

**POLİPROPİLEN LİFLİ, HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILI VE
YÖRESEL HAFİF AGREGALARLA ÜRETİLEN YÜKSEK
DAYANIMLI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIKLAR
ALTINDA BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Serbülent YAŞAR

**Y. Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN
2008
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**POLİPROPİLEN LİFLİ, HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILI VE
YÖRESEL HAFİF AGREGALARLA ÜRETİLEN YÜKSEK
DAYANIMLI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIKLAR
ALTINDA BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Serbülent YAŞAR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2008**

Her hakkı saklıdır

Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN danışmanlığında, Serbülent YAŞAR tarafından hazırlanan bu çalışma 27/11/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Rüstem GÜL

İmza : 

Üye : Doç. Dr. Mehmet GAVGALI

İmza : 

Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İmza : 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ömer AKBULUT
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

POLİPROPİLEN LİFLİ, HAVA SÜRÜKLEYİCİ KATKILI VE YÖRESEL HAFİF AGREGALARLA ÜRETİLEN YÜKSEK DAYANIMLI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIKLAR ALTINDA BAZI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Serbülent YAŞAR

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN

İnce agregası (0-2 mm) yerine ağırlıkça %25, %50, %75 ve %100 oranlarında genişlemiş perlit agregası (GPA) ve pomza agregası (PA), beton hacminin %0,15, %0,25, %0,35 ve %0,50 oranlarında polipropilen lif (PPF) ve hacimce %4, %6 hava sürüklenmiş beton (HSB) ile toplam olarak 16 grup betonun yüksek sıcaklık (100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C) öncesi ve sonrası, basınç dayanımı, birim ağırlık ve kılcal geçirimsizlik özellikleri incelenerek analiz edilmiştir. Beton numunelerde çimento dozajı 500 kg/m³ olarak alınmış ve bütün numunelerde çimento yerine ağırlıkça %7 silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Tüm beton numuneleri üretildikten sonra 1 gün nemli ortamda bekletilmiş ve daha sonra 27 gün boyunca 23±1°C kirece doymun suda kür edilmiştir. Numuneler, 28 günlük kür sonunda 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C gibi 7 farklı sıcaklıkta üç saat bekletilmiş ve daha sonra laboratuvar ortamında kendi kendine soğumaları sağlanmıştır. Yalnızca kontrol numuneleri yüksek sıcaklık sonrasında havada ve suda olmak üzere iki farklı soğuma şekline maruz bırakılmıştır. Kontrol grubu dışındaki bütün örnekler havada soğutulmuştur. Karışımlarda ince agregası yerine %25, %50, %75 ve %100 PA ve GPA kullanıldığında basınç dayanımları, kuru birim ağırlık değerleri hem yüksek sıcaklık öncesi ve hem de sonrasında azalmıştır. Ancak basınç dayanımlarındaki azalmaların PA, EPA, PPF ve hava boşluklu numunelerde kontrol numunelerine oranla bütün sıcaklıklarda daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Kontrol numuneleriyle diğer numuneler arasındaki farkın 300°C sıcaklıktan sonra sıcaklığın artmasıyla azaldığı belirlenmiştir ve 600°C'den sonra kontrol numuneleriyle diğer numuneler arasında belirgin bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Artan sıcaklıklarla birlikte kuru birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiştir. Numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısı maruz kalınan sıcaklık paralelinde artmıştır. Hava sürükleyici katkı, betonun kılcal geçirimsizliğine bütün sıcaklık seviyelerinde olumlu etkide bulunmuştur. PPF'li gruplarda ise dalgalı bir seyir göstermiştir.

2008, 154 sayfa

Anahtar Kelimeler: Pomza agregası, genişletilmiş perlit agregası, polipropilen lif, hava sürükleyici katkı, yüksek sıcaklık, dayanım, kılcal geçirimsizlik katsayısı.

ABSTRACT

Master Thesis

THE INVESTIGATION OF SOME PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH CONCRETE PRODUCED WITH POLYPROPYLENE FIBER, AIR ENTRAINING AGENT AND REGIONAL LIGHTWEIGHT AGGREGATES AT ELEVATED TEMPERATURES

Serbülent YAŞAR

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ibrahim TÜRKMEN

Totally 16 groups of concrete produced by replacing expanded perlite aggregate (EPA), pumice aggregate (PA) with fine aggregate (0-2 mm) with the ratios of 25%, 50%, 75% and 100% in weight, by using polypropylene fiber (PPF) with the ratios of 0,15%, 0,25%, 0,35%, and 0,50% of concrete and by adding air entraining agent (AE) with the ratios of 4% and 6% in volume, were analyzed before and after high temperature effects (100, 200, 300, 400, 500, 600 and 700°C) by examining compressive strength, dry unit weight and capillary permeability properties. Dosage was chosen as 500 kg/m³ and silica fume (SF) was used with the ratio of 7% instead of cement in all concrete mix groups. All of the concrete specimens were kept in humid environmental conditions, and then cured in lime saturated water 23±1°C for 27 days. After curing, specimens were kept at 7 different temperatures as 100, 200, 300, 400, 500, 600 and 700°C for three hours, and then cooled to room temperature in laboratory conditions. Only control group specimens were exposed two different cooling regimes, in air and in water. Except control group all specimens are cooled in air. Compressive strength and dry unit weight values are decreased in specimens, which EPA and PA replaced with fine aggregate with the ratios of 25%, 50%, 75% and 100%, both before and after high temperature effects. But the reductions in compressive strength were determined less at all temperatures according to control specimens. It was determined that, the difference between control specimens and other groups decrease with the increase of heat and it was observed that there was not a pronounced difference between control specimens and other groups after 600°C. With the increasing of the temperatures dry unit weights decreased. The maximum reductions due to the PA and EPA were at 100% of their replacement of sand. The capillarity coefficient of samples increased with the increasing of the exposed temperature. AE improved the capillarity coefficient of samples at all level of high temperature. Capillarity coefficient of samples due to the PPF was fluctuated.

