	Otoklav (Yüksek Basınç Altında Buhar Kürü) Deneyi	50
2.3.7.	Basınç ve Çekme Deneyleri	52
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	54
3.1.	Beton Dayanım Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	54
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62

5.	KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Reaktif Pudra Betonların (RPB) basınç dayanımları 200 ve 800 MPa, çekme dayanımları 25 ve 150 MPa, birim ağırlıkları 2500-3000 kg/m³ aralığında değişen ve kırılma enerjileri yaklaşık olarak 30000 J/m² mertebesinde olan yeni kuşak betonlardır.

Bu çalışmada farklı oranlarda çimento, silis dumanı, agregası, süper akışkanlaştırıcı ve çelik lif kullanarak 8 tasarım yapılmıştır. Su/çimento oranı 0.22-0.23 mertebesinde tutulmuştur.

Deneyisel çalışmalarda diyorit ve kuvars olmak üzere iki farklı agregası kullanılmıştır. Kuvars agregası en büyük tane büyüklüğü 0,6 mm olacak şekilde temin edilmiştir. Diyorit agregası ise en büyük tane büyüklüğü 8,00 mm olacak şekilde kullanılmıştır. Karışımlarda 6,00 mm boyunda, 0,15 mm çapında; narinliği 40 olan ve çekme dayanımı 1100 MPa, özgül ağırlığı 7,20 g/cm³ olan Beksa-Dramix çelik lifler kullanılmıştır.

Karıştırma işlemi sonrasında taze beton üzerinde yayılma deneyi gerçekleştirilmiş ve ardından sarsma tablasında sarsılıp şişlenerek 4×4×16 cm prizmatik kalıplara yerleştirilmiştir.

Numuneler 24 saat sonunda kalıplarından çıkarılmış ve otoklav deneyine tabi tutulmuştur. Otoklav sürecinden 24 saat sonra numuneler üzerinde eğilmede çekme ve basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Yerleştirme ve sıkıştırma numunelerde minimum boşluk elde edilecek şekilde yapılmıştır. Su/çimento oranını minimum düzeyde tutmak için malzemeler önce kuru olarak 5 dakika karıştırıldıktan sonra karışım suyu azar azar ilave etmek suretiyle karıştırma işlemi toplamda 20 dakika olacak şekilde sürdürülmüştür.

Çelik lif kullanmaksızın RPB üretimi mümkün görülmemektedir. RPB için en az %3-4 oranında çelik lif kullanarak 2 saat süreli 2 MPa basınç altında otoklav uygulaması zorunludur. Bu uygulama biçimi ile 200 MPa üzerine rahatlıkla çıkılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: RPB, Silis Dumanı, Süper akışkanlaştırıcı, Çelik lif, Otoklav

SUMMARY

Reactive Powder Concrete

Reactive Powder Concretes (RPC) are new generation concretes with compressive strengths ranging from 200 to 800 MPa, tensile strengths ranging from 25 to 150 MPa, unite weights ranging from 2500-3000 kg/m³ and with fracture energy of 30000 J/m².

Eight mixtures with different amounts of cement, micro silica, aggregate, superplasticizer, and steel fibers were produced throughout the program. The water to cement ratio was kept at a level of 0.22-0.23.

Two types of aggregates as diorite and quartz were used in the study. The maximum size for quartz was 0.6 mm while it was 8 mm for diorite. Beksa-Dramix steel fibers of six mm long and 0.15 mm diameter were used in the production of the mixtures. The aspect ratio for the steel fibers was 40, the tensile strength 1100 MPa, and the specific gravity 7.20 g/cm³, respectively.

Flow test was performed on the mixtures right after the mixing process ended up and then the mixture was compacted in the 4x4x16 cm three-gang prismatic steel molds. The specimens were placed in the autoclave right after demolding process at the end of 24 hours. Following a waiting period of 24 hours after autoclaving process, flexural and compression tests were performed on the specimens.

Placement and compaction processes were carried out as to minimize the pores ratio in the specimens. To minimize the water to cement ratio, the components were mixed in dry state for a period of approximately 5 min initially; and then the mixing water was gradually added to the mixture while mixing process going on. The total duration for the mixing process was about 20 min for all mixtures.

Producing of RPC without steel fibers seems to be impossible. To produce Reactive Powder Concrete (RPC), a two-hour autoclaving under 4 MPa pressure seems to be compulsory for mixtures containing steel fibers of not less than 3-4%.

Key Words: RPC, Micro silica, Superplasticizer, Steel fiber, Autoclave

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.	Diyorit taşı	13
Şekil 2.	Betonun gelişim sürecinde basınç dayanımı – su / çimento ilişkisi	20
Şekil 3.	Beton, agrega ve çimentonun tipik gerilme – deformasyon eğrileri	26
Şekil 4.	Beton için tanımlanan elastisite modülleri	27
Şekil 5.	Bağlı yoğunluk su / bağlayıcı oranı grafiği	29
Şekil 6.	Reaktif pudra betonlarının (RPB) ve normal betonların tane dağılımı eğrilerinin karşılaştırılması	30
Şekil 7.	Reaktif pudra betonlarının (RPB) teorik olarak en fazla doluluğu sağlayacak tane dağılımı	30
Şekil 8.	Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi	34
Şekil 9.	Kuars agregası	40
Şekil 10.	Diyorit agregası	41
Şekil 11.	Elek analizinde kullanılan elek makinesi	43
Şekil 12.	8 mm – 0,125 mm elek analiz sonucu granülometri eğrisi	44
Şekil 13.	%50 8-2 mm, % 50 2-0,125 mm alınan agreganın granülometrik eğrisi	46
Şekil 14.	Karıştırıcı (mikser)	48
Şekil 15.	Yayılma tablası deney aparatı	49
Şekil 16.	Yayılma tablası deneyi	49
Şekil 17.	Deneylerde kullanılan sarsma tablası	50
Şekil 18.	Üçlü prizmatik kalıpların doldurulmuş hali	50
Şekil 19.	Deneylerde kullanılan otoklav aparatı	51
Şekil 20.	Eğilmede çekme deneyleri için kullanılan pres	52
Şekil 21.	Basınç deneylerinde kullanılan pres	53
Şekil 22.	Tasarımın basınç deneyine tabi tutulması	53
Şekil 23.	1. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	56
Şekil 24.	2. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	56
Şekil 25.	3. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	57
Şekil 26.	4. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	57
Şekil 27.	5. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	58
Şekil 28.	6. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri	58

Şekil 29. 7. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri.....	59
Şekil 30. 8. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri.....	59
Şekil 31. Diyorit agregası ile üretilen numunelerin çekme ve basınç değerleri	60
Şekil 32. Kuvars agregası ile üretilen numunelerin çekme ve basınç değerleri	60
Şekil 33. Tüm numunelere ilişkin çekme ve basınç dayanımları	61

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Beton karışım oranları	1
Tablo 2. Liflere ait bazı fiziksel özellikler	7
Tablo 3. Doğal kırmataş hammaddelerinin jeolojik sınıflandırılması	12
Tablo 4. RPB200 ve PRB800'ün üretim ve mekanik özellikleri.....	23
Tablo 5. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonuna ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması.....	23
Tablo 6. RPB'nin mekanik, fiziksel, kimyasal ve durabilite özellikleri	25
Tablo 7. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
Tablo 8. Kullanılan silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler	40
Tablo 9. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin fiziksel özellikleri	42
Tablo 10. 8 mm-0,125 mm analiz sonucu granülometrik bileşimi	44
Tablo 11. 8 mm-2 mm elek analizi sonucu	45
Tablo 12. 2 mm-0,125 mm elek analizi sonucu	45
Tablo 13. % 50 8-2 mm, %50 2-0,125 mm granülometrik bileşimi	45
Tablo 14. Tasarımlara ilişkin karışım oranları, s/ç oranları ve yayılma değerleri	47
Tablo 15. Tasarımların otoklav basınç ve süreleri	52
Tablo 16. Tasarımların basınç ve çekme dayanım değerleri	55

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton; çimento, su, agregası ile gerektiğinde kimyasal, mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup şekil verilebilen, zamanla katılaşarak sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

Betonun mutlak hacmini %70 oranında agregası, %10 oranında çimento, % 20 oranında su oluşturur. Gerektiğinde, çimento ağırlığının %5'sinden fazla olmamak kaydıyla, katkı maddesi ilave edilebilir (Gülşah, 2010).

Tablo 1. Beton karışım oranları

Beton Karışımları						Karışım
Ağırlıkça (Alman)			Hacimce (ABD)			
Çimento Kg	Kum Kg	Çakıl Kg	Çimento Lt	Kum Lt	Çakıl Lt	
1	2,5	3,6	1	1,5	3	Zengin
1	3	4,5	1	2	3,5	Standart
--	--	--	1	2,5	4	Orta
--	--	--	1	3	5	Zayıf
Miktarlar			Kullanıldığı Yerler			
Çimento Kg	Kum Lt	Çakıl Lt				
325	400	800	Yüksek mukavemetli kolon, vibrasyon ve su etkisi			
275	400	800	Betonarme döşeme, kiriş, kolon, makine temelleri			
250	500	800	Toprak üstü beton inşaat, temeller			
500	500	850	Kütle betonu, duvar dolgusu			

1.1.1. Beton Çeşitleri ve Temel Özellikleri

Betonu temel olarak dört ana grupta inceleyebiliriz:

- Birim Ağırlıklarına Göre
- Basınç Dayanımlarına Göre
- Üretildikleri Yere Göre
- Uygulandıkları Yere Göre

1.1.1.1. Birim Ağırlıklarına Göre Betonlar

a) Hafif Beton: Birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) $0,70-2,00 \text{ kg/dm}^3$ arasında olan betonlara hafif beton denir. Genellikle bu betonlar atık maddeleri değerlendirmek veya yapı elemanından ses, ısı ve hafiflik özelliklerinin arandığı durumlarda yapılan betonlardır. Hafif beton kullanılmasıyla;

- Yapı elemanının öz ağırlığının azalmasıyla kesitlerde küçülme nedeniyle hacim genişmesi ve donatı ekonomisi sağlanacaktır.
- Yapının ölü (zati ağırlık) yükünün azalması yanı sıra ses ve ısı özelliğinde önemli ölçüde yararlar sağlamaktadır.
- Yoğunluğun azalmasından dolayı depremlerden daha az etkilenerek can ve mal kaybı daha az olacaktır.
- İzolasyon için ikinci bir malzeme kullanılmayacağından dolayı ekonomi sağlayacaktır.
- Yangına ve donma-çözölmeye karşı dayanımı daha fazladır. Çünkü beton içindeki birbirinden bağımsız boşluklar su ile tamamen dolmadığından dondan dolayı meydana gelecek içsel gerilmeden çok az etkilenecektir (Gölşah, 2010).

Mekanik özellikleri normal betona göre düşüktür. Kalifiye insan gücü gerektirir. Kalıp sökme süresi, normal betona göre daha uzun zaman ister. Beton üretiminde kullanılan agregalar bölgeseldir.

Hafif betonlar çeşitli metotlarla üretilmektedirler; hafif agregalarla, kimyasal köpüklerle, kum kullanılmadan yalnız iri agrega ile ve kimyasal metotlarla gaz oluşturmak gibi. Bunların içinde en yaygın ve ekonomik olanı hafif agregalarla beton üretimidir. Üretildikleri hafif agrega cinsine göre isim alırlar; bina betonu, uçucu kül betonu, genişleştirilmiş kil betonu ve odun talaşı betonu gibi.

b) Normal Beton: Normal doğal taneli agrega ile üretilen ve birim ağırlığı $1,80-2,80 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişen betonlardır. Bu betonlar önemli bir ayrıcalık özelliği istenmeyen bina inşaatlarında kullanılmaktadır. Normal yoğun agrega ile üretilmektedir. Maliyetinin ucuzluğu, yüksek dayanımı, kolay işlenebilme özelliklerinden dolayı diğer yapı malzemelerine göre daha fazla kullanılmaktadır.

Ancak bu betondan inşa edilen yapı elemanlarının birim ağırlıklarının fazla olması istenmeyen bir durumdur. Bu elemanlar kendi öz ağırlıklarını taşıya bilmeleri için oldukça fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadırlar.

c) Ağır Beton: Ağır betonlar özellikle zararlı ışınlara karşı bir perde oluşturmak amacıyla kullanılan, birim ağırlıkları $2,80-5,00 \text{ kg/dm}^3$ arasında olan betonlardır. Kullanım yerleri arasında nükleer reaktörler yani atom santralleri, hastanelerin ışın tedavisi yapılan bölümleri gösterilebilir.

Ağır betonların agregaları ağırdır. Bu agregalar barit (baryum sülfat BaSO_4), limonit, magnetit vb. demirli minerallerdir. Yoğunlukları $3,20 \text{ kg/dm}^3$ 'ün üstündedir. Bunlarla üretilen betonların yoğunlukları $2,80 \text{ kg/dm}^3$ 'ten yüksek olmaktadır (Gülşah, 2010).

Nükleer çalışma gereği betonların içine bor tuzları katılır. Bunlar geciktirici etki yapar. Ağır agregalar mukavemet yönünden normal agregalara eşdeğerdir. Ancak aşınmaları biraz fazladır.

1.1.1.2. Basınç Dayanımlarına Göre Betonlar

a) Normal Dayanımlı Beton: C 50/60'a kadar basınç dayanımı olan betonlar normal dayanımlı olarak adlandırılırlar. Bu betonların yapımında tabii karışık agregalar kullanılabileceği gibi TS802'de öngörülen agregalar da kullanılır.

b) Yüksek Dayanımlı Beton: C 50/60 ve üstü olarak gruplandırılmaktadır. C 50/60 ve daha yüksek beton sınıflarındaki betonların yapımında kullanılacak agregalar mutlaka TS802 de öngörülen gruplarla üretilmelidir.

1.1.1.3. Üretildikleri Yere Göre Betonlar

a) Şantiye Betonu: Beton bileşenlerinin şantiyede karıştırılması sonucu elde edilen betondur. 5 km ye kadar bu betondan dağıtım yapılması mümkündür.

Önce kum ve çakıl çimento ile karıştırılarak ve uygun bir harman oluncaya kadar en az 3 defa aktarılmalı, ondan sonra süzgeçli bir kova ile su verilmeli ve tamamen homojen bir beton kitlesi elde edilinceye kadar karıştırılmaya devam edilmelidir. Beton üretiminde tecrübeli işçi çalıştırılmasına özellikle dikkat edilmelidir.

b) Beton Santrali Betonu (Transmikser): Betonun şantiyede harmanlanıp karıştırılması yerine beton santralinden yerleştirme mahalline hazır olarak teslim edilirse buna önceden karıştırılmış beton veya hazır beton denir.

Avantajları şöyle sıralanabilir:

- Sertleşmiş beton özelliklerinin değişkenliği azalır.
- Beton santralinin ve agrega depolarının kurulmasına elverişli olmayan kalabalık yerleşim bölgesi ve şehirlerarası yollardaki şantiyelerde kullanımda kolaylık sağlar.
- Betonun kıvamı korunabilir.
- Küçük hacimli beton üretimi ve sürekli olmayan beton yerleştirilmesi için pratiktir.
- Zamandan ve işgücünden tasarruf sağlar.
- Sürekli kalite kontrol olanağı sağlar.

Dezavantajı; maliyeti biraz fazla olabilir fakat bu maliyet artışı daha az sayıda personel görevlendirilmesi ve basınç dayanımında standart sapmanın daha düşük olması ve çimento miktarındaki tasarrufla telafi edilebilir.

Hazır Beton, kuru karışım ve yaş karışım olmak üzere iki farklı şekilde üretilmektedir.

1) Kuru Karışım Sistemi: Bu sistemde hazır beton, agrega, çimento ve varsa mineral katkısı beton santralinde ölçülüp, transmikserde karıştırılan, suyu ve varsa kimyasal katkısı ise teslim yerinde ölçülüp karıştırılarak ilave edilen ve teslim yerinde hazırlanan taze betondur.