2008, 154 pages

Keywords: Pumice aggregate, expanded perlite aggregate, polypropylene fiber, air entraining agent, high temperatures, strength, capillary coefficient.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma süresince her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danıŐmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim TÜRKMEN'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

ÇalıŐmam esnasında her türlü desteğini ve ilgisini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya, Sayın AraŐ. Gör. Dr. Ferhat BİNGÖL'e, Sayın AraŐ. Gör. M. Burhan KARAKOÇ'a, ve çalışma arkadaşlarım Sayın İnŐ. Yük. Müh. Rıza POLAT ve Sayın İnŐ. Müh. Yavuz YEGİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca İnşaat Mühendisliği'nde görev yapmakta olan ve her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen Sayın Öğretim Üyelerine, Araştırma Görevlisi arkadaşlara,

Sevgili eşime, kızıma ve her zaman yanımda olan aileme,

ve ayrıca ekibinde bulunduğum 106M230 ve 106M014 numaralı projelere vermiŐ olduğu her türlü maddi ve manevi destek için TÜBİTAK'a,

Çok teşekkür ederim.

Serbülent YAŞAR

Kasım 2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar.....	9
2.1.1. Yüksek dayanımlı betonların sınıflandırılması.....	10
2.2. Yüksek Dayanımlı Betonların Yangın Dayanıklılığını Etkileyen Faktörler.....	11
2.2.1. Beton katkı tipi.....	11
2.2.1.a. Fiber katkıları.....	11
2.2.1.b. Cam fiberler.....	12
2.2.1.c. Mineral katkıları.....	13
2.2.1.d. Kimyasal katkıları.....	16
2.2.1.e. Beton katkı oranı.....	18
2.2.2. Yüksek sıcaklık derecesi ve süresi.....	25
2.2.3. Soğutma şekli.....	30
2.2.4. Agregası tipi.....	40
2.2.4.a. Kalkerli ve silisli agregalar.....	40
2.2.4.b. Hafif agregalar.....	43
2.2.5. Betondaki nem içeriği.....	48
2.2.6. Bağlayıcı tipi.....	50
2.2.7. Koruyucu örtü.....	54
2.2.8. Isı geçişi ve transferi.....	56
2.3. Betonun Boşluklu Yapısı ve Geçirimsizliği.....	57
2.3.1. Betonun boşluklu yapısı.....	59
2.3.2. Betonun kılcal geçirimsizliği.....	63

2.3.2.a. Agreganın kılcal geçirimsizliğe etkisi	67
2.3.2.b. Çimentonun kılcal geçirimsizliğe etkisi	70
2.3.2.c. Katkı maddelerinin kılcal geçirimsizliğe etkisi	75
3. MATERYAL ve YÖNTEM	77
3.1. Deney Programının Tanıtımı.....	77
3.2. Materyal.....	78
3.2.1. Deneyde kullanılan malzemeler	78
3.2.2. Deneyde kullanılan aletler	87
3.3. Yöntem	88
3.3.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler.....	88
3.3.2. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi.....	90
3.3.3. Karışım oranlarının belirlenmesi.....	92
3.3.4. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kürü	101
3.3.5. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	101
3.3.6. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler	102
3.3.6.a. Birim ağırlık	102
3.3.6.b. Basınç dayanımı	103
3.3.6.c. Kılcal geçirimsizlik deneyi	104
3.3.7. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem.....	105
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	106
4.1. Agregalar ile İlgili Bulgular ve Tartışma	106
4.2. Taze Beton ile İlgili Bulgular ve Tartışma.....	110
4.3. Sertleşmiş Beton ile İlgili Bulgular ve Tartışma	115
4.3.1. Birim ağırlık ile ilgili bulgular	115
4.3.2. Basınç dayanımı ile ilgili bulgular	118
4.3.2.a. Soğutma şeklinin basınç dayanımına etkisi.....	119
4.3.2.b. Pomza agregası oranının basınç dayanımına etkisi.....	122
4.3.2.c. Genleştirilmiş perlit agregası oranının basınç dayanımına etkisi.....	125
4.3.2.d. Polipropilen lif oranının basınç dayanımına etkisi.....	127
4.3.2.e. Hava sürükleyici katkı oranının basınç dayanımına etkisi	130
4.3.3. Kılcal geçirimsizlik katsayısı ile ilgili bulgular.....	132
4.3.3.a. Pomza agregası oranının kılcal geçirimsizlik katsayısına etkisi.....	132