Kuru karışım sistemi çok dikkat edilmesi gereken unsurlar:

- Şantiyede karışıma verilen su ve kimyasal katkı miktarının, karışım dizaynında öngörülen miktarlardan fazla olmamasına,
- Karıştırma süresinin, homojen bir karışım için yeterli olacak sürede olmasına özen gösterilmelidir.

2) Yaş Karışım Sistemi: Bu sistemde ise hazır beton, su ve kimyasal katkıları da dâhil olmak üzere tüm bileşenlerin beton santralinde ölçülmesi ve karıştırılması ile elde edilen taze betondur. Taze beton, beton santralinde transmiksele yüklenerek teslim yerine gönderilir ve burada kullanıcıya teslim edilir.

1.1.1.4. Uygulandıkları Yere Göre Betonlar

a) Püskürtme Beton: Püskürtme beton, püskürtülerek yerleştirilen ve aynı zamanda püskürtme etkisiyle sıkılan betonudur. Bu beton basınçla dayanıklı lastik veya özel yapımlı boğumlu saç borularla kullanılacağı yere iletilir ve buradan yüzeye püskürtülür. Böylece sıkışması sağlanmış olur. Boru çapları genellikle 30-65 mm (genel olarak kullanılan en büyük agrega çapının 3 katı boru çapı seçilir) boyu ise 10-100 m alınabilir.

Bu betonun amacı beton ve betonarme yapılarda arızaları gidermek, çatlakları kapatmak, yapıyı her türlü zararlı etkilere karşı korumak ve mukavemetini artırmaktır. Püskürtme betonu yüzeysel pullanma, kabarıklık dökülmelerin olduğu yapılarda ve beton tabakalarının alt kısımlarında kullanmak avantajlıdır. Püskürtme beton yaş ve kuru olmak üzere iki şekilde kullanılır.

1) Kuru Sistem: Karışım, kuru (susuz) olarak hazırlanır. Karışımında kullanılan malzemeler; çimento, agrega ve gereğinde çok ince malzeme (puzolanik) ile katkı maddesidir. Beton karışım elemanları püskürtme makinasına konularak ve kontrollü olarak makine içindeki değirmenden geçirilir ve basınçla püskürtme borularına gönderilir. Bu karışımında su yerine kullanılan kimyasal madde püskürtme başlıklarında karışıma ilave edilir.

2) Yaş Sistem: Karışım yaş olarak hazırlanır. Çimento, agrega ve su ile karıştırıldıktan sonra basınçlı hava ile istenilen yüzeye püskürtülebilir. Üst veya düşey yüzeylerde çökme ve bağ kaybının engellenmesi için püskürtme betonu tabakalar halinde (5cm) uygulanmalı ve her bir uygulama arası en az 30 dakika veya daha çok olmalıdır.

Püskürtülen yüzey pürüzlü olur ve bu yüzeyi mala ile düzeltmek sakıncalıdır. Çünkü yapılmış betonu aşağıya indirme olasılığı vardır. Püskürtme işleminden önce yüzeye hasır çelik konur. Son zamanlarda ise beton içine ince çelik teller konarak “fiber beton” tekniğinden yararlanılmaktadır. Sonuçta betonun çekme dayanımı yükseltilmiş olur.

Püskürtme beton uygulaması şu nedenden dolayı iyi sonuç verir;

- Basınçla püskürtüldüğünden alttaki beton tabakası ile yüksek bir aderans sağlanır.
- 7 günlük basınç mukavemeti 500kgf/cm^2 (50N/mm^2), 28 günlük eğilme mukavemeti 79kgf/cm^2 'nin üstündedir. Bu nedenle beton kısa zamanda yüksek bir mukavemet kazanmış olur.

Püskürtme betonun uygulama alanları olarak yüzme havuzu, tünel kaplamaları, hasarlı yapıların onarımı, yapıların takviyesi gibi işler sayılabilir.

Mukavemeti; aderansına ve az rötre yapmasına bağlıdır. Püskürtme beton uygulanan yüzey, en az üç gün güneşin direkt ışınları altında kalmamalı, 14 gün rutubetli tutulmamalıdır. O halde püskürtme betonun bakımına son derece önem verilmelidir.

b) Lifli Beton: İnşaat Mühendisliği alanında, sağladığı avantajlar bakımından lifli betonların önemi hızla artmaktadır. Lifli beton; çimento, agrega ve çoğunlukla süreksiz dağılılı liflerin su ile karıştırılmasıyla meydana gelen beton olarak tanımlanmaktadır.

Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirdiği bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını artıran faktörler darbe etkisine karşı dayanımını da artırır (Gülşah, 2010).

Genel olarak lifler şu sınıflara ayrılırlar:

- Metalik lifler
- Polimerik lifler
- Mineral lifler
- Doğal elde edilen lifler

Metalik lifler ya çelik ya da paslanmaz çelikten yapılırlar. Polimerik lifler akrilik, aromid, naylon, polyester, polietilen ve polipropilen lifleri kapsar. Cam lifler en çok kullanılan mineral liflerdir. Ağaç (selülozik), akwara, hint kamışı, hindistan cevizi, keten ve bitkisel lifler, jut, kenevir, şeker kamışı posası gibi organik ve inorganik doğal elde edilen liflerin değişik tipleri, çimento matrisinin güçlendirilmesinde kullanılmaya başlanmıştır.

Tablo 2. Liflere ait bazı fiziksel özellikler (Gülşah, 2010)

Lif Türü	Özgöl Kütle (10^3 kg/m^3)	Elastise Modülü (KN/mm^2)	Çekme Mukavemeti (KN/mm^2)	Kopma Uzama Oranı (%)
Asbest				
(a) Krisotil	2,55	164	3,1	2-3
(b)Krokidolit	3,37	196	3,5	2-3
Karbon				
(a)Tip I	1,90	380	1,8	0,5
(b)Tip II	1,90	230	2,6	1,0
Polipropilen	0,90	5,0	0,5	20
Naylon (Tip 242)	1,14	4,0	0,9	15
Kevlar				
(a)PRD 49	1,45	133	2,9	2,6
(b) PRD 29	1,44	69	2,9	4,0
Kenevir	1,5	-	0,8	3,0
Cam	2,6	80	2-4	2-3,5
Çelik	7,8	200	1-3	3-4

Lifleri tanımlayan en önemli iki öge; lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile onun sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan biçimsel özelliklerdir. Yani:

- Görünüm oranı (narinlik oranı),
- Geometrik yapısı,
- Lifin çekme gerilmesidir.

Araştırma konusu olan çelik lifler birbirinden farklı değişik yöntemlerle üretilirler. Genellenecek olursa;

- Soğukta çekilmiş tellerin kesilmesi yöntemi
- Çelik plakların kesilesi yöntemi
- Sıcak çekme yöntemi
- Çelik tellerin öğütülmesi yöntemi

Çelik liflerin gözden kaçırılmaması gereken en önemli nitelikleri yüksek ve üniform çekme gerilmesine karşılık düşük uzama özellikleridir. Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan liflerin beton ile aderansı lifli betonun işlevini olumlu ya da olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvvetleri etkisi ile matrinden ayrılması düz liflere göre daha zordur. Çelik liflerin yüksek çekme

mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matrsten sıyrılması lifli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli öğedir. Bu olay harç fazının (matris) yapısı ile ilgili olmakla beraber kullanılan liflerin geometrik yapısıyla da yakından ilgilidir.

Çelik lifler ile güçlendirilmiş betonların genel uygulamalarında yüzeyi kaplanmamış çelik lifler kullanılır. Bu tellerin tek sakıncası, özellikle beton vibrasyonlu mastar ile yerleştirilmiyorsa açıkta kalan tellerin paslanarak yüzeyde kırmızı pas lekeleri meydana getirmesidir. Aşırı paslanmanın olabileceği ortamlarda ve ön yapımlı beton elemanlarda galvanizlenmiş liflerin kullanılması daha uygundur. Bu liflerin teknik özellikleri diğerleri ile aynı olup sadece korozyona karşı daha dirençlidirler.

Genellikle beton karışımlarında lif yüzdeleri 0.50 ile 2.50 arasında değişen hacimsel oranlardaki liflerin beton özelliklerine etkisi incelenmiştir. Genellikle beton karışımlarında kullanılan liflerin narinlik oranları 50 ile 100 arasında değişmektedir. Bu oran büyük olduğunda karışım içerisinde topaklanma oluştuğu ve liflerin homojen dağılmadığı gözlenmiştir. Yerleştirme sırasında kullanılan vibrasyon liflerin dönmesine ve belirli yönlerde dizilmelerine neden olmaktadır.

Bu durum lifin narinlik oranıyla beraber vibrasyon tipi ve kalıp boyutuna bağlıdır. Bu sebeple lifli betonların yerleştirilmesinde dış vibrasyon iç vibrasyona göre tercih edilmektedir.

Eğilme deneylerinde, maksimum eğilme yükündeki şekil değiştirmelerin artan lif miktarı ve boyutunun bir fonksiyonu olarak önemli bir artış gösterdiği belirtilmektedir.

Agrega, çimento ve beton içerisinde çoğunlukla süreksiz dağılılı liflerin suyla karıştırılmasından meydana gelen lifli betonun mekanik özellikleri, bileşenlerin özelliklerine bağlı olarak değişmektedir.

Beton içerisinde homojen olarak dağılılı lifler, belli bir yüklemekten sonra meydana gelen çekme gerilmelerini karşılamaktadır.

Bu yüzden lifler betonun içyapısındaki çatlak oluşumunu engelleyerek eğilme dayanımlarını artırmaktadır. Ayrıca betonun parçalanmadan büyük şekil değiştirme yapmasına olanak sağladığından tokluğu ve darbe yüklerine karşı direnci de artırmaktadır.

Lifli betonlara ısıtma işlem uygulanması ile ilk yaşlardaki mukavemet artışı daha da yükselebilir. Bu yüzden erken yaşlarda kazanılan bu mukavemet artışı, bilhassa prefabrike yapı elemanları üretiminde kalıp süresini kısaltarak elemanın daha az bir zamanda servise

sunulmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla hem zamandan hem de kalıptan daha ekonomik bir şekilde yararlanmak mümkün olacaktır.

Yapılan çalışmalar sonunda, çimentolu sistemler içine katılan liflerin başlıca rolünün betonda oluşan çatlakların matrix içinde ilerlemelerinin yavaşlatılmasıdır.

c) Ferrocement Beton: Ferrocement genellikle sık aralıklarla serilmiş, sürekli nispeten küçük çaplı tel örgülerle donatılmış çimento harcından oluşan ince cidarlı bir betonarme çeşididir. 10 mm'den 40 mm'ye kadar değişen kalınlıklarda ince paneller veya kesitler şeklinde ve pas payı 2-3 mm olacak şekilde hazırlanabilmektedir.

Küçük konutların yapımında en büyük problem çatı malzemesi tayininde çıkmaktadır. Konutun döşeme duvarları yerel malzemelerle inşa edilebilmektedir. Ancak yerel malzemelerle dış etkilere ve depreme dayanıklı ekonomik çatılar yapmak pek mümkün olamamıştır.

Yapılan araştırmalarda, ferrocement katlanmış plak ve oluklu levhalar ile ferrocement kabuk çatıların asbestli çimento levhalara oranla daha düşük birim maliyette olduğu ve daha yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Asbestli çimento levhaların sağlığa zararlı yanı değerlendirilince ferrocement, çatı elemanları daha tercih edilir hale gelmiştir.

Bu nedenle diğer malzemelerin aksine kolaylıkla kubbe, kemer, kabuk gibi şekillerde üretilmesi sayesinde, uzun açıklıklar geçilebilmekte ve yapı maliyeti düşmektedir.

d) Vakumlu Beton: Bu beton genellikle geniş alanlarda (hava alanı, endüstriyel döşeme, akaryakıt istasyonlarında ve karayolu) dökülen taze betona uygulanır.

Betonda yeterli yüksek işlenebilirlik ve minimum su/çimento oranının birlikte temin edilmesinin bir yolu da yerleştirme işleminden sonra taze betonun vakum işlemine tabi tutulmasıdır.

Taze beton su dolu ve sürekli kanal sistemine sahip olduğu için beton yüzeyine tatbik edilen vakum, betonu belirli derinliğe kadar su çekilmesine imkân verir. Vakum işlemi ile sadece yüzeydeki kabarcıklar alınabilmektedir.

Tatbik edilen vakum genellikle 400-650 mm civarındadır. Bu işlem su miktarının 15-30cm derinlikte %20 oranına kadar düşürülebilir. Taze betonda, suyun vakum yoluyla çekilmesi betonda oturmaya neden olduğu için beton kalınlığında %3 oranına varan azalmalara neden olur. Çekilen su miktarı zamana bağlı olarak düşer, 15-20 dakika süreyle vakum uygulanması en ekonomik süre olarak tespit edilmiştir (Gülşah, 2010).

1.1.2. Betonun Bileşenleri

Betonu oluşturan hammaddeler çimento, su, agregası (kum, çakıl, kırma taş), kimyasal katkıları ve mineral katkılarıdır. Kimyasal katkıları (akışkanlaştırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı, antifriz) mineral katkıları (taşunu, tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı) betonun performansı istenen yönde iyileştiren çağdaş teknoloji unsurlarıdır. Çimentoyla suyun karışımından oluşan çimento hamuru zamanla katılaşarak sertleşerek agregası tanelerini (kum, çakıl, kırma taş) bağlar, yapıştırır, böylece betonun mukavemet kazanmasına imkân verir.

Dolayısıyla betonun mukavemeti, çimento hamurunun mukavemetine, agregası tanelerinin mukavemetine, agregası taneleri ile çimento hamuru arasındaki yapışmanın gücüne (aderans) bağlıdır.

1.1.2.1. Çimento

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket. vb.) yapıştırmada kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Kırılmış kalker, kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve/veya kum katılarak toz haline getirilir.

Bu malzeme 1400-1500°C'de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere bir miktar alçıtaşı eklenip (%4-5) oranında, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir.

Katkılı çimento üretiminde; klinker ve alçıtaşı dışında, çimento tipine göre tek veya bir kaç bir arada olmak üzere tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. katılır.

Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir.

1.1.2.2. Agregası

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırma taş gibi malzemelerin genel adı agregasıdır. Beton içinde hacimsel olarak %60-75 civarında yer işgal eden agregası önemli bir

bileşendir. Agregalar tane boyutlarına göre ince (kum, kırma kum gibi) ve kaba (çakıl, kırma taş gibi) agregalar olarak ikiye ayrılır. Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları, zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür gibi), basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları, toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri, yassı ve uzun taneler içermemeleri, çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.
- Agreganın kirli olması aderansı olumsuz etkilemekte, ayrıca bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır.
- Beton agregalarında elek analizi, yassılık, özgül ağırlık ve su emme gibi deneyler uygun aralıklarla yapılarak kalite sürekliliği takip edilmelidir. Betonda kullanılacak agregalar TS706 EN 12620'ye uygun olmalıdır.

1.1.2.2.1. Çakıl ve Kırma Taş Agregaların Karşılaştırılması

Agrega tanelerinin şekil ve biçimlerinin muhtelif özellikleri üzerinde önemli etkileri vardır. Yalnız hemen belirtelim ki bu etkiler daha ziyade iri agregalar için bahis konusu olmaktadır.

Agregalar önceden açıklandığı gibi en genel olarak çakıl ve kırma taş olmak üzere iki şekilde bulunurlar.

Çakıl taneleri yuvarlak olması dolayısıyla daha az boşluk bırakarak belirli bir hacmi doldurabilir. Buna karşılık kırmataşlarda bulunan kesin köşeler bunlar arasında önemli boşlukların kalmasına sebep olur. Bu durumun sonucu olarak tane limit boyutları aynı olan çakıl ve kırmataş numunelerinden çakıl daha büyük kompasiteye sahip bulunur.

Bu konuda bir fikir vermek için çakılların kompasitesi 0,65 kırmataşınki 0,60 dolaylarında yer almakta olduğunu belirtebiliriz.

Yapılan deneyler çakıl - kırmataş karışımlarında kırmataş arttıkça kompasitenin azalmakta olduğunu da ayrıca göstermiştir. Agreganın kompasitesinin düşük olması o malzeme ile üretilen betonun mukavemetinin de düşük olmasına genel olarak yol açar. Fakat kırmataş halinde tanelerin yüzeylerinin pürüzlü olması bunlarla çimento hamuru arasında kuvvetli bir aderansın meydana gelmesine sebep olur. Bundan dolayı kırmataş ile üretilen betonların mukavemetinde bir azalma değil birçok hallerde bir artış bile kaydedilebilir (URL-1, 2010).

1.1.2.2. Mineral Agregalar

Yapı Malzemesi olarak kullanılan doğal ve yapay endüstriyel mineral ve kayaçlar''Mineral Agregalar'' olarak adlandırılırlar. Doğal mineral agregalarının bileşimi kayaç ve minerallerdir. Mineraller Kimyasal bileşimleri tanımlanmış, özel kristal yapıya sahip doğal oluşumlardır. Kayaçlar ise bu minerallerin bir araya gelmesiyle oluşurlar. Doğal agregalar olarak tanımlanan kırmataşları meydana getiren kayaçlar kökenlerine göre magmatik, metamorfik ve sedimanter olmak üzere 3 temel sınıfa ayrılabilir. Kırmataş olarak kullanılan bu kayaçların sınıflaması Tablo 3’de belirtilmiştir (Arıoğlu vd., 2006).

Tablo 3. Doğal kırmataş hammaddelerinin jeolojik sınıflandırılması

Grup	Genel Sınıflama	Kayaç	Yoğunluk
Magmatik	Plütonik	Granit	2,60
		Siyenit	2,70
		Diyorit	2,80
		Gabro	2,90
		Peridotit	2,90
	Volkanik	Riyolit	2,60
		Trakit	2,60
		Andezit	2,60
		Bazalt	2,80
		Diyabaz	2,90
Sedimanter	Kimyasal (Karbonatlı)	Dolomit	2,70
		Kireçtaşı	2,60
	Kırıntılı (Silisli)	Konglomera	2,60
		Kumtaşı	2,60
		Kuvarsit,arkoz	2,60
		Kiltaşı,şeyl	2,60
		Arjilit,çört	2,60
		Grovak	2,60
Metamorfik	Foliasyonlu	Amfibol	3,00
		Şist	2,80
		Gnays	2,70
		Sleyt,fillit	2,70
	Foliasyonsuz	Mermer	2,70
		Kuvarsit	2,80

1.1.2.2.1. Magmatik Kayaçlar

Magmanın katılaşması ile oluşmuşlardır. Magmanın katılaşma derinliğine ve zamanına bağlı olarak derinlik-plütonik, intrüzif ve yüzey-volkanik, ekstrüzif olmak üzere ikiye ayrılırlar. Derinlik Kayaçları, 1,0 mm'den daha büyük tane boyutuna sahip minerallerden oluşmuştur. Volkanik kayaçlar ise 1,0 mm'den daha küçük tane boyutuna sahip minerallerden meydana gelmiş ve camsı malzemelerden oluşmuşlardır. Tane boyutlarındaki bu değişim magmanın soğuma derecesine ve katılaşma boyunca oluşan fiziko-kimyasal koşullara bağlıdır (Arioğlu vd., 2006).

a) Granit: Silis ve Alkalilerce zengin, kalsiyum, demir ve magnezyumca fakir, yeryüzünde sıkça görülen en önemli kayaçtır. Kuvars, alkali feldispat (ortoklaz), asit plajiyoklaz, biyotit ve hornblend, nadiren piroksen esas mineralojik bileşimini oluşturur. Tüm kristalli bir dokuya sahip olup, açık renkler ile karakterize olur. Yüzey kayacı riolitir (Arioğlu vd., 2006).

b) Siyenit: Kimyasal bileşimlerinde %52-66 arasında SiO_2 bulunur. Bazen çok az, fakat genellikle hiç Kuvars içermezler. Tüm kristalli ve taneli kayaçlardır. Mineralojik bileşimi alkali feldispat, plajiyoklaz, biyotit, hornblend şeklindedir. Granitlerle karşılaştırıldığında siyenitlere doğada daha az rastlanır. Yüzey kayacı trakittir (Arioğlu vd., 2006).

c) Diyorit: Açık gri renkli, orta-iri taneli bir kayaçtır. Bileşiminde plajiyoklaz (andezin), hornblend, biyotit ve piroksen mineralleri vardır. Kuvars hiç yok veya çok azdır. Dış görünüşü granite benzemesine rağmen daha koyu renklidir. Yüzey kayacı andezittir (Arioğlu vd., 2006).



Şekil 1. Diyorit taşı

e) Gabro: Genellikle iri kristalli, koyu renkli, mineralojik bileşimi plajiyoklaz (labrador veya anortit), piroksen ve amfibol olan derinlik kayacıdır. Yüzey kayacı bazalttır (Arnoğlu vd., 2006).

f) Peridotit: Olivin ve piroksene zengin, %45'ten az SiO₂ içeren koyu renkli bir kayaktır. Bileşimindeki olivin veya piroksene bağlı olarak dünit veya piroksenit olarak adlandırılır (Arnoğlu vd., 2006).

1.1.2.2.2. Sedimanter (Tortul) Kayaçlar

Hava suyun mekanik ve kimyasal etkisiyle oluşan parçacıkların (tortular) su, rüzgar, dalga ve buzullarla aşınıp deniz, göl, akarsu veya karalarda üst üste birikmesi olayına “tortulaşma”, “çökelme” veya “sedimentasyon”; bu şekilde oluşan kayaçlara da “tortul” veya “sedimanter” kayaçlar denir. Genellikle tabakalı olup çoğunlukla fosil içerirler (Arnoğlu vd., 2006).

a) Konglomera, Kumtaşı ve Kuvarsitler: Bu kayaçlar, kum ve çakıl tanelerinden birbirinin veya her ikisinin doğal bağlayıcı maddelerle çimentolanması sonucu oluşmuşlardır. Bu çimento maddeleri kum, silt, kil ve karbonat, silis, kil, dolomit, demir vb. bileşimlerinde olabilir. Eğer taneler çakıl özelliğinde ise bu kayaca “konglomera” denilir. Eğer kayaçlar, çapları 2-0.02 mm arasında olan kum büyüklüğündeki tanelerin bir araya gelmesiyle oluşmuşlarsa “kumtaşı” veya “Kuvarsit” olarak adlandırılırlar. Kuvarsitler kuvars tanelerinden oluşmuşlardır. Konglomera ve kum taşları sadece sedimanter kayaçlar olmalarına rağmen, kuvarsitler sedimanter veya metamorfik olabilirler (Arnoğlu vd., 2006).

b) Grovak: Kum büyüklüğündeki kuvars ve feldispat tanelerinin çimentolanmasıyla oluşmuştur. Kum boyutlu kilaşı, şeyl, arjilit ve sleyt kayaç parçaları matriks içinde bolca bulunur (Arnoğlu vd., 2006).

c) Arkoz: Granitlerden türemiş, feldispatça zengin kaba taneli kumtaşlarıdır (Arnoğlu vd., 2006).

d) Kilaşı, şeyl, arjilit, silttaşı: Bunlar çok ince taneli kayaçlar olup, sedimanter silt veya killerin veya kil içeren herhangi bir kayacın erozyonu ile oluşmuşlardır. Yumuşak ve masif ise “kilaşı” veya “silttaşı” olarak bilinir. Eğer kilaşı sert, tabakalı veya ince tabakalara bölünebilir haldeyse “şeyl” olarak adlandırılır.

Kuvars, feldispat ve diğer mineralleri içeren masif ve dayanıklı ince taneli killi kayalara “arjilit” adı verilir. Arjilit bazı şeyler gibi su ile temasta dağılıp parçalanmaz (Arıoğlu vd., 2006).

e) Karbonat Kayaçları: Bileşiminde CO₃ bulunduran kayaçlardır. Kalsit minerali bakımından zenginse “kireçtaşı”, dolomit minerali içeriyorsa “dolomit” olarak adlandırılırlar. Bu kayaçlar genellikle her iki minerali belirli oranda içerirler. Bazı karbonat kayaçları kuvars, çört, kil mineralleri, organik maddeler, jips ve sülfidler gibi karbonat olmayan karışımlar içerebilirler (Arıoğlu vd., 2006).

f) Çörtler: Mikrokristalli ve kriptokristalli kuvars, kalsedon veya opal gibi silisçe zengin kolloidlerin yumrular halinde birikmesiyle oluşmuşlardır. Çörtleri, kireçtaşı ve dolomit formasyonlarında kum ve çakıl bileşenleri gibi nodüllü, mercek veya çatlakları dolduran şekiller olarak izlenirler. Yine kimyasal sedimanter kayaçlardan karbonatça zengin, ince taneli, delikli ve hafif olan “traverten” ve “albatr” lar da kırmataş hammaddeleridirler (Arıoğlu vd., 2006).

1.1.2.2.2.3. Metamorfik Kayaçlar

Magmatik, Metamorfik veya Sedimanter Kayaçların sıcaklık, basınç ve gerilme etkisi altında veya kimyasal aktivitesi olan sıvılar (eriyikler) etkisiyle değişimleri, başkalaşmaları sonucu oluşmuş kayaçlardır (Arıoğlu vd., 2006).

a) Şist: Folisyonu oldukça belirgin, şiddetli derecede değişikliğe uğramış, orta taneli bir kayaçtır. Mineralojik bileşimini çeşitli mikalar, kuvars, klorit ve talk oluşturur (Arıoğlu vd., 2006).

b) Gnays: Orta- iri taneli, kristalli, çoğunlukla açık renkli, kuvars ve feldispatlardan meydana gelmiş kayaçlardır. Kolaylıkla levha veya prizmalara ayrılabilir. Magmatik kayaçlardan türeyen çeşidine “ortognasy”, Sedimanter kayaçlardan türeyen çeşidine ise “paragnasy” adı verilir (Arıoğlu vd., 2006).

c) Sleyt (Arduvaz): Bileşiminde daha çok moskovit bulunan, şeyl ve ince taneli volkanik tüflerden oluşmuş, çok hafif metamorfizma geçirmiş bir kayaçtır (Arıoğlu vd. 2006).

d) Fillit: Sleyte benzeyen bileşiminde serisit, klorit ve kuvars bulunan ince taneli bir kayaçtır. Tane boyu ve mineralojik bileşim bakımından şist ve sleyt arasındadır (Arıoğlu vd., 2006).

e) Mermer: Kireçtaşı, dolomitik kireçtaşı, bazen de dolomitlerin metamorfizması sonucu oluşmuşlardır. Küçük taneli olmaları olağandır. Bileşiminde silis, silikat, feldispat, demiroksit, mangaoksit, pirit, mika, fluorit ve organik maddeler de bulunabilir (Arnoğlu vd., 2006).

f) Kuvarsit: %80'den fazla kuvarstan oluşmuş, taneli- kristalli bir kayadır. Kuvars taneleri birbiri ile tam olarak çimentolanmışsa kayaya yüksek bir dayanım verir (Arnoğlu vd., 2006).

1.1.2.3. Beton Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun iki önemli işlevi vardır:

- Kuru haldeki çimento ve agregayı plastik, işlenebilir bir kütle haline getirmek.
- Çimento ile kimyasal reaksiyon yaparak plastik kütlede sertleşmesini sağlamak.

Beton mukavemeti su/çimento oranına bağlıdır. İşte bu sebeple şantiyeye teslimi yapılan taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacıyla fazladan su katmak betonun mukavemetini azaltır.

Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Betondan geri kazanılmış sular, kaynak suları, doğal yüzey suları ve endüstriyel atık sular bir takım ön deneyler yapılmak kaydıyla beton yapımında uygun olabilir. Deniz suyu ve acı göl suları, içerisinde donatı bulunmayan betonlarda kullanılabilir. Kanalizasyon (lağım) suları ise beton yapımı için uygun değildir.

Karışım suyu içinde bulunabilecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilir. Karışım suyunun analizlerle belirlenmesi ve kalitesinin belli aralıklarla denetlenmesi şarttır. Beton üretiminde kullanılan karma suyunun kalitesi, betonun priz süresi, dayanım kazanma hızı ve donatının korozyona karşı korunmasını etkileyebilir. Bilinmeyen kalitedeki bir suyun, beton üretimi için karma suyu olarak uygunluğunun tayininde suyun bileşimi ve imal edilecek betonun kullanım yeri dikkate alınmalıdır.

Betonun bünyesinde çimento ile reaksiyona girmeyen fazla suyun bıraktığı boşluklar yalnız dayanımı düşürmekle kalmamaktadır. Boşluklardan içeri giren zararlı unsurlar (klor, sülfat vb. zararlı etkenler) beton ve donatıya zarar vermekte ve betonun ömrünü kısaltmaktadır.

1.1.2.4. Katkılar

Betonun özelliklerini geliştirmek üzere üretim sırasında veya dökümden önce transmikse az miktarda ilave edilen maddelere katkı adı verilir.

ASTM C 125, katkı maddesini, betonun geleneksel bileşenleri olan su, çimento ve agregada dışında hemen karıştırma öncesi veya karıştırma sırasında beton harmanına ilave edilen maddeler olarak tanımlamaktadır. Bu maddeler organik ya da inorganik esaslı olup beton bileşimine ağırlıkça toplam bağlayıcının %5'ini aşmayacak oranlarda katılan maddelerdir. Genellikle sıvı halde olan bu maddeler literatürde “kimyasal katkı maddeleri” olarak bilinirler. ASTM C 219 'da ise “mineral katkı maddeleri” tanımlanmaktadır.

Bu maddeler çok ince öğütülmek suretiyle bazen çimento ile sınırlı oranda karıştırılarak bazen de üretim sırasında betona belli oranlarda ilave edilerek kullanılan çimentomsu, yani bağlayıcı özelliği olan maddelerdir (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003).

Katkı maddelerinin betonda kullanımı genellikle taze ve sertleşmiş haldeki betonun bir yada birden fazla özelliğini iyileştirme amacına yöneliktir. Katkı maddelerinin kullanımıyla taze beton özelliklerinde sağlanan iyileştirmeler;

- Su miktarını arttırmaksızın işlenebilirliğini arttırmak,
- Belli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını azaltmak,
- Priz süresini uzatmak ya da kısaltmak,
- Su kusmayı önlemek,
- Ayırışmayı azaltmak,
- Pompalanabilirliği iyileştirmek,
- Kıvam kaybı hızını azaltmak olarak sıralanabilir.

Katkı maddeleri kullanmak suretiyle sertleşmiş betonun özelliklerinde sağlanan iyileştirmeler de;

- Hidratasyon ısısını erken yaşlarda azaltmak yada geciktirmek,
- Dayanım gelişimini erken yaşlarda hızlandırmak,
- Dayanımı arttırmak,
- Zararlı çevresel etkilere karşı dayanıklılığı arttırmak,
- Geçirimsizliği azaltmak,
- Alkali-agrega reaksiyonunu kontrol etmek,
- Donatı-beton aderansını güçlendirmek,

- Betonun, dayanımı yanında, pek çok diğer mekanik özelliklerini iyileştirmek,
- Donatı korozyonunu bastırmak veya engellemek ve
- Ekonomi temin etmek şeklinde özetlenebilir (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003).

Katkı maddelerini kökenine göre kimyasal ve mineral katkıları olarak ikiye ayırmak mümkündür.