4.3.3.b. Genleştirilmiş perlit agregası oranının kılcal geğirimsilik katsayısına etkisi	137
4.3.3.c. Polipropilen lif oranının kılcal geğirimsilik katsayısına etkisi.....	140
4.3.3.d. Hava s¼r¼kleyici katkı oranının kılcal geğirimsilik katsayısına etkisi	143
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	146
KAYNAKLAR	149
ÖZGEÇMİŞ	155

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Λ	Isı iletkenliği
Δ	Kuru birim ağırlık
n	Betonun birim ağırlığı
μ	Poisson oranı

Kısaltmalar

C–S–H	Kalsiyum silika hidrate
GPA	Genleştirilmiş perlit agregası
HSB	Hava sűrűklenmiř beton
HSK	Hava sűrűkleyici katkı
PA	Pomza agregası
PPF	Polipropilen lif
SAK	Sűper akıřkanlařtırıcı
SD	Silis dumanı
YFC	Yűksek fırın cűrufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Hidrate olmuş silika dumanlı çimento hamuru	14
Şekil 2.2.	Yüksek performanslı betonun sıcaklığa bağlı olarak eğilme dayanımında meydana gelen değişim	17
Şekil 2.3.	Yüksek performanslı betonun sıcaklığa bağlı olarak basınç dayanımında meydana gelen değişim	17
Şekil 2.4.	PP fiber içeriklerine bağlı olarak basınç dayanımı oranları	18
Şekil 2.5.	PP fiber içeriğine bağlı olarak basınç dayanımları.....	19
Şekil 2.6.	PTM testleri: Çeşitli fiber dozajları için meydana gelen nispi kütle kayıpları.....	20
Şekil 2.7.	Çeşitli fiber dozajları için zaman-kütle kaybı oranı ilişkisi	21
Şekil 2.8.	Fiber dozajı-maksimum basınçlar	22
Şekil 2.9.	Maksimum basınç altındaki sıcaklık-fiber dozajı	22
Şekil 2.10.	Maksimum basınç değişimi-fiber dozajı	23
Şekil 2.11.	Su porozitesi-ısı işlem ve fiber dozajı.....	23
Şekil 2.12.	Özgül geçirimsizlik-sıcaklık ve fiber dozajı.....	24
Şekil 2.13.	800°C'lik sıcaklıktan önce ve sonraki 90 günlük basınç dayanımları.....	29
Şekil 2.14.	1100°C'lik sıcaklıktan önce ve sonraki 90 günlük basınç dayanımları.....	30
Şekil 2.15.	Eğilme dayanımının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	30
Şekil 2.16.	Basınç dayanımının sıcaklığa bağlı olarak değişimi	31
Şekil 2.17.	Yüksek sıcaklıklardan önce ve sonraki kümülatif gözenek hacimleri	33
Şekil 2.18.	Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra farklı soğutma rejimlerine tabi tutulan betonun basınç dayanımı.....	34
Şekil 2.19.	Maruz kalınan maksimum sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan dayanım değişimi	35
Şekil 2.20.	Maruz kalınan maksimum sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan elastisite modülü değişimi.....	36
Şekil 2.21.	800°C'den önce ve sonraki basınç dayanımları	37
Şekil 2.22.	1100°C'den önce ve sonraki basınç dayanımları	37
Şekil 2.23.	800°C'den önce ve sonraki porozite.....	38

Şekil 2.24. 1100°C'den önce ve sonraki porozite.....	39
Şekil 2.25. Kireçtaşı betonunun nispi basınç dayanımı.....	40
Şekil 2.26. Silisli betonun nispi basınç dayanımı.....	41
Şekil 2.27. Bağlayıcı tipinin bir fonksiyonu olarak nispi basınç dayanımları.....	41
Şekil 2.28. Betonun 800°C'ye kadar ısıtılmasının ardından su içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi	49
Şekil 2.29. Tip I çimentolu betona ait deneysel sonuçlar.....	51
Şekil 2.30. (a)-(b) Tip V çimentolu beton ile Tip V+UK betonuna ait deneysel sonuçlar	52
Şekil 2.31. Kılcal yolla su emme.....	66
Şekil 3.1. Agregaların sınıflara ayrılmış şeklindeki görünümü.....	79
Şekil 3.2. Agregaların sınıflara ayrılmış şeklindeki diğer görünümü	80
Şekil 3.3. Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği	104
Şekil 4.1. Doğal agreganın düzeltilmiş granülometri eğrisi	107
Şekil 4.2. Çökme deneyinin yapılışı.....	110
Şekil 4.3. Taze betonda karışım tiplerine göre çökme değerleri	112
Şekil 4.4. Taze betonda karışım tiplerine göre birim ağırlık değerleri.....	112
Şekil 4.5. Yüksek sıcaklıklardan sonra silindir numunelerin toplu görüntüsü.....	113
Şekil 4.6. Numunelerin etüvde kurutulması işlemi	114
Şekil 4.7. Numunelerin ısıtıldığı fırın ve koruma kılıflarının görüntüsü	114
Şekil 4.8. Pomza oranına göre birim ağırlık-sıcaklık değişimleri.....	116
Şekil 4.9. Perlit oranına göre birim ağırlık-sıcaklık değişimleri	117
Şekil 4.10. Polipropilen lif oranına göre birim ağırlık sıcaklık değişimleri.....	117
Şekil 4.11. Hava sürükleyici katkı oranına göre birim ağırlık sıcaklık değişimleri.....	118
Şekil 4.12. Havada ve suda soğutulan beton numunelerinin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	121
Şekil 4.13. Havada ve suda soğutulan örneklerin sıcaklıklara bağlı basınç dayanımlarının değişimi.....	122
Şekil 4.14. Pomza agregası içeren numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	124
Şekil 4.15. Pomza agregası içeren numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi	125