1.1.2.4.1. Kimyasal Katkıları

Kimyasal katkıların özellikleri TSEN934-2'ye göre belirlenir. Kimyasal katkıların belli çeşitleri aşağıda sıralanmıştır:

a) Su Azaltıcılar (Akışkanlaştırıcılar): Betonda aynı kıvamın veya işlenebilirliğin daha az su ile elde edilmesini sağlarlar. Taze betonda kullanılan su miktarı azaldıkça betonun dayanımı artar. Azalttığı su miktarı ile orantılı olarak normal ve süper olarak ayrılırlar.

b) Priz Geciktiriciler: Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdırlar.

c) Priz Hızlandırıcılar: Priz geciktiricilerin aksine, bu katkıları betonun katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun katılaşmış olmasını sağlamak için kullanılırlar.

d) Antifrizler: Betonun donmaya karşı kendisini korumasını ve geç priz almamasını sağlar. Antifriz suyun donma sıcaklığının üzerindeki hava sıcaklığında kullanılmalıdır. Eğer hava sıcaklığı suyun donma sıcaklığının altında ise ek tedbirler alınmalıdır.

e) Hava Sürükleyici Katkıları: Beton içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini, dona karşı direncini ve işlenebilirliğini artırır.

f) Su Geçirimsizlik Katkıları: Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılarıdır. Ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır. Bazı betonlarda birden fazla katkı türü birlikte kullanılabilir.

Ancak bu katkıların birbirlerinin etkilerini bozmadıkları denenmelidir. Kimyasal katkıları, yukarıda bahsedilen etkilerinden dolayı bütün inşaat sektöründe betonun ayrılmaz parçası olmuştur.

1.1.2.4.2. Mineral Katkılar

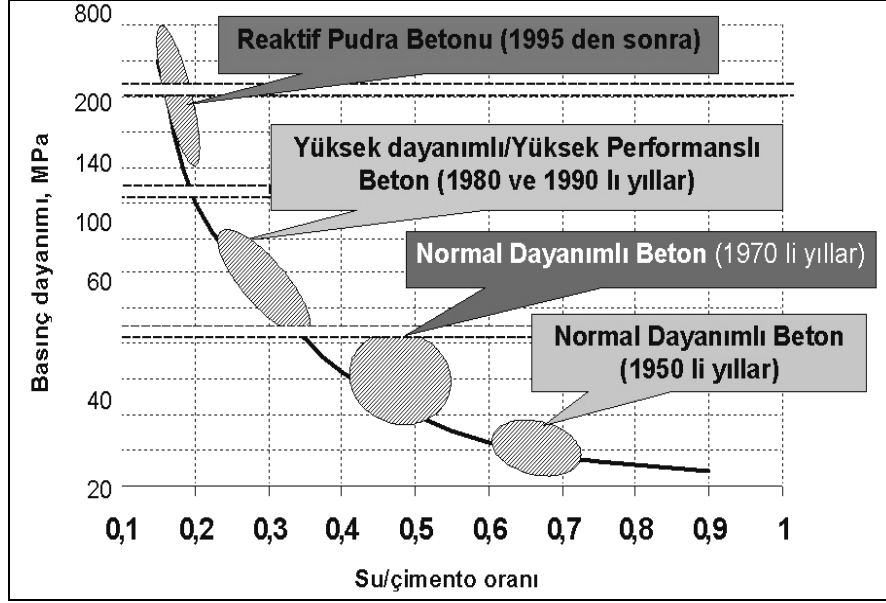
En az çimento inceliğinde öğütölmüş toz halinde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taş unu ve benzeri çeşitli maddelere mineral katkı maddeleri adı verilir. Mineral katkılar tek başlarına çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar fakat birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar. Dolayısıyla, çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkılardan yüksek dayanımlı beton üretiminde de yararlanılır.

1.2. Reaktif Pudra Betonlar

1.2.1. Gelişim Aşaması

1960'lı yıllarda erişilebilen en yüksek beton basınç dayanımı 15-25 MPa arasında iken 1970'li yıllarda yüksek katlı yapılarda kolon yüklerinin temele taşıtılabilmesi için 40-50 MPa beton basınç dayanımlarına ulaşılmıştır. Zaman içerisinde dayanımları artan bu betonlara yüksek performanslı beton adı verilmiş ve yol, köprü, liman yapısı vb. uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Betondaki dayanım artışına paralel olarak zaman içerisinde su/çimento oranında da düşüş gerçekleşmiştir. 1950'li yıllarda su/çimento oranı 0.60-0.70 aralığında değişirken 1970'li yıllarda akışkanlaştırıcıların devreye girmesi ile bu aralık 0.40-0.55'e düşmüş, 1980 ve 1990'lı yıllarda ise süper akışkanlaştırıcılar sayesinde söz konusu su/çimento oranı 0.25-0.35 aralığına inmiştir. Tüm bunlarla birlikte 1980'li yıllardan sonra ultra ince mineral katkı olan silis dumanının beton içerisinde kullanımının yaygınlaşması ile dayanımlarda çok yüksek artışlar sağlanmıştır. Daha sonra su/çimento oranının 0.20' nin altına düşürölmesi ile yeni kuşak süper akışkanlaştırıcılar, kısa kesilmiş yüksek dayanımlı çelik teller ve sıcak su kürü ve basınçlı su buharı kullanarak beton basınç dayanımları 200 MPa'ın üzerine çıkarılmıştır (Topçu ve Karakurt, 2005).

Basınç dayanımları yanında çekme, eğilme ve tokluk değerlerinin yüksek olması aynı yük altında daha küçük kesitlerle yapı dizaynına imkân verdiği gibi deprem sonrası yapıların iyileştirmesinde, güçlendirmesinde RPB yakın gelecekte kullanım alanı bulacak bir malzemedir (Karabulut, 2006).



Şekil 2. Betonun gelişim sürecinde basınç dayanımı-su/çimento ilişkisi

Reaktif pudra betonlarında yüksek mekanik dayanımların sağlanmasında üretim aşamasında; akışkanlaştırıcı katkıları, 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 (Karabulut, 2006).

Reaktif Pudra Betonun üretiminde ana ilkeler şu şekildedir:

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

1.2.2. Reaktif Pudra Betonların 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 (Karabulut, 2006).

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 (Karabulut, 2006).

RPB ileri mekanik özelliklere, üstün fiziksel karakteristiklere, mükemmel sünekliğe ve çok düşük geçirimsiliğe 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 RPC800 olmak üzere esasta aynı fakat üretiminde ve ısıt işlemlerinde bazı farklılıklar bulunan iki değişik malzeme üretilmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

Reaktif pudra betonu üretiminin amaçları şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek Performanslı Betonlara iyi bir alternatiftir ve yapısal olarak çelikte yarışacak bir potansiyele sahiptir.
- Üstün basınç dayanımı, yüksek kesme dayanımı kapasitesiyle birleşerek önemli ölçüde ölü yük azalmasına ve çok sayıda narin prefabrik üretimine olanak verir.
- Daha hafif elemanlarla, azalan kesit alanlarıyla daha büyük sehim ve daha yüksek enerji yutmayı sağlayarak depreme dayanıklılıkta gelişim sağlar.
- Düşük ve birbirine bağlı olmayan kılcal boşlukları, porozite yapısını önemli oranda geliştirir. Bu da durabilitesi yüksek bir malzeme özelliği olduğunu göstermektedir.

- 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.
- Yüksek kırılma enerjisi, daha tok ve daha fazla oranda enerji yutabilen yapısal elemanların üretilebilmesine 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:

- Optimum yoğunluktaki matrise varmak için karışımdaki bütün tanelerin dağılımının hassas bir biçimde ayarlanması,
- Betonun homojenliği için agrega tanelerinin en büyük boyutunun azaltılması,
- Betondaki su miktarının azaltılması,
- Yüksek inceliğe sahip silis dumanın puzolanik özelliklerinin yoğun bir biçimde kullanılması,
- Bütün bileşenlerin optimum bileşimi,
- Süneklik için kısa kesilmiş çelik tellerin kullanımı,
- 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 (Karabulut, 2006).

1.2.3. Reaktif Pudra Betonların Mekanik Özellikleri

1.2.3.1. 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 (Karabulut, 2006). RPB'ler de 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 civarındadır (Richard ve Cheyrezy,1995). Yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, RPB şu anda gerçekten oldukça üstün özellikli bir malzeme olarak kabul edilebilir (Walraven, 1999).

RPB'ler dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla 300 kat daha fazladır (Richard ve Cheyrezy, 1995). 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; Matteve Moranville, 1999).

RPB'nin mekanik özellikleri Pierre Richard ve Marcel Cheyrezy tarafından hazırlanan 'Composition of Reactive Powder Concretes' çalışmasında RPC200 ve RPC800 olmak üzere mekanik özellikleri Tablo 4 ve Tablo 5 'te şu şekilde özetlenmiştir.

Tablo 4. RPB200 ve RPB800'ün üretim ve mekanik özellikleri

	RPB 200	RPB 800
Priz sırasında sıkıştırma	Yok	
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 5. Normal dayanımlı beton (NDB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve reaktif pudra betonuna ait bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPB
Basınç dayanımı (MPa)	20–60	60 -115	200 -800
Elastisite modülü (GPa)	20–30	35 -40	60 -75
Eğilme dayanımı (MPa)	4–8	6 -10	50 -140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100–120	100 -130	1200-40000

1.2.3.2. 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, 1996). İnce liflerinde kullanımı ile 50 MPa kadar olağanüstü eğilme dayanımları elde edilebilir. Yüksek oranda enerji yutabilmesi ile düktilite açısından metallere yakın değerler göstermektedir (Richard ve Cheyrezy, 1995).

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 (Karabulut, 2006).

1.2.3.3. 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 harcının yaklaşık 300 katı kadar olduğu sonucuna varılabilir (Taşdemir vd., 2002).

Tablo 6'da Reaktif pudra betonu (RPB), yüksek dayanımlı beton (YDB) ve normal dayanımlı beton (NB) ile karşılaştırılmıştır (Karabulut, 2006).

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 çözülme, gibi durabilite özellikleri üzerinde durulmuştur.

Tablo 6. RPB'nin 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 çözülme (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

1.2.3.4. Elastisite Modülü

RPB'nin elastisite modülü ile ilgili araştırma, Pierre Richard ve Marcel Cheyrezy tarafından hazırlanan 'Composition of Reactive Powder Concretes' çalışmasında Tablo 4'de verilmiştir. Tablo 4'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 agrega 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 agrega arasındaki bağa da bağlıdır.

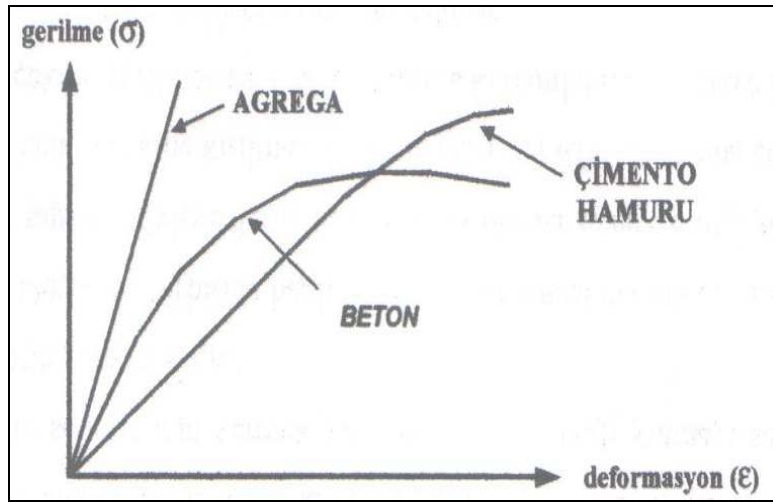
Basınç dayanımının %25-40 'ından daha yüksek gerilmelerde beton elastik özelliğini kaybeder. Çok büyük gerilme seviyeleri göz önüne alınmadığı durumda betonu oluşturan bu iki temel malzemenin de (agrega ve çimento hamuru) gerilme-deformasyon diyagramlarının doğrusal olduğu söylenebilir (Mindess ve Young,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

Araştırmalar, çimento hamuru ile agrega arasında aderanstaki düşüşün betonun elastik davranıştan uzaklaşmasına neden olduğunu göstermiştir. Öte yandan yüksek dayanımlı betonlar, elastik davranışa daha yakın davranış göstermektedir. Ayrıca agrega

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 agrega 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 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.

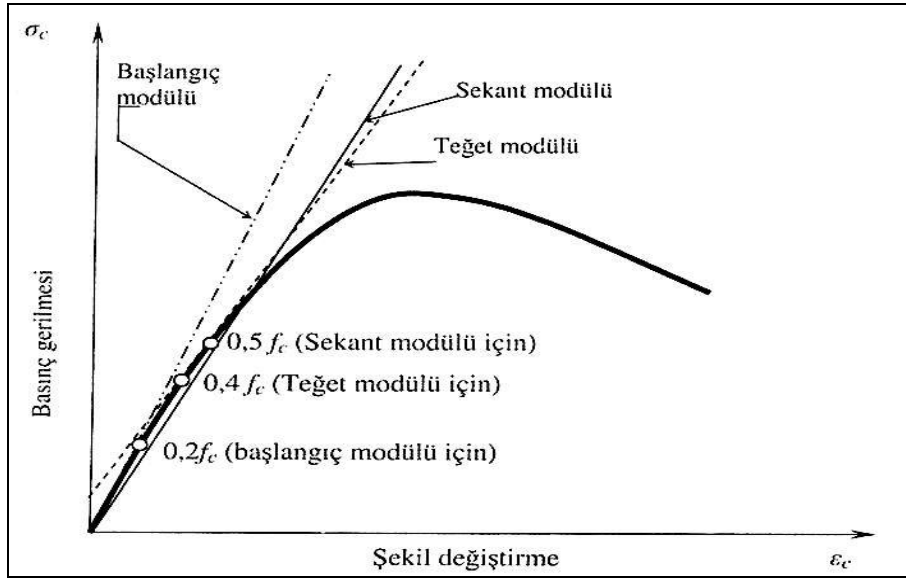
Teğet modülü σ - ϵ eğrisinin herhangi bir noktasından çizilen teğetin eğimidir. Uygulamada bu teğet yaklaşık olarak $0,4 \times f_c$ gerilmesine karşıt gelen nokta esas alınarak çizilir.

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 arttıkça 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 değişle E_t nin alabileceği en fazla değerdir (Karabulut, 2006).

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 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).

1.2.4. Reaktif Pudra Betonun Özelliklerine Etkiyen Faktörler

1.2.4.1. Çimento Tipi 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. Kama oksit bileşimi çimento inceliği ve azaltılmış hidratasyon 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, 1995).

Portland çimentosunun hidratasyonu 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 (Karabulut, 2006).

1.2.4.2. Su İçeriği

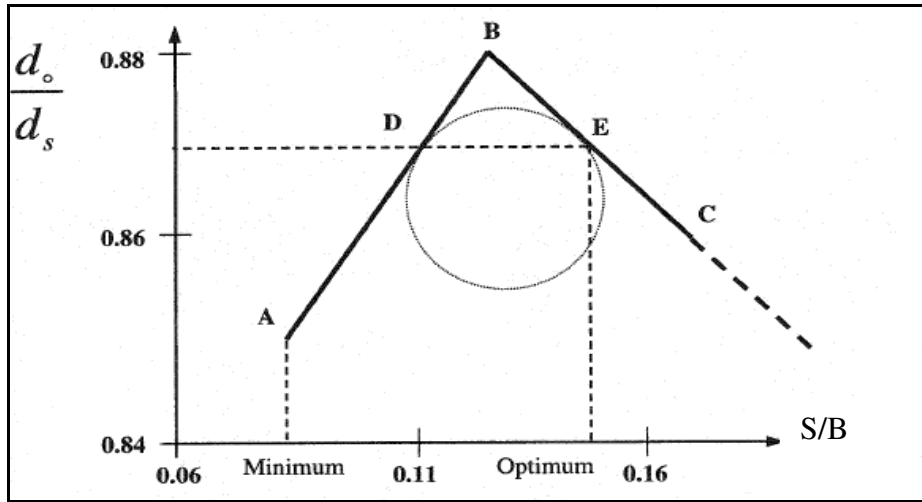
RPB’de granüler matrisin performansını ve kalitesini belirlemede ana parametrelerinden biri de su içeriğinin, işlenebilirliğini sağlayan en düşük oranın belirlenmesidir. En düşük su / bağlayıcı oranı (bağlayıcı olarak çimento ve mikro silika

malzemeleri) yoğun RPB karışımlarında 0,08 olarak belirlenmiştir (Pierre ve Cheyrezy, 1995).