Şekil 4.16. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	126
Şekil4.17. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	127
Şekil4.18. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	128
Şekil 4.19. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	129
Şekil 4.20. Hava sürükleyici katkılı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	131
Şekil 4.21. Hava sürükleyici katkılı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi.....	131
Şekil 4.22. Pomza agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi	135
Şekil 4.23. 200°C ve 700°C sıcaklıklara ısıtılmış numunelerin geçirimsizlik deneyi	135
Şekil 4.24. 600°C sonrası pomzalı numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	136
Şekil 4.25. 700°C sonrası pomzalı numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	136
Şekil 4.26. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi.....	138
Şekil 4.27. 400°C ve 700°C sıcaklıklara ısıtılmış numunelerin geçirimsizlik deneyi	139
Şekil 4.28. 700°C sonrası perlitli numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	140
Şekil 4.29. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi	141
Şekil 4.30. 600°C sonrası lifli numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	142
Şekil 4.31. 700°C sonrası lifli numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	143
Şekil 4.32. Hava sürükleyici katkılı numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi.....	144
Şekil 4.33. 700°C sonrası hava sürükleyici katkılı numunelerdeki çatlakların görüntüsü.....	145

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Beton için dayanım sınıflandırması	10
Çizelge 2.2. Beton dayanımlarının sıcaklıkla değişimi.....	25
Çizelge 2.3. Standart sıcaklık-zaman ilişkisi	26
Çizelge 2.4. Kısa süreli yangın için sıcaklık değerleri.....	27
Çizelge 2.5. Çeşitli sıcaklıklara ve ısıtılma sürelerine maruz bırakılan korunmuş ve korunmamış çakıl betonlarının maksimum mekanik özellikleri.....	28
Çizelge 2.6. Tip I çimentolu betonun deneysel sonuçları	52
Çizelge 2.7. Tip V çimentolu betonun deneysel sonuçları	53
Çizelge 2.8. Tip V çimentosu+UK betonunun deneysel sonuçları.....	54
Çizelge 2.9. Betonarme kirişlerde yangın sürelerine göre beton örtü kalınlıkları	55
Çizelge 2.10.Kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli süre-w/c ilişkisi	60
Çizelge 3.1. Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	80
Çizelge 3.2. Pomza agregasının fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	81
Çizelge 3.3. Pomza agregası kimyasal analiz sonuçları.....	82
Çizelge 3.4. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri	83
Çizelge 3.5. Çimentonun kimyasal özellikleri	83
Çizelge 3.6. Süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri.....	84
Çizelge 3.7. Silis dumanının kimyasal bileşimi	85
Çizelge 3.8. Hava sürükleyici katkının bazı özellikleri	86
Çizelge 3.9. Polipropilen lifin bazı özellikleri	86
Çizelge 3.10.Genleştirilmiş Perlit Agregalı Betonların Karışım Oranları	99
Çizelge 3.11.Pomza Agregalı Betonların Karışım Oranları	99
Çizelge 3.12.Polipropilen Lifli Betonların Karışım Oranları	100
Çizelge 3.13.Hava Sürükleyici Katkılı Betonların Karışım Oranları	100
Çizelge 4.1. Genleştirilmiş perlit agregasının özellikleri.....	107
Çizelge 4.2. İri agrega için ince madde oranı tayini	108
Çizelge 4.3. İnce agrega için ince madde oranı tayini	108
Çizelge 4.4. Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayini.....	109
Çizelge 4.5. Tüm gruplar için çökme ve taze birim ağırlık deney sonuçları	111

Çizelge 4.6. Beton örneklerin birim ağırlıklarının sıcaklıkla değişimi.....	116
Çizelge 4.7. Beton örneklerin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi.....	119
Çizelge 4.8. Beton örneklerin kılcal geçirimsizlik katsayılarının sıcaklıkla değişimi ...	133

1. GİRİŞ

Beton yanıcı niteliği olmayan ve yüksek sıcaklıklara karşı dirençli bir malzeme olarak bilinmektedir. Betonun direnç göstermesinde, içerdiği bileşenlerin bazı özellikleri (termal genleşme katsayısı, ısı iletkenlik vs.) etkin rol oynamaktadır. Betonun içindeki portland çimentosu pastası, farklı tiplerde agregalar ve su, yüksek sıcaklığa maruz kalmalarında tamamıyla farklı davranış gösterirler. Çimento pastası ısıtıldığı zaman öncelikle normal genleşme niteliğinde bir genleşme gösterir; ancak bu arada hidratlar da içerdikleri suyu kaybederek yapıda büzülme meydana gelmesine sebep olurlar. Bu şekilde birbirine zıt etkileşim betonda gerilim meydana getirir. Hidratlardan biri olan kalsiyum hidroksit 400–450°C’de suyunu kaybeder ve kalsiyum oksit oluşur. Kalsiyum oksit ortamın nemi ile tekrar hidrate olur; bu da sertleşmiş çimento pastasında hacim genleşmesi oluşturarak çatlak oluşumuna yol açabilir (Türker vd 2001).

Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, 1940’lardan beri araştırılmaktadır. Bu çalışmalarda, yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento hamuru, harç ve beton numuneleri ile betonarme elemanların davranışı incelenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, yüksek sıcaklık altındaki beton dayanımının belirlenmesi ile ilgili birçok şartnamedeki koşul ve öneriler için temel oluşturmuştur. Çalışmaların çoğu, yüksek sıcaklığa maruz kalan sıradan betonun özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Betonun yangın dayanımı, kullanılan agrega ve çimento tipine, yangın sıcaklığına ve bu sıcaklığa maruz kalma süresine, yapı elemanlarının boyutlarına ve betondaki nem içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Yangını söndürmenin farklı yolları olmasına karşın bu işlem, genellikle su spreyi ile yapılır. Bu ise, yüksek sıcaklıklardaki betonarme elemanlarda farklı gerilmelere yol açar ve yapı elemanı taşıma kapasitesini kaybedebilir (Alpaslan 1994).

Betonun ısınması sürecinde yapı içindeki malzeme özelliklerinde önemli değişimlere sebep olan birbirinden ayrı karmaşık ve birbiriyle etkileşen fiziksel ve kimyasal olaylarla karşılaşılabilir. Yangın veya nükleer kaza gibi çevresel sıcaklığın hızlı ve/veya

uzun süreli bir şekilde arttığı durumlarda meydana gelen bu değişimlerin, beton yapıların taşıma kapasitesi ve diğer önemli servis özelliklerinin azalmasına sebep olduğu genel olarak bilinmektedir. Bazen patlayıcı olabilen termal parçalanma, betona özgü bir olaydır. Bu olay, yıllar boyunca hem deneysel hem de teorik olarak araştırılmış, fakat fiziksel sebepleri halen tam olarak anlayamamıştır. Bunun nedeni, beton elemanların yüksek sıcaklıklar altında test edilmesi sırasında özellikle fiziksel özelliklerin ve diğer parametrelerin (sıcaklık ve basınç alanları, nem içeriği, dayanım özellikleri, gerçek geçirimsizlik vs.) eş zamanlı olarak ölçülmesindeki kendine özgü teknik zorluklardır (Ataman 1991).

Yangın, insanlar için büyük bir risk teşkil ettiği kadar yüksek performanslı betonun patlama mekanizması için de çözülmesi gereken önemli bir problem olarak durmaktadır. Önceki bazı raporlar (Atay 1992; Chan *et al.* 2000, Kalifa 2000), patlama olayının içsel çatlama ile bağlantılı olduğunu kanıtlamıştır. Çimentonun hidrasyon ürünlerinin hızlı bir şekilde çözüldüğü ve böylece hem çimento hamuru içinde, hem de agrega taneleri çevresinde ciddi çatlaklara yol açtığı ve ayrıca boşluk basıncının da patlama olayına kesin olarak katkıda bulunduğu ortaya çıkarılmıştır. Bunun yanında, numunenin merkezi ile yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının belirli bir değeri aşması sonucu ortaya çıkan gerilmeler nedeniyle betonun hızlı bir şekilde ısınması içsel çatlamalara yol açmaktadır. Ayrıca betondaki çatlamanın beton içindeki boşluklardan kaynaklandığı da belirtilmiştir. Bir başka araştırma, betonun nem içeriğinin ve dayanım sınıfının termal olarak patlama olayını yönlendiren iki ana faktör olduğunu bulmuştur. Eğer beton dayanımı, belirli bir değer altında (60 MPa) olursa, yüksek bir nem içeriği seviyesinde bile patlama olayı meydana gelmemektedir. Beton dayanımı, bu değeri aştığında ise nem içeriği eşik değerden daha yüksek olduğu sürece nem içeriği arttıkça patlama olasılığı da artmaktadır. Nem içeriğinin ve dayanımın patlama üzerindeki etkisi, patlama mekanizması açısından buhar basıncı hipotezlerini doğrulamaktadır (Atay 1992).

Mühendislik bakış açısıyla dayanım performansı, yapısal betonun en önemli özelliği olarak durmaktadır. Artan agrega boyutu ve rijitlik ile birlikte kırılma enerjisinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca maksimum yük altındaki yer değiştirmeler, betonun dayanımı ve agrega boyutu gibi parametrelere bağlı olarak betonun kırılma enerjisinin arttığı belirtilmiştir (Aydın 1994).

Beton yapıların yangın koşullarına belirli bir süre için dayanabilmesi ve can ve mal kaybının önlenmesi açısından güvenli olmaları önemlidir. Patlama olayı, beton yüzeyinin parçalanması ve yüksek sıcaklıktaki patlama ile birlikte betondan kopması şeklinde tanımlanmaktadır. Su/çimento oranının düşük olmasıyla dayanımın daha yüksek olduğu ve çimento matrisinin yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonlarda olduğu gibi daha yoğun olduğu iyi bilinmektedir. Beton yapıların çoğunun normal dayanımlı betonla üretilmesi nedeniyle patlama ile ilgili sorunlar ihmal edilmekte ve patlama ile ilgili araştırmalar pek fazla yapılmamaktadır. Bununla beraber günümüzde yüksek yapılara olan ihtiyaç arttıkça yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton kullanımı daha da yaygınlaşmaktadır. Patlama sorunu en büyük problem olarak görünmesine karşın, bu konuyla ilgili araştırmalar az sayıdadır (Balendran *et al.* 2000).

Yüksek sıcaklık, betonun bozulmasına yol açan çok önemli fiziksel ve kimyasal değişimlere neden olmaktadır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan beton yapıların uğradığı bozulma derecesinin belirlenmesi, mühendisin yapıyı yıkıp tekrar inşa etmekten ziyade onarım yapıp yapılamayacağı konusunda karar vermesine yardımcı olabilir (Boybay 1979).

Mineral katkı içeren betonlar, yüksek performansları ve ekonomik olmaları nedeniyle tüm dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklığın uçucu kül (UK) veya doğal puzolan içeren betonlar üzerindeki etkisi, 1960'lardan beri incelenen UK betonu kadar detaylı bir şekilde araştırılmamıştır. Araştırmacılar, beton özelliklerinde özellikle 100–300°C aralığında meydana gelen değişimler hakkında farklı görüşlere

sahiptir. 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mekanik özelliklerde belirli bir azalmanın olduğu konusunda fikir birliği mevcuttur. Bununla birlikte test edilen yüksek sıcaklık koşullarındaki ve betonda kullanılan bileşenlerdeki çeşitlilik nedeniyle literatürde belirtilen dayanım azalmalarında önemli farklıklar ortaya çıkmaktadır (Chan *et al.* 2001).

Betonda silis dumanı (SD), UK ve toprak cürufunun kullanılması, yüksek performanslı beton üretiminde etkili yöntemlerdir. Son zamanlarda betonda meta-kaolin kullanılması ile ilgilenilmektedir. Yüksek performanslı beton yapılarda kullanılmasının birtakım avantajlarının olmasına karşın, diğer betonlara kıyasla daha fazla gevrek olması büyük bir problemdir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yüksek performanslı beton, normal betonlara kıyasla patlama ve çatlama gibi daha ciddi bozulmalar göstermektedir. Geçmişte yapılan bir araştırma, meta kaolin kullanılarak üretilen yüksek performanslı betonun patlama olasılığını artırdığını ileri sürmüştür. Yoğun yüksek performanslı beton sisteminin içinde yüksek buhar basıncının ortaya çıkması, en büyük sorun olarak öne sürülmüştür.

Betonun yüksek sıcaklığa maruz kalması durumunda suyun buharlaşması nedeniyle oluşan rötre ve buhar basıncı, örtü betonunun çatlmasına ve dökülmesine neden olmaktadır. Betonun bozulması sonucu çelik, yangın başlangıcındaki sıcak gazla temas etmektedir. Çimento hamurunun en önemli bileşenlerinden biri olan Ca(OH)_2 , 530°C'de CaO 'ya, Türker vd (2001) çalışmalarında bu dönüşümün 400–450°C'de meydana geldiğini belirtmiştir. Bu süreç boyunca rötrenin hemen hemen %33'ü gerçekleşir. Yangını söndürmek için su sıkıldığı zaman CaO , Ca(OH)_2 'ye dönüşmekte ve gözeneklerden akarak yangın sonrasında beton yüzeyinde beyaz noktalar oluşturmaktadır. Bu olay, %44'lük bir hacim artışına yol açmaktadır. Bu olaylar süresince bazı çatlamlar oluşmakta ve beton parçalanarak gözenekli bir malzemeye dönüşmektedir (Akman 2000).

Günümüzde betondan farklı özellikleri elde etmek için cüruf, UK, SD gibi puzolanik malzemelerle katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ferro-silika ve silika metal endüstrisinin bir ürünü olan SD, çimento hamuru ve agrega ile çimento hamuru ara yüzeyindeki boşlukları doldurmakta ve betonun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüksek performanslı betonlar üretmek amacıyla kullanılan SD'nin sağladığı katkı, değişik yönlerden araştırılmaktadır.

Deneysel çalışmalarda yüksek sıcaklığa maruz kalan betonlarda bazı renk değişimleri ortaya çıkmaktadır. Önceki çalışmalarda özellikle silisli agregalarla üretilen betonlarda sıcaklık sonrasındaki rengin pembe veya kırmızı olması, sıcaklığın 300–600°C ve oluşan renk gri olması ise sıcaklığın 600–900°C olduğunu göstermiştir. Sıcaklık 600 ve 800°C'ye çıktığında beton, dayanımının sırasıyla %50 ve %80'ini kaybetmektedir. Bu ise, betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığının renk yardımıyla belirlenebilmesi konusunda bir fikir vermektedir. Short ve diğerlerine göre betondaki renkler, betonda kullanılan agrega cinsine bağlı olmaktadır ve bu nedenle sadece harç matrisinin incelenmesi yeterli olacaktır. Sonuç olarak beton dayanımı, yüzey rengine bağlı olarak tahmin edilebilmektedir (Chan *et al.* 1999).