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, 1995).

Şekil 5’de bağıl yoğunluğun su / bağlayıcı (S/B) ile değişimi ve optimum değerleri ifade edilmektedir (Pierre ve Cheyrezy, 1995). Şekil 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.

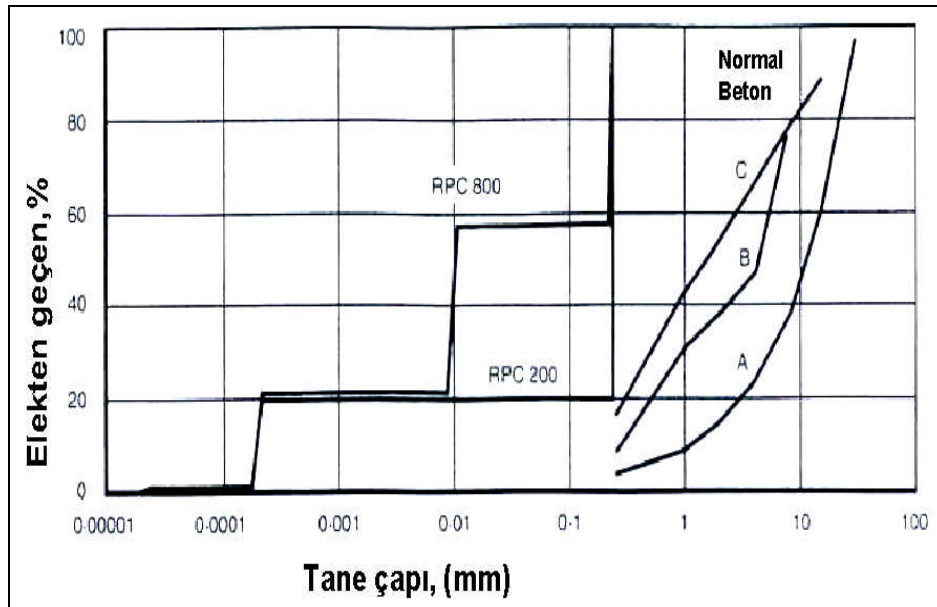


Şekil 5. Bağıl yoğunluk su/bağlayıcı oranı grafiği

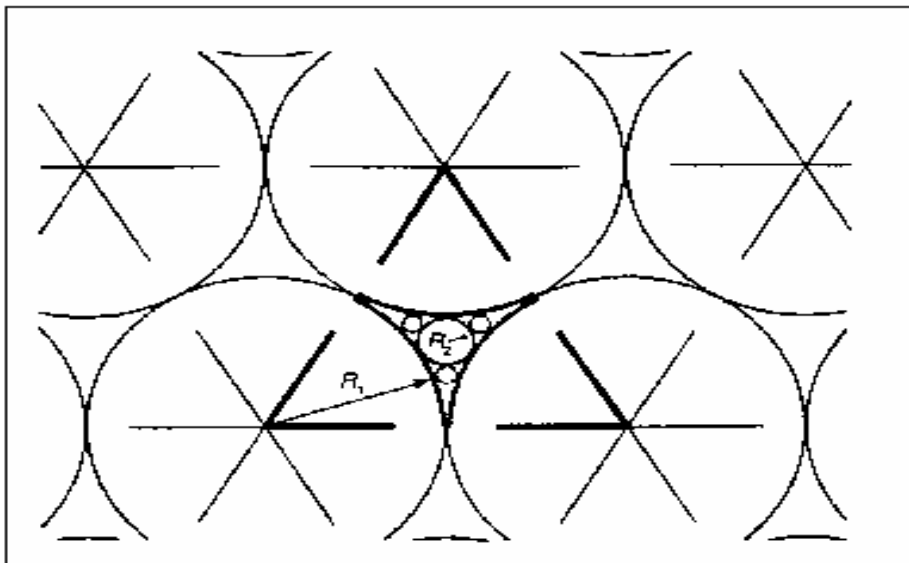
1.2.4.3. Agrega Tipi ve En Uygun Tane Dağılımı

Mikro yapıda maksimum yoğunluğu elde etmek amacıyla karışımdaki bütün tanelerin hassas biçimde düzenlenmesi ile en büyük doluluğu sağlayacak biçimde optimize

edilmesi gerekir. Bu optimizasyonda mikro yapıda bazı tane çaplarının olmaması, diğer bir deyişle kesikli granülometri esasına dayanarak matrisin oluşturulması ile en fazla doluluk sağlanmalıdır. Şekil 6 ve Şekil 7’de teorik olarak maksimum sıklığın nasıl sağlanacağı şematize edilmiştir (Taşdemir vd., 2003).



Şekil 6. Reaktif pudra betonlarının (RPB) ve normal betonların tane dağılımı eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 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 mertebesinde dir. 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 sahiptir. 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, 1991).

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).

1.2.4.4. Mineral Katkıların Etkisi

Doğal puzolanlar volkanik küller ve tüfler (traslar), ponza taşlarıdır. Yapay puzolanların önemlileri ise pişmiş kil ve şeyller, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu 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 (Karabulut, 2006).

Yakın zamandaki gelişmelere dayanarak da mineral katkıların boşlukları doldurma etkisinin pozolonik etkiden daha önemli olduğu sonucuna varılmıştır (Taşdemir vd., 1996).

Bilindiği gibi çimentonun C_2S ve C_3S bileşenlerinin hidrasyonu sırasında esas hidrasyon ürünü kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) yanında, betonun en zayıf halkası $Ca(OH)_2$ de açığa çıkar. Pozolanlar 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 pozolanlar betondaki boşlukları doldurma etkisine sahip olmaları nedeniyle de dayanım ve geçirimsizliği de arttırırlar. Bunun yanı sıra betonda mineral katkı kullanımı, taze ve sertleşmiş durumdaki betonun özelliklerini iyileştirmekte, ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktır (Karabulut, 2006).

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 pozolanların reaksiyonları, çimento hidrasyonundan daha yavaş oldukları için, bunların kullanımı erken yaşlardaki dayanım kazanma hızını azaltmakta ve gerekli olan kür süresini uzatmaktadır (Karabulut, 2006).

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 dumanın da aynı betonda kullanılmasıyla giderilebilir. Silis dumanının yol açtığı su ihtiyacındaki artma da uçucu külün küresel şekilli taneleri ile azaltabilir (Mehta ve Monterio, 1997).

Başka 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, çekme dayanımını, klor geçirgenliğini, alkali-silika reaksiyonlarına direncini, sülfat direncini, asitlere karşı direnç gibi özelliklerini geliştirmektedir (Mehta ve Monterio, 1997).

1.2.4.4.1. Silis Dumanı

Çimento hamuru ve agrega taneleri arasındaki temas yüzeyi betonda en zayıf halkadır. Silis dumanı gibi ultra incelikte tanelerin kullanımı yoğunluğun artırılması 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. Bu da bir süper akışkanlaştırıcı ile sağlanabilir (Taşdemir vd., 2003).

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 katkılar sayesinde olmuştur. Ancak yüksek dayanımlı betonlarda sıkça kullanılan nano boyuttaki silisin üretilmesi yüksek dayanımlı betonlardaki gelişmeyi hızlandırmıştır (Karabulut, 2006).

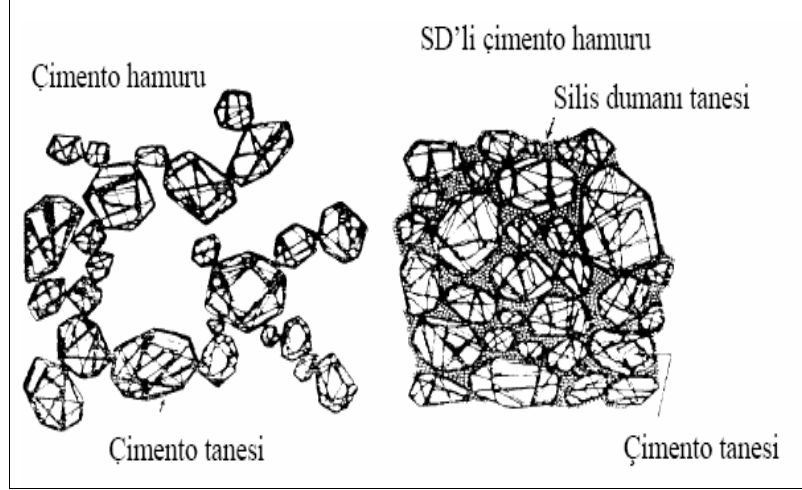
RPB üretiminde kullanılan silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek boşlukları doldururlar ve çimentonun birincil hidratasyonundan oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile puzolanik reaksiyona girerek C-S-H'ı (Kalsiyum Silikat Hidrate) oluştururlar. Malzeme daha yoğun ve dolayısıyla daha mukavemetli bir hale dönüşür. Böylece mikro yapıda puzolonik malzemenin ikincil hidratasyonu ile matris iskeleti biraz daha güçlenecektir (Taşdemir vd., 2003).

Yüksek inceliğe sahip silis dumanı içeren çimento hamurun 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 8'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 8. Silis dumanının 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 hidratasyon 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 arttırır. Kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek çimento hamuru ile agrega

taneleri arasındaki aderansı da arttırır. 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 (Karabulut, 2006).

1.2.4.5. 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 oranının mümkün olduğunca düşük tutmak (%15 civarı) amacıyla sisteme akışkanlaştırıcı katkı ilavesi gerekmektedir (Karabulut, 2006).

Süper akışkanlaştırıcılar, karışım içerisindeki suyun yüzey gerilmesini düşürerek sistem içerisinde partiküller ile suyun homojen şekilde temasını ve daha fazla sayıda çimento tanesinin suyla ıslatılmasını sağlamaktadır. Bunlar dışında çimento tanelerinin yüzeylerine yapışarak, oluşturdukları elektrostatik etki ile çimento tanelerinin bir ara gelip folükül yapı oluşturmalarını 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., 1996).

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).

1.2.4.6. 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 çatlamaya 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 dağınık olarak bulunan çelik tellerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımlarını arttırdığı görülmüştür (Karabulut, 2006).

Ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesine sahip RPB'lerin 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 (Karabulut, 2006).

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 yönelmesi ve telin kopma dayanımıdır (Karabulut, 2006).

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, yükleme 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 esası donatıların kalıba serilmesi ve yüksek dayanımlı akışkan formdaki betonun donatıların arasına enjekte edilmesini kapsamaktadır. Yüksek lif içeriğinden ötürü, SIFCON hem dayanım hem de düktilite açısından normal lifli betonlara kıyasla daha üstün niteliklidir. SIFCON'un dayanımı matrisin dayanımının birkaç katına kadar ulaşabilir ve tokluktaki artış ise çok daha fazladır. Ayrıca, yüksek çelik lif içeriği eğilme yükleri altında kınılma modunun tek bir çatlak yayılmasından, düzensiz çok sayıda çatlak oluşumuna dönüştürür (Yang vd., 2000).

SIMCON ise, sürekli çelik lif hasır içerisine özel olarak dizayn edilmiş çimento esaslı hamurun dökülmesi ile üretilen, geleneksel betona kıyasla yüksek düktilite 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 (Karabulut, 2006).

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 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 Yuli, 1996).

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. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Amaç

Bu çalışmada farklı oranlarda çimento, silis dumanı, agregâ, süper akışkanlaştırıcı, çelik lif kullanarak ve su/çimento oranını değiştirmek suretiyle Reaktif Pudra Beton (RPB) üretimi amaçlanmıştır.

2.2. Kullanılan Malzemeler

2.2.1. Çimento

Bu çalışmada kullanılan Trabzon Çimento Fabrikası Portland çimentosu (CEM I 42,5) kullanılmıştır. Çimentoya ilişkin fabrika tarafından tedarik edilen fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 7’de gösterilmiştir.

Tablo 7. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal kompozisyon (%)		Mineralojik Bileşim (%)	
SiO ₂	20.22	Trikalsiyum silikat	51.2
Al ₂ O ₃	5.67	Dikalsiyum silikat	16.7
Fe ₂ O ₃	2.91	Trikalsiyumalüminat	10.1
CaO	63.41	Tetrakalsiyumalüminoferrit	8.9
MgO	0.96		
SO ₃	2.92		
Kızdırma kaybı	3.32	Fiziksel Özellikler	
Çözünmeyen kalıntı	0.93	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3.10
Serbest CaO(%)	1.20	Özgöl Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	3564

2.2.2. Silis Dumanı

Bu çalışmada kullanılan mikro silis İKSA Mühendislik tarafından sağlanmış olup mikro silise ilişkin fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıda verilmiştir.

Tablo 8. Kullanılan silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Kimyasal kompozisyon (%)		Mineralojik Bileşim (%)	
SiO ₂	91.18	Trikalsiyum silikat	---
Al ₂ O ₃	0.25	Dikalsiyum silikat	---
Fe ₂ O ₃	0.65	Trikalsiyumalüminat	---
CaO	1.06	Tetrakalsiyumalüminoferrit	---
MgO	2.78		
SO ₃	1.61		
Kızdırma kaybı	2.85	Fiziksek Özellikler	
Çözünmeyen kalıntı	---	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.20
Serbest CaO(%)	---	Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g)	---

2.2.3. Agrega

Deneyssel çalışmada kullanılan diyorit agregası Oyak Beton Trabzon Hazır Beton tesisi, kuvars ise Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Diyoritin özgül ağırlığı 2,78 g/ cm³, kuvarsın özgül ağırlığı ise 2,75 g/ cm³'tür.



Şekil 9. Kuvars agregası

2.2.3.1. Kullanılan Agregaların Genel Özellikleri

Diyorit Birbirinden gözle kolayca ayrılabilen açık ve koyu renkli minerallerden oluşan iç püskürük bir taştır. Yer kabuğunun derinliklerinden yeryüzüne doğru ilerleyen

magmanın, yeryüzüne ulaşmadan yer kabuğunun derinliklerinde katılaşması iç püskürük kayaçları oluşturur. İç püskürük kayaçlar, ancak üzerlerindeki kayaç tabakalarının zamanla aşınmasıyla yer yüzeyine ulaşır. Magma, yerin derinliklerinde yavaş yavaş soğuduğundan iç püskürük taşlar genellikle iri kristallere sahiptir.



Şekil 10. Diyorit agregası

Kuvars kumları, beyaz renkli, toz şeker görünümlü, ince taneli olup, başlıca silisten ve az miktarda kil, demir oksit ve kireçten oluşur. Doğada saf olarak bulundukları gibi yapılarında istenmeyen yabancı maddeler de bulunabilir. Kuvars kumları oluşumları açısından genelde ikiye ayrılabilir. Birincisi allohton oluşum dediğimiz kuvarsça zengin magmatik ve metamorfik kayaçların ayrışmasından sonra serbest kalan kuvarsların taşınarak killi gevşek bir çimento ile istiflenmesinden meydana gelir. Bunların renkleri içinde ihtiva ettikleri demirli minerallerin oranına göre beyazdan siyaha kadar değişebilir. İkincisi otokton oluşumdur. Bunlar silisçe zengin kayaçların bir faylanma veya bir metamorfizmanın etkisiyle yerinde ayrışmasından meydana gelirler. Bu tip kuvars kumları allohton oluşumlara göre daha az miktarda yabancı madde içerirler; yani, daha saftırlar.

2.2.4. Süper Akışkanlaştırıcı Katkı

Çalışmada İKSA Mühendislik tarafından temin edilen süper akışkanlaştırıcı katkısı POLYCAR-300 ve BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş. tarafından temin edilen Glenium 51 süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu katkı maddelerinin her ikisi de polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcıdır. Sahip oldukları özel molekül

konfigürasyonu sayesinde çimento hidratasyonunu hızlandırmaktadırlar. Katkı maddesinin çimento taneleri üzerine hızlı absorpsiyonu, etkili bir dispersiyon etkiyle birlikte çimento taneciklerinin yüzeyini genişleterek suyla reaksiyonuna yardımcı olmaktadır.