Betonun yangın direnci kapasitesi çok karmaşıktır, çünkü beton, sadece farklı termal karakteristiklere sahip bileşenlerden oluşan kompozit bir malzeme değildir, beton aynı zamanda nem ve poroziteye bağlı çeşitli özelliklere sahiptir. Normal dayanımlı betonun (NSC) yangın sonrasında gösterdiği çeşitli performanslar, geçmişte ayrıntılı olarak araştırılmıştır (Chang *et al.* 2006).

Birçok bina ve yapı için yangın, önemli potansiyel risklerden biri olarak durmaktadır. Yapı inşasında betonun yaygın olarak kullanılması nedeniyle betonun yangın direnci ile ilgili araştırmalar, gün geçtikçe daha büyük önem kazanmaktadır. Tüm dünyada birçok araştırmacı, bu konu üzerinde çeşitli çalışmalar yapmış ve 1920'de Lea ve Stradling'in yaptığı çalışmadan bu yana bazı ilerlemeler sağlamıştır. Yüksek dayanımlı beton (YDB) uygulamalarının artması ile birlikte bu beton tipinin yangın dayanıklılığı ile ilgili

yapılan araştırmalara daha fazla önem verilmiştir. Yüksek sıcaklık altında YDB'un patlamaya meyilli olduğu belirlenmiştir. Zaman geçtikçe YDB'un patlama mekanizması ile ilgili iki temel açıklama ortaya çıkmıştır: Birincisi; termal gerilme mekanizması (örneğin; hızlı çevresel sıcaklık değişimi ve büyük sıcaklık değişimleri nedeniyle ortaya çıkan termal gerilmeler sonucu oluşan patlama). İkincisi ise; buhar basıncı mekanizması (örneğin; yüksek sıcaklık altında oluşan buhar basıncının beton içinde nem oluşumuna yol aması) (Chen *et al.* 2004).

Binalardaki yangınlarda sıcaklığın 1200°C'ye kadar çıktığı ölçülmüştür. Yapı malzemelerinin bu sıcaklığa kadar ısıtıldığında ahşabın yandığı, çeliğin yumuşayıp dayanımını kaybettiği, beton veya taşların ise parçalanıp döküldüğü bilinmektedir. şu halde önemli yapı malzemelerinin hiç biri bu derecede yüksek bir sıcaklığa dayanamaz. Ancak bunlar arasında beton, diğerlerine kıyasla yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olup yüksek sıcaklık etkisinde daha uzun sürede parçalanır (Kocataşkın 2000).

Ekonomik gelişmelerin hızlılığı, dünya üzerindeki enerji tüketimi ve dünya nüfusunun hızla büyümesi nedeniyle hava ve evre kirliliği bir problem olmuştur. Bu nedenle artık camların ve Yüksek Fırın Cürufu (YFC)'nin yapılarda kullanımının önemi daha da artmıştır. Artık malzemelerin kullanılma fikri daha da önem kazanmıştır. Bazı atık tozlar, UK, SD ve YFC normal betonların birçoğunda puzolanik malzeme olarak kısmen imento yerine kullanılmaktadır.

Yıllarca yumuşak iklimli ölkelerde binalardaki konfor şartlarının gelişmesi veya korunması için enerji tüketimini azaltmaya çok önem verildi. Yapılan alışmalar sonucunda binalardaki ısı yalıtımının ve ısı üreticilerinin veriminin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşılmıştır (Demirboğa 2003). Betondaki su muhtevası arttığında ısı iletkenliğinin de arttığı bilinmektedir. Su, havadan 25 kez daha fazla iletkenliğe sahip olduğundan boşluklarda bulunan hava ile kısmen yer değiştiren su veya nem ile beton daha büyük bir ısı iletkenliğine sahip olur (Short *et al.* 1978; Morabito 1989). Su emiliminden dolayı betonun ağırlığı %1 oranında arttığında, numunelerin ısı iletkenliği

de %5 oranında artar (Steiger *et al.* 1978). Betondaki agreganın ısı iletkenliğinin ve çimento içeriğinin artması ile betonun ısı iletkenliği artar (Schnider 1982).

Sulu volkanik bir cam olan perlit incimsi ve camsı parlak bir yapıya sahiptir. Nispeten yüksek olan su içeriği (%2-%5) perlit, volkanik camlar, sulu volkanik küller vb. gibi diğer sulu volkanik cam türlerinden ayırır. Üretimlerindeki hızlı ısı yükselişi nedeniyle perlit, birim hacim ağırlığı düşük olan hücreli bir malzemeye dönüşür.

İçinde kimyasal sular bulunduğu için perlitin kaynama sıcaklığı genellikle 900–1100°C arasında değişir. Köpüğe benzer bir yapıda üretilen yumuşak taş içinde buhar bileşenleri hava kabarcığına dönüşür. Bu hava kabarcıkları nedeniyle taneler orijinal hacmin 15–20 katı daha fazla genişlemektedir. Bu şekilde oluşan yeni materyallere genişletilmiş perlit denir. Genleştirilmiş perlit, fiziksel ve kimyasal karakterlerinin uygunluğu nedeniyle, çeşitli uygulamalar içinde değişik şekillerde kullanılabilir. Örneğin yapı endüstrisinde hafif agrega olarak, tarımda toprağı ıslah etmek ve derinleştirmek amacı ile tekstil endüstrisinde ağartıcı madde olarak kullanılabilirler (Bektaş vd 2005).