Tablo 9. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	
Tip	Polikarboksilat
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
PH	6,50 – 8,00
Klorür	$\leq \%0,1$ (TS EN 480-10)
Alkali İçeriği	$\leq \%10$ (TS EN 480-12)
Yoğunluk	1.05 ± 0.02 kg/l

2.2.5. Çelik Lifler

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

Bu çalışmada hacimce %2-3 oranlarında Beksa-Dramix çelik lifleri kullanılmıştır. Bu lifler 6 mm boyunda ve 0,15mm çapındadır. Narinliği 40 olan bu liflerin çekme dayanımı 1100 MPa olup özgül ağırlıkları $7,20 \text{ g/cm}^3$ 'tür.

2.2.6. 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.

Bu çalışmada kullanılan karışım suyu içilebilir nitelikteki musluk suyudur.

2.3. Beton üretimi

Çalışmada öncelikle karışımları oluşturacak agreganın tipi, özgül ağırlığı ve granülometrisi üzerine ön çalışmalar yapılarak başlanmıştır. Bu çalışmalar devamında kullanılacak kür tipi ve süresi belirlenmiştir. Sonrasında mineral katkıları ile geliştirilen bu karışımların eğilme, basınç dayanımları incelenmiştir. Çalışma süresince yapılan incelemelerde hazırlanan karışımların dizaynları kg ve dm^3 olarak verilmiştir. Ayrıca hazırlanan karışımların sahip oldukları kıvamları hakkında bilgi vermesi açısından yayılma tablası değeri de belirtilmiştir. Karışımı oluşturan malzemelerin özgül ağırlıkları farklılıklar göstermektedir. Karışım dizaynının 1 m^3 birim için karşılaştırılabilir bir standartta olması için dizaynlar arasında hacimce azalma veya artış, agrega miktarının değiştirilmesi ile dengelenmiştir. Çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanım olup üç numune üzerinde elde edilen üç değer ortalama, basınç dayanımı ise eğilmede çekme deneyinde ikiye ayrılan 6 parça üzerinde elde edilen ortalama olarak hesaplanmıştır.

2.3.1. Elek Analizi Deneyi

Oyak Beton-Trabzon Hazır Beton tesisinden alınmış olan diyorit agregasının granülometrisi A-B sınır eğrileri arasında kalmamıştır. Bu nedenle iki ayrı granülometriye ayrılmıştır. İki granülometri elde edilmiş olan diyorit agregası % 50 8mm -2 mm, % 50 2mm – 0,125 mm oranında karıştırılarak ortaya yeni granülometrilikli diyorit agregası çıkarılmıştır.

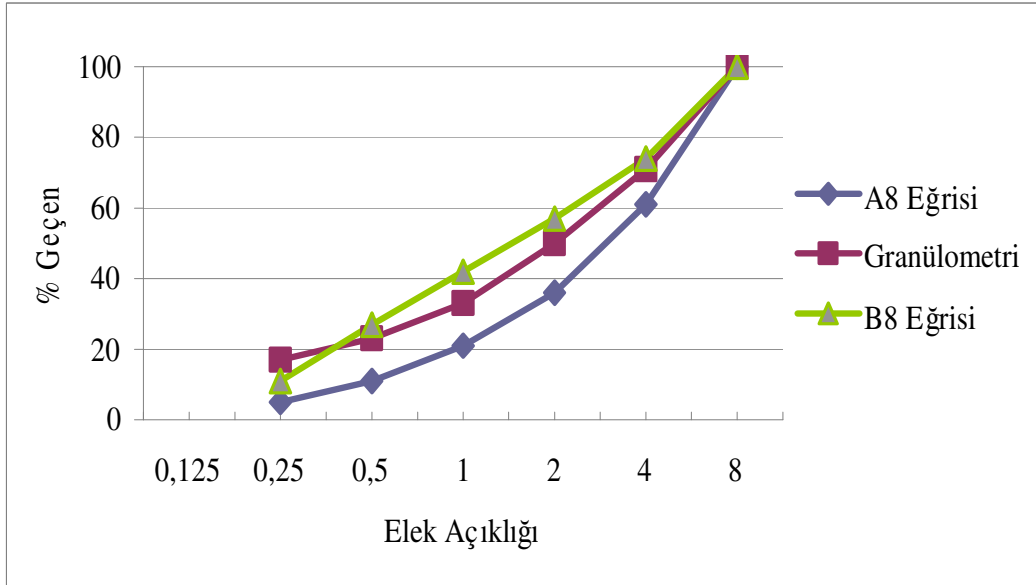


Şekil 11. Elek analizinde kullanılan elek makinesi

Kullanılan diyorit agregasının 8mm-0,125mm granülometrik dağılımı Tablo 10’da granülometri eğrisi Şekil 12’de, 8mm-2mm granülometrik dağılımı Tablo 11’de; 2mm-0,125 mm granülometrik dağılımı Tablo 12’de verilmiştir. Karışımın granülometrik dağılımı Tablo 13’de ve granülometri eğrisi de Şekil 13’de verilmiştir.

Tablo 10. 8 mm-0,125mm analiz sonucu granülometrik bileşimi

Elek No	Elekte Kalan (g)	Kümülatif kalan (g)	Geçen (g)	Elekten Geçen (%)
8mm	0	0	8000	100
4mm	2350	2350	5650	71
2mm	1648	3998	4002	50
1 mm	1328	5326	2674	33
0,5 mm	636	5962	2038	25
0,25 mm	674	6636	1364	17
0,125 mm	749	7385	615	8
Tepsi	615	8000	0	0



Şekil 12. 8mm-0,125mm elek analiz sonucu granülometri eğrisi

Şekil 12’de görüldüğü üzere diyorit agregasının doğal hali A-B sınır eğrileri arasına düşmemektedir. Bu nedenle agrega 2 mm elekten elenmiştir.

Agrega 2 mm elekten elendikten sonra ortaya çıkan diyorit agregalarının granülometrik tabloları aşağıda verilmiştir.

Tablo 11. 8 mm – 2 mm elek analizi sonucu

Elek No	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Geçen (g)	Elekten Geçen (%)
8mm	0	0	7000	100
4mm	4162	4162	2838	40
2mm	2545	6707	293	4
Elek altı	293	7000	0	0

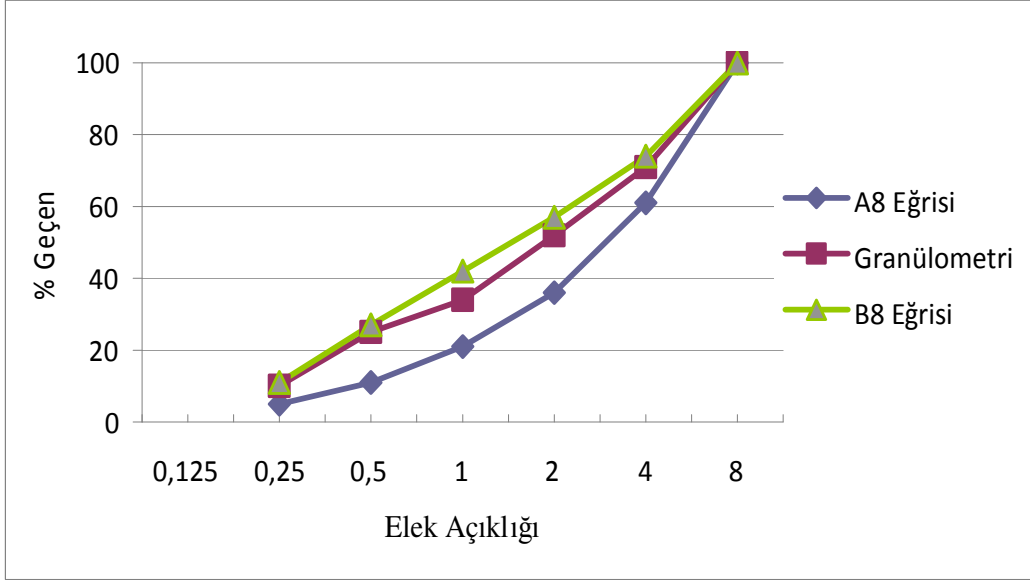
Tablo 12. 2 mm – 0,125 mm elek analizi sonucu

Elek No	Elekte Kalan (g)	Kümülatif Kalan (g)	Geçen (g)	Elekten Geçen (%)
2mm	0	0	7000	100
1mm	2275	2275	4725	67,5
0,5mm	1225	3500	3500	50
0,25 mm	2048	5548	1452	20
0,125 mm	889	6437	563	8
Elek altı	563	7000	0	0

8-2 mm arası malzemedan %50 ve 2-0.125 mm arası malzemedan %50 alınmış aşağıda çizelge halinde verilen agreg a karışımı elde edilmiştir.

Tablo 13. %50 8-2 mm, % 50 2 -0,125 mm granülometrik bileşimi

Elek Açıklığı (mm)	8-2 mm Elek % Geçen	2-0,125 mm Elek % Geçen	%50 8-2 mm Elek %50 2-0,125mm Elek
8	100	100	100
4	41	100	71
2	4	100	52
1	0	68	34
0,5	0	50	25
0,25	0	20	10
0,125	0	8	4



Şekil 13. %50 8-2 mm, % 50 2-0,125 mm alınan agreganın granülometrik eğrisi

Kuvars agregası, Pomza Export Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından edilmiş olup en büyük tane büyüklüğü 0.6 mm olan bir agregadır.

2.3.2. Tasarımların Karışım Oranları

Deneyisel çalışmada toplam 8 farklı tasarım yapılmıştır. Tasarımların ilk üçü diyorit agregası ile diğerleri ise kuvars agregası kullanılarak yapılmıştır.

Tablo 14. Tasarımlara ilişkin karışım oranları, s/ç oranları ve yayılma değerleri

	Tasarım 1		Tasarım 2		Tasarım 3		Tasarım 4	
Malzeme	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³
Çimento	900	287,5	900	287,5	900	287,5	960	309,6
Silis Dumanı	225	100,9	225	100,9	225	100,9	240	109
Agrega (diyorit)	1123	403,9	878,20	315,9	725,302	260,9	-----	-----
Agrega (kuvars)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	915,7	333,1
Su	162	162	270	270	305	305	220,8	220,8
Katkı	18	15,7	27	25,7	27	25,7	28,8	27,4
Lif	235,5	30	-----	-----	157	20	-----	-----
Toplam	2663,5	1000	2300,2	1000	2339,3	1000	2365,3	1000
İlave Su	325g		120g		---		---	
S/Ç	0,54		0,43		0,33		0,23	
Yayılma (cm)	18,5		16		13		14	
	Tasarım 5		Tasarım 6		Tasarım 7		Tasarım 8	
Malzeme	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³	kg	dm ³
Çimento	960	309,6	930	300	900	290,3	960	309,7
Silis Dumanı	240	109	232,5	105,6	225	102,3	240	109
Agrega (diyorit)	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Agrega (kuvars)	915,7	333,1	998,7	363,2	1030	374,5	915,8	333
Su	220,8	220,8	204,6	204,6	207	207	220,8	220,8
Katkı	28,8	27,4	27,9	26,5	27	25,7	28,8	27,4
Toplam	2365,3	1000	2393,7	1000	2389	1000	2365,4	1000
Lif	236	30	----	----	----	----	314	40
İlave Su	----		---		---		---	
S/Ç	0,23		0,22		0,23		0,23	
Yayılma (cm)	13		12,5		14		13	

2.3.3. Karıştırma İşlemi

İlk iki tasarımda karıştırma el ile yapılmıştır. Önce çimento, silis dumanı, agrega ve çelik lifler 5 dakika süreyle el ile karıştırılmıştır. Ardından suyun ve akışkanlaştırıcının yarısı karışıma ilave edilerek karıştırılmıştır. Bu şekilde 3-4 dakika daha karıştırılmış ve ardından tüm su ve akışkanlaştırıcı dökülerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Karışıma azar azar su ilave ederek betonun istenilen kıvama ulaşılması sağlanmıştır. 1. Tasarıma

325g 2. Tasarıma ise 120 g su ilave edilmiştir. Bu işlem ilk iki tasarımın s/ç oranının yüksek olmasına neden olmuştur.

S/Ç oranlarının yüksek olması bu tasarımların basınç ve çekme dayanımlarının düşük olmasına neden olmuştur.

Diğer tasarımlar Besmak marka 2,0 lt kapasiteli elektronik karıştırıcı ile yapılmıştır.



Şekil 14. Karıştırıcı (Mikser)

RPB elde etmedeki en önemli faktörlerden biri betonu karıştırma şekli ve zamanı olduğu hazırlamış olduğumuz tasarımlarda görülmüştür. Önce karıştırıcının kabına çimento, silis dumanı ve agregayı koyup karıştırıcıyı 5-6 dakika yavaş olarak (95 rpm) karıştırılmıştır. Ardından suyun yarısını katıp yine 5-6 dakika orta hızda (120 rpm) karıştırılmıştır. Daha sonra tüm suyu ve katkıyı karışıma ilave edilmiş, yaklaşık 10 dakika hızlı bir şekilde (175 rpm) karıştırılmış ve karışımın su istemeden yavaş yavaş kıvama gelmesi izlenmiştir. Bu şekilde karışımı yapılan tasarımların s/ç oranı çok daha düşük olmuştur. Bunun doğal sonucu olarak da basınç ve çekme dayanımı artmıştır.

2.3.4. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deneyleri ELE marka yayılma tablası aparatı ile yapılmıştır.



Şekil 15. Yayılma tablası deney aparatı

Karıştırma kabından tepsiye alınan harç, yayılma tablası üzerindeki kalıba yarısı dolacak şekilde yerleştirilmiş tokmak ile 25 kez vurulduktan sonra, kalıbın diğer kısmı doldurularak, tekrar 25 vuruş daha uygulanmıştır. Kalıbın üst yüzeyi mala ile temizlenip düzeltildikten sonra, kalıp çekilerek alınmış deney aletinin kolu 15sn’de 5 kez çevrilerek, yayılan örneğin çapı 2 farklı ekseninde kumpas yardımı ile ölçülmüş ve okunan değerlerin ortalaması kaydedilmiştir. Tablo 14’de tüm numunelerin yayılmaları verilmiştir.



Şekil 16. Yayılma tablası deneyi

2.3.5. Yerleştirme İşlemi

Tasarımlar 4x4x16 cm prizmatik kalıplara şişleme ve sarsma yöntemleri ile yerleştirilmiştir. Tasarımlarda minimum boşluk oranı elde edebilmek için öncelikle

kalıplara karışımın yarısı dökülmüş, kalıplar şişlenmiş ve 4-5 sn sarsılmıştır ardından kalıplar tam doldurulup tekrar şişlenmiş ve 4-5 sn sarsılmıştır.



Şekil 17. Deneylerde kullanılan sarsma tablası

Bu şekilde yerleştirilen numunelerin yüzeyi mala ile düzleştirilerek priz alma üzere 24 saat bekletilmiştir. Ardından kalıptan çıkarılıp otoklav deneyine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 18. Üçlü prizmatik kalıpların doldurulmuş hali

2.3.6. Otoklav (Yüksek Basınç Altında Buhar Kürü) Deneyi

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 aralığında olup örneklere 20 atm basınç uygulanmıştır.

Çalışmamızda Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Malzemesi laboratuvarında bulunan otoklav aparatı kullanılmıştır. Wykeham Farrance marka 1976 yılında imal edilmiş olan aparat maksimum 4 MPa basınca kadar güven ile çalışmaktadır. Aparatın sıcaklık değeri manuel olarak ayarlanmaktadır.



Şekil 19. Deneylerde kullanılan otoklav aparatı

Bu çalışmada kullanılan otoklav aparatı çalışmaya başladıktan 1 saat sonra 1 MPa basınç (10 atm), 2 saat sonra ise 2 MPa basınç (20 atm) değerine ulaşmaktadır. Örnekler otoklavda 1-2 MPa basınç altında dengeye geldikten sonra, belirlenen süre kadar sabit basınç altında tutulmuştur. Otoklavın içi 2,5 lt su almaktadır. Otoklava damıtılmış su doldurulmuş ve ardından numuneler numune rafına yerleştirilmiştir.

Sistemin ısınması gibi soğuması da 1,5–2 saat sürmektedir. Otoklav içindeki basınç güvenilir bir değere düştükten sonra kapaktaki vana yavaşça açılarak otoklav içindeki

buhar dışarı çıkarılmış, ardından kapak açılıp örnekler dışarıya çıkarılıp soğumaya bırakılmıştır. Normal laboratuvar koşullarında soğutulmaya bırakılan numuneler 24 saat sonra basınç ve çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Tasarımların otoklav kürü basınç ve süreleri Tablo 15’de gösterilmiştir.

Tablo 15. Tasarımlara Otoklav kürü basınç ve süreleri

Tasarımlar	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
Basınç (MPa)	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2	2
Süre(saat)	1	1	1	3	3	3	2,5	1,5

T: Tasarımı göstermektedir

2.3.7. Basınç ve Çekme Deneyleri

Tasarımlara ilişkin eğilmede çekme deneyleri BESMAK marka 20 ton kapasiteli pres kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 20. Eğilmede çekme deneyleri için kullanılan pres

Tasarımlara ait basınç dayanımları için Dinç Makine tarafından imal edilmiş 60 ton kapasiteli pres kullanılmıştır.



Şekil 21. Basınç deneylerinde kullanılan pres



Şekil 22. Tasarımın basınç deneyine tabi tutulması

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Beton Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

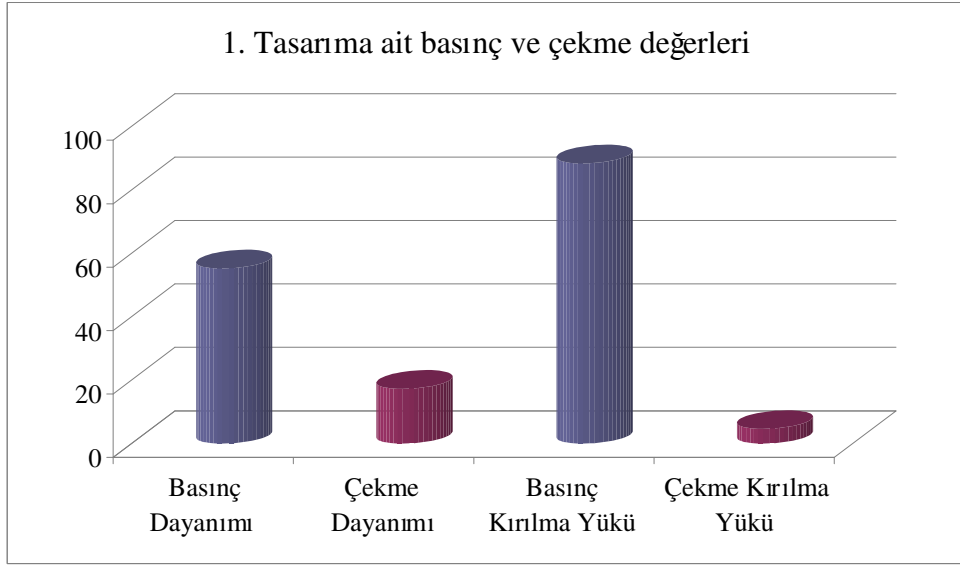
Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 14’de gösterilmiştir. Sonuçlarda kuvars agregası ile yapılan tasarımların basınç dayanımları diyorit agregası ile yapılan tasarımların basınç dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Çelik lif ilave edilerek hazırlanan diyorit agregalı tasarımların çekme dayanımları, kuvars agregası kullanılarak hazırlanan tasarımların çelik ilavesiz olanlarından daha yüksek, çelik ilaveli olanlarından ise daha düşük çıkmıştır. Karıştırıcı yardımı ile hazırlanan tasarımların su/çimento oranı el ile karıştırılan tasarımlara nazaran daha düşük seviyelere indirgenebildiğinden, karıştırıcı yardımı ile çok daha yüksek dayanımlar elde edilmiştir.

Diyorit agregası ilave edilen tasarımlarda max. tane çapı 8,00 mm olduğundan basınç dayanımları düşük çıkmıştır. Kuvars agregasının max. tane çapı 0,60 mm olduğundan kuvars ilave edilerek hazırlanan tasarımlar daha az boşluklu olmuş ve dayanımları daha yüksek çıkmıştır.

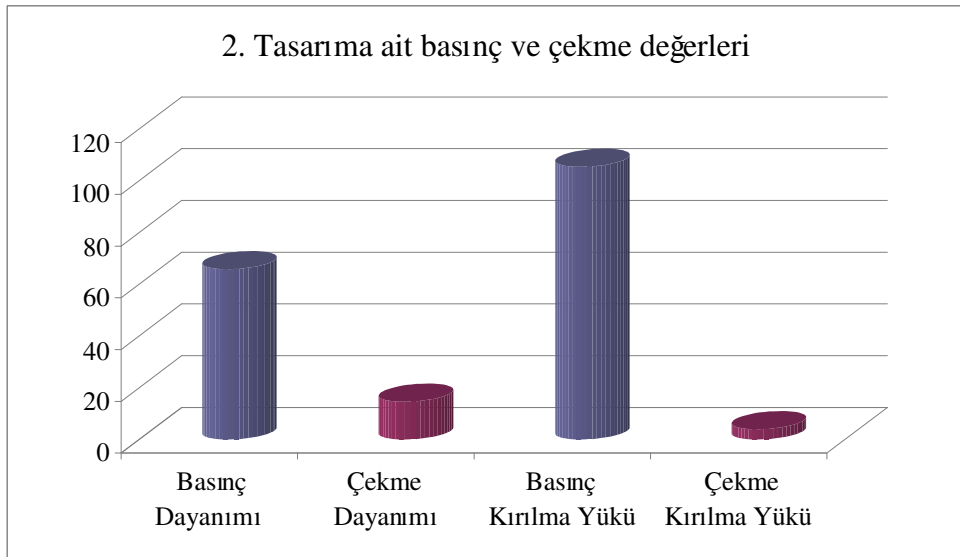
Kuvars agregası ile yapılan deneylerde deney sonuçlarından yola çıkarak; çimento oranını azaltıp agrega oranını artırdıkça basınç dayanımının arttığı söylenebilir. Çelik lif ilave edilerek yapılan tasarımların basınç ve çekme dayanımı değerleri daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 16. Tasarımların basınç ve çekme dayanım değerleri

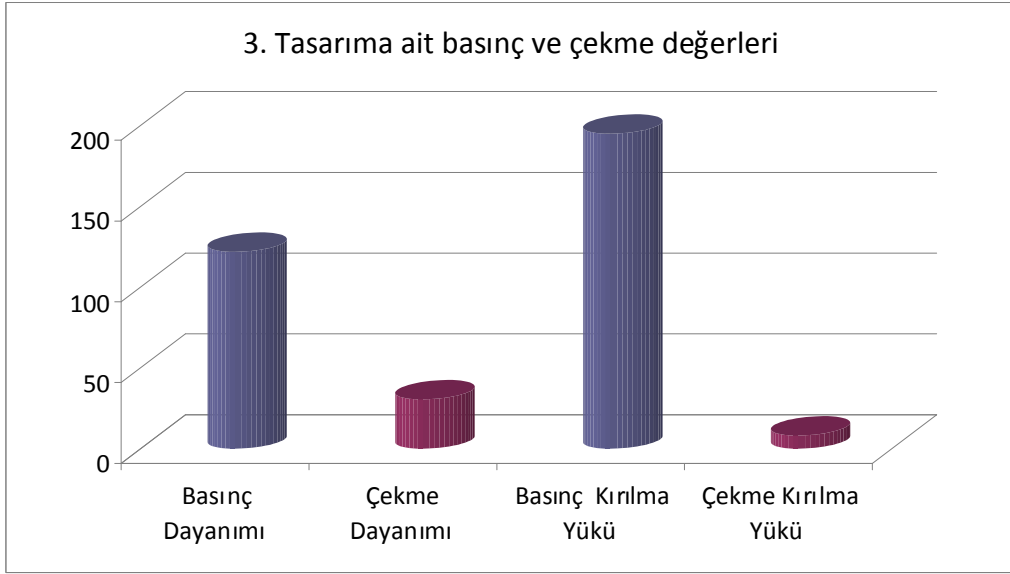
Tasarım 1 (%3 Lifli)	1 saat 1,5MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	17,25	4,63
Ortalama Basınç	55,187	88,29
Tasarım 2	1 saat 1,5MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	14,6	3,92
Ortalama Basınç	65,8	105,28
Tasarım 3(%3 Lifli)	1 saat 1,5MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	30,5	8,2
Ortalama Basınç	121,84	194,99
Tasarım 4	3 saat 2MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	13,75	3,7
Ortalama Basınç	156,5	250,4
Tasarım 5(%3 Lifli)	3 saat 2MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	26,75	7,17
Ortalama Basınç	199,19	318,7
Tasarım 6	3 saat 2MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	21,250	5,70
Ortalama Basınç	151,59	242,54
Tasarım 7	2,5 saat 2MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	16,50	4,43
Ortalama Basınç	168,66	269,85
Tasarım 8 (%4 Lifli)	1,5 saat 2MPa Otoklav kürü	
	Dayanım (MPa)	Maks. Yük (kN)
Ortalama Çekme	30,25	12,96
Ortalama Basınç	212,18	339,49



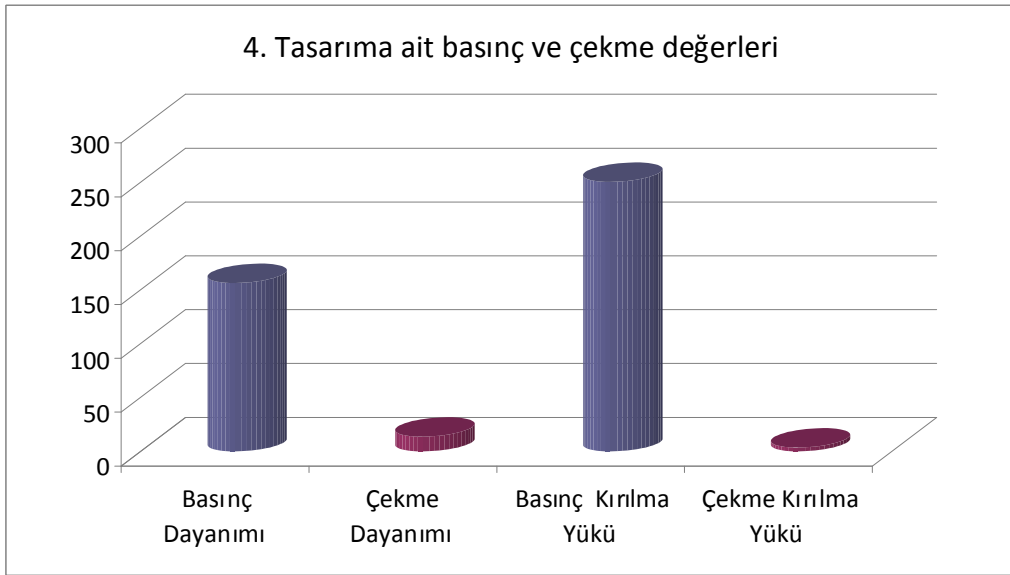
Şekil 23. 1. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



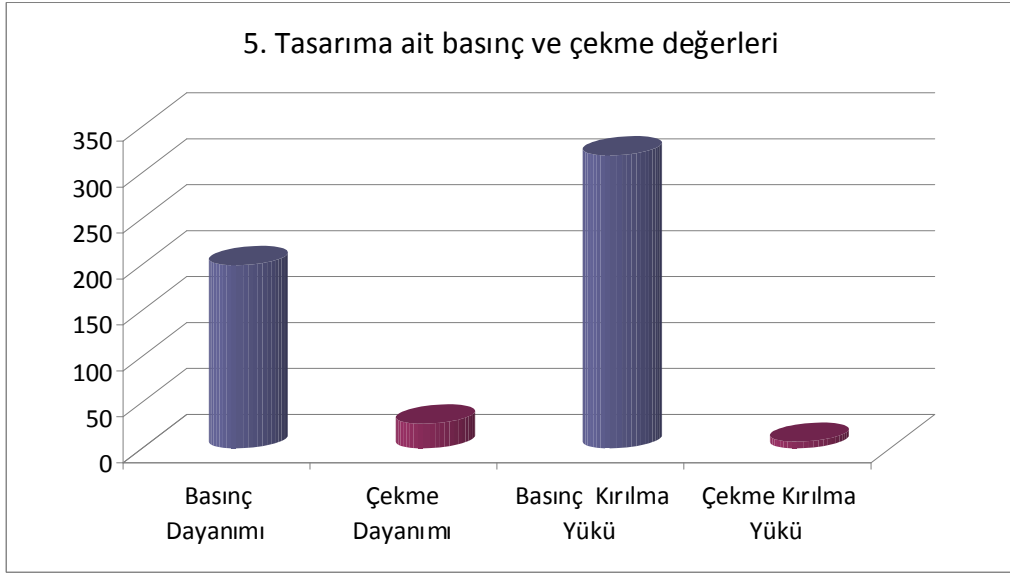
Şekil 24. 2. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



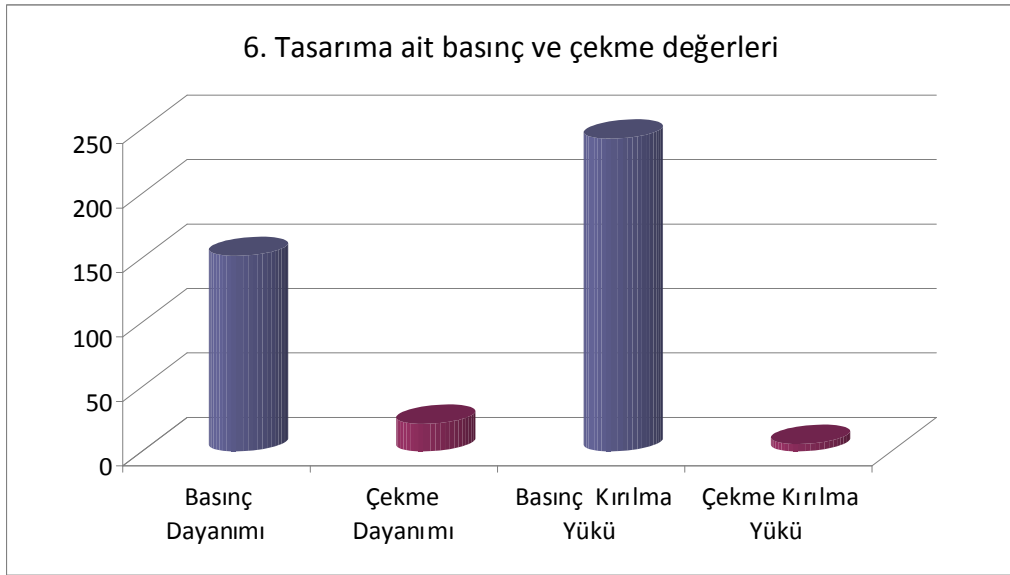
Şekil 25. 3. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



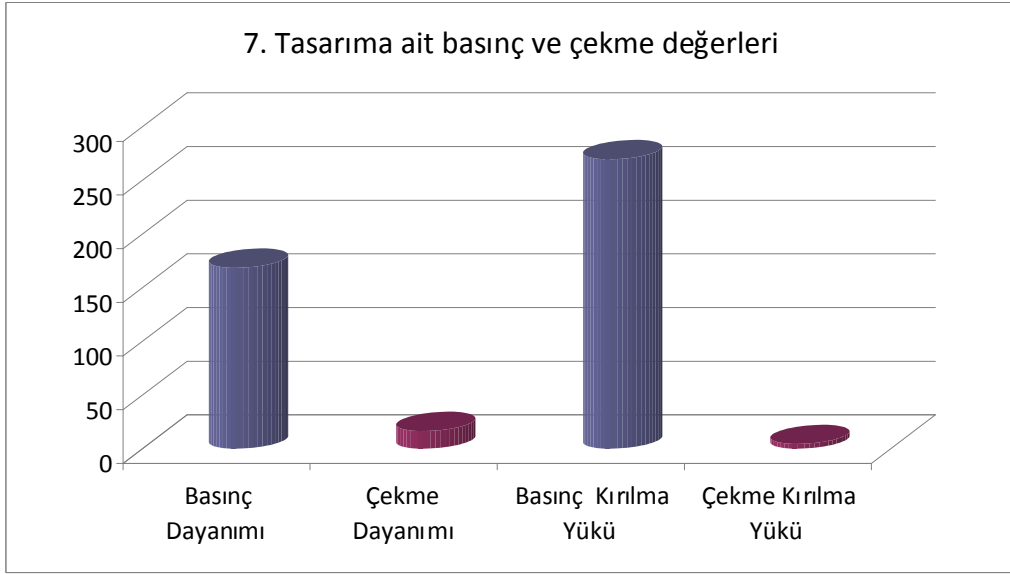
Şekil 26. 4. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



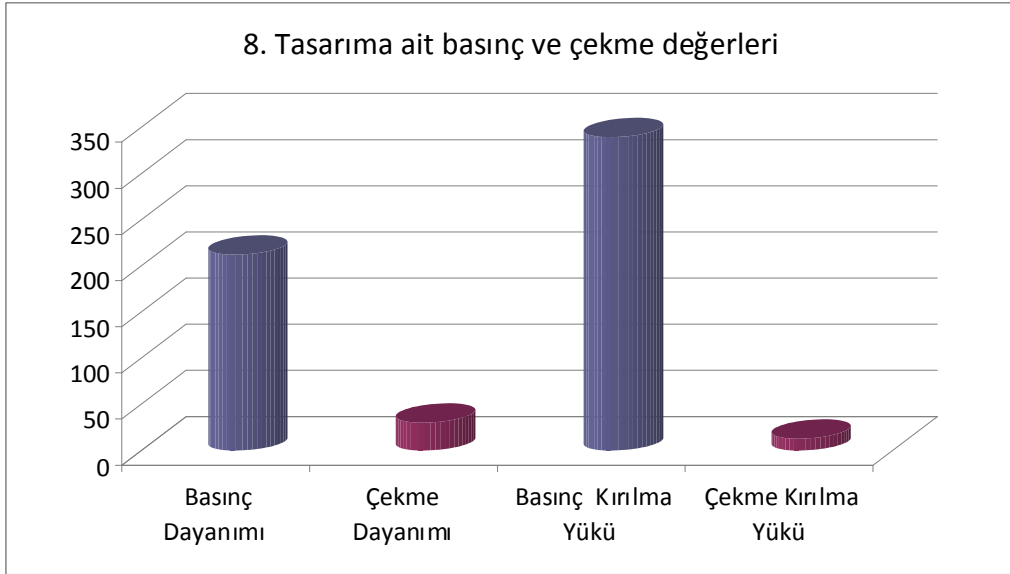
Şekil 27. 5. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



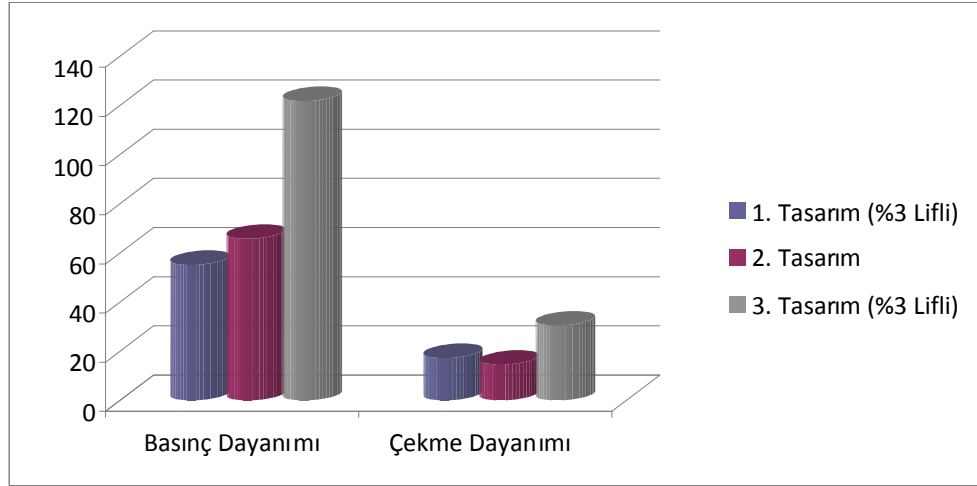
Şekil 28. 6. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



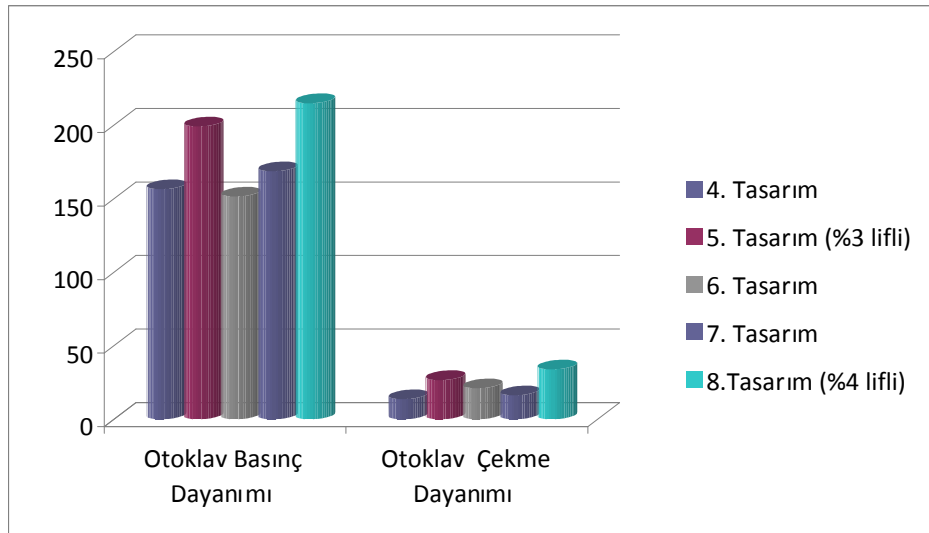
Şekil 29. 7. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



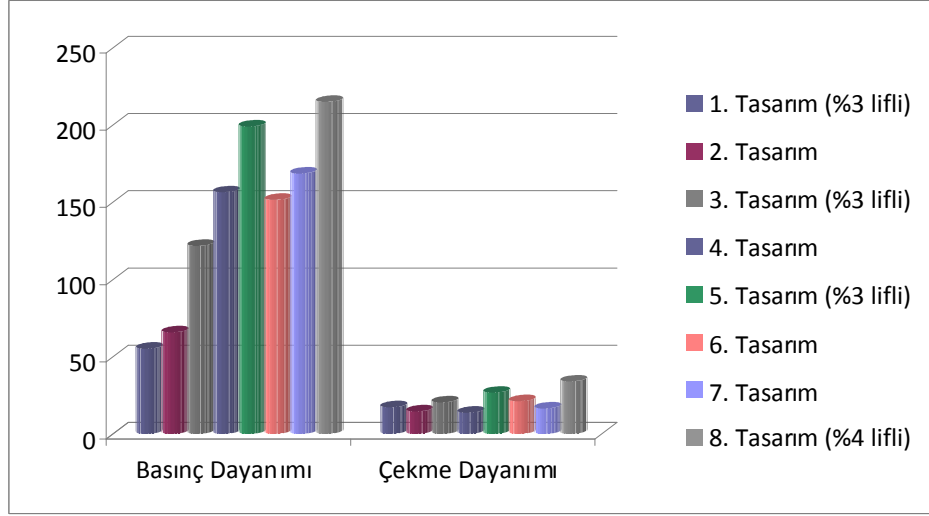
Şekil 30. 8. Tasarıma ait basınç ve çekme değerleri



Şekil 31. Diyorit agregası ile üretilen numunelerin çekme ve basınç dayanımları



Şekil 32. Kuvars agregası ile üretilen numunelerin çekme ve basınç dayanımları



Şekil 33. Tüm numunelere ilişkin çekme ve basınç dayanımları

Şekil 33’de görüldüğü üzere ilk 2 tasarımın dayanımı el ile karıştırıldıkları için istenilen kıvam elde edilebilmesi için öngörülenden fazla su ilave edildiğinden s/ç oranları yüksek olmuş ve diğer tasarımlara göre dayanımı düşük çıkmıştır.

1. Tasarımın basınç dayanımı diğer tasarımlara göre çok düşük olmasına rağmen içine %3 oranında çelik lif ilave edildiğinden çekme dayanımı çelik lif ilavesiz tasarım 2, tasarım 4 ve tasarım 7’den daha yüksek çıkmıştır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

RPB üretebilmek için öncelikle s/ç oranını minimum düzeyde tutmak gerekir. Bunun için beton içindeki boşluk oranı çok az olmalıdır.

S/Ç oranı eşit ya da birbirine yakın olan tasarımlar karşılaştırıldığında içerisinde çelik lif olan tasarımlar her seferinde daha yüksek basınç ve çekme dayanımına ulaşmıştır.

RPB üretebilmek için tasarıma en az % 3-4 oranında çelik lif ilave edilmelidir.

Çelik lifler betonun çekme dayanımını basınç dayanımını artırdığından daha fazla oranda artırmıştır.

Süper akışkanlaştırıcı ilavesi betonun s/ç oranının düşmesine yardımcı olmuştur ancak %3'ten fazla oranlarda kullanıldığında betonun priz alma süresini çok geciktirmiştir ve kısa zamanda yüksek dayanım elde edilmesine engel olmuştur.

RPB üretmede en önemli faktörlerden biri betonun karıştırma süresi ve şeklidir. Karıştırıcı yardımı ile hazırlayarak ve en az 20 dakika, azar azar su ilave edilerek ve en sonunda katkı maddesi ilave edilerek karıştırılınca RPB üretilenmiştir. El ile karıştırılarak üretilen karışımın istenen kıvama gelebilmesi için fazla su ya da süper akışkanlaştırıcı kullanılmış ve bu nedenle yüksek dayanım elde edilememiştir. Karıştırıcı yardımı ile üretilen betona daha az akışkanlaştırıcı ve su ilave edilerek istenen kıvama getirilebilmiş ve dayanımı aynı oranda artmıştır. Agrega boyutu küçüldükçe dayanım artmıştır. Çünkü karışımdaki boşluk oranı azalmıştır.

Kuvars agregası ile yapılan deneylerde deney sonuçlarından görüldüğü üzere, çimento oranını azaltıp agrega oranını artırdıkça basınç dayanımı artmıştır.

RPB betonu mutlaka bir karıştırıcı ile karıştırılarak üretilmelidir. El ile karıştırma ile istenen dayanım değerlerine ulaşılması mümkün değildir. Çelik lif kullanmaksızın RPB üretmek mümkün değildir. %3-4 oranında çelik lif kullanarak 2 saat süreli 2 MPa basınç altında otoklav kürü RPB üretimi için yeterlidir.

5. KAYNAKLAR

- Arıoğlu, E., Arıoğlu, N. ve Yılmaz, A.O., 2006. Beton Agregaları, Evrim Yayın Evi, 2. Baskı, 142-145.
- Baradan, B., 2000. Yapı Malzemesi II, Dokuz Eylül Üniversitesi Müh. Fak. Basım Yayın, 6. Baskı, İzmir.
- Duyar, O., 2006. Kendiliğinden Yerleşen Betonlar, Hazır Beton, 13, 25-27.
- Erdoğan, Ş. ve Kurbetci, Ş., 2003. Betonun Performansına Sağladıkları Etkinlik Açısından Kimyasal ve Mineral Katkı Maddeleri, THM - Türkiye Mühendislik Haberleri, 426.
- Feylessoufi, A., 1996. Water Environment and Nanostructural Network in A Reactive Powder Concrete, Cement and Concrete Composites, 18, 23-29.
- Gülşah, A., Beton Çeşitleri ve Özellikleri. <http://www.muhendisevi.com/forum/MsgDetay.asp?Konu=277>, 13 Haziran 2010.
- Hijorth, L., 1983. Development and Application of High Density Cement Based Materials, Phill.Trans.Roy.Soc., A310, 167-173, London.
- Karabulut, A. Ş., 2006. Reaktif Pudra Betonunun (RPB) Özelliklerinin Mineral Katkılarla Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Long, G., Wang X. ve Xie, Y., 2002. Very High Performance Concrete with Ultrafine Powders, Cement and Concrete Research, 32, 601-605.
- Matte, V. ve Moranville, M., 1999. Durability of Reactive Powder Composites Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water / Binder Pastes, Cement and Concrete Composites, 21, 1-9.
- Mehta, P.K. ve Monterio, P.J.M., 1997. Concrete Mikrostructure, Properties and Materials, Indian Concrete Institute, India.
- Mindess, S., Young, J.F. ve Darwin, D., 1991. Concrete, Prentice Hall.
- Mobasher, B. ve Yuli, C., 1996. Mechanical Properties of Hybrid Cement-Based Composite, ACI Materials Journal, 93, 3, 284-292.
- Naaman, A.E. ve Homrich, J.R., 1989. Tensile Stress-Strain Properties of SIFCON, ACI Materials Journal, 86, 3, 244-251.

- Ramyar, K., 2004. Dimensional Stability of Concrete Yüksek Lisans Dersi Ders Notları, Ege Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Malzeme Anabilim Dalı, İzmir.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M., 1995. Composition of Reactive Powder Concretes, Cement and Concrete Research, 25, 17.
- Taşdemir, M.A., Oktar O.N. ve Atahan, H.N., 2003. Yüksek Dayanımlı Betonlarda Çimento Hamurunun Boşluk Yapısının Beton Özelliklerine Etkisi, İTÜ Dergisi, 2, 23-24.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F., 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, İTÜ Dergisi, 1,125-144.
- Taşdemir, M.A., Oktar, O.N. ve Moral, H.,1996. Sensivity of Concrete Properties to the Pore Structural of Hardened Cement Paste, Cement and Concrete Research, 26, 11, 1619-1627.
- Telford T., 1988. Condensed Silika Fume in Concrete, FIP State of Art Report, 37.
- Topçu İ.B. ve Karakurt C. 2005. Reaktif Pudra Betonları, THM- Türkiye Mühendislik Haberleri, 437, 3.
- URL-1, <http://www.kimyaturk.net/index.php?topic=6502.0>, Agregalar, 17.06.2010.
- 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,496-505, Chicago.
- Walraven,J., 1999. The Evolution of Concrete, Structural Concrete, Pl, 3-11.
- Yang, Q., Zhang, S., Huang, S. ve He,Y., 2000. Effect of Ground Quartz Sand on Properties of High Strenght Concrete in the Steam-Autoclaved Curing, Cement and Concrete Research, 1993-1998.

ÖZGEÇMİŞ

1 Mart 1985 tarihinde Trabzon’da doğdu. İlk Okulu Akçaabat Merkez İlkokulu’nda tamamladıktan sonra Anadolu Lisesi Sınavını Kazanarak Orta Öğrenimine Akçaabat Anadolu Lisesinde devam etti. Liseyi de Akçaabat Anadolu Lisesinde okudu. 2003 Yılında Liseden mezun oldu ve aynı yıl KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. Buradan 2007 yılında Bölüm İkincisi olarak mezun oldu. 2007 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Anabilim Dalında Yüksek Lisans yapmaya başladı. 2008 yılında yapılan KPSS sınavını kazanarak Giresun Gençlik ve Spor İl Müdürlüğü’ne İnşaat Mühendisi olarak atandı. İyi derecede İngilizce bilmektedir.