Ülkemizin hafif agrega kaynakları açısından zengin oluşu ve MTA'nın raporlarında bildirilen 8 milyar ton civarındaki hafif agrega rezervlerinin (Anonim 1985) büyük bir kısmının da Doğu Anadolu Bölgesi'nde bulunduğu gerçeğı göz önünde tutulduğunda, atıl durumda bulunan bu kaynakların beton ve harç üretiminde kullanılarak değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Bu agregalarla üretilen betonların ve harçların geleneksel beton ve harçlarla kıyaslandığında yangına karşı daha dayanıklı olacağı düşünülmesi ve böylelikle yapı malzemesi alanında bir yarar sağlaması hususunun önemi ortaya çıkmaktadır (Bingöl 2002).

Bu çalışmada yüksek dayanımlı betonun yangın dayanıklılığını artırmak amacıyla değişik katkı ve agrega çeşitleri ile değişik karışım yüzdeleri kullanılarak bazı fiziksel ve mekanik özelliklerin nasıl değişeceği incelenmiştir. Bu agrega ve katkılarla üretilen betonların geleneksel betonlarla kıyaslandığında yangına karşı daha dayanıklı

olacađının dűşünűlmesi ve bűylelikle yapı malzemesi alanında bir yarar sađlaması hususu bu çalıřmanın temelini ortaya koymaktadır. Bűtűn bu sebeplerle yüksek dayanımlı betonların (YDB) yüksek sıcaklık etkilerinden sonra nasıl bir davranıř gűstereceđini incelemek bu çalıřmanın esasını teřkil eder.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yüksek Dayanımlı Betonlar

Beton tüm dünyada en yaygın kullanılan yapı malzemesi olmasına karşın, 1900'lü yılların başlarına kadar mühendisler betonun dayanımını yükseltmek için fazla çaba göstermeye gerek görmemişlerdir. Dayanım artışıyla ilgili çalışmalarda gelişmeler "yüksek dayanım" kavramını ortaya çıkarmıştır. 1970'lerin başlarında, hazır betonun 43 MPa'dan daha yüksek dayanımlara ulaşabileceğine inanılmamasına karşılık geçen 35 yıl içerisinde YDB'lardaki gelişme bu tahminlerin daha da üstüne kolay bir şekilde ulaşabilmeyi sağlamıştır.

Stratejik Otoyollar Araştırma Programının tanımlarına göre yüksek dayanımlı bir beton:

- 28 günlük basınç dayanımı 70 MPa'a eşit veya daha büyük,
- 4 saatlik basınç dayanımı 20 MPa'a eşit veya daha büyük,
- 24 saatlik basınç dayanımı 35 MPa'a eşit veya daha büyük,
- 300 çevrimlik bir donma-çözülme çevrimine dayanıklılığı %80 veya daha büyük
- Su/çimento oranı 0,35'e eşit veya daha büyük olmalıdır gibi karakteristikleri sağlamalıdır.

Ayrıca YDB, normal betondan farklı olarak şu özelliklerden bir veya daha fazlasını karşılamalıdır:

- Erken yaşlarda yüksek dayanıma ulaşabilme,
- Kolay yerleştirilebilme ve sıkıştırılabilme,
- Kimyasal etki, donma-çözülme ve yüksek sıcaklıklara daha uzun süreler boyunca dayanabilmesi,
- Daha üstün bir durabiliteye sahip olması,
- Hacim sabitliğine sahip olarak daha az çatlama ve deformasyon göstermesi (Topçu 2006).

2.1.1. Yüksek dayanımlı betonların sınıflandırılması

Young tarafından YDB için bir dayanım sınıflandırması geliştirmiş ve bununla ilgili sınıflandırma Çizelge 2.1’de görülmektedir.

Çizelge 2.1. Beton için dayanım sınıflandırması

	Normal Beton	Yüksek Dayanımlı Beton	Çok Yüksek Dayanımlı Beton	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
Dayanım, MPa	<50	50–100	100–150	>150
S/Ç Oranı,%	>45	0,45–0,30	0,30–0,25	<0,25
Kimyasal Katkılar	Gerekli Değil	WRA/HRWR*	HRWR*	HRWR*
Mineral Katkılar	Gerekli Değil	Uçucu Kül	Silis Dumanı**	Silis Dumanı**
Geçirimsizlik Katsayısı, cm²/s	> 10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³
Donma-Çözülme Koruması	Hava s. kat.	Hava s. kat.	Hava s. kat.	Donmayan su

*WRA: Su azaltıcı katkı; HRWR: Yüksek oranda su azaltıcı.

**UK de içerebilir.

YDB’lar Stratejik Otoyollar Araştırma Programına göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- a) Çok erken dayanım kazanan beton
- b) Erken yüksek dayanım kazanan beton
- c) Çok yüksek dayanımlı beton
- d) Liflerle güçlendirilmiş beton
- e) Yüksek dayanıklılıklı beton
- f) Yüksek dayanımlı hafif beton (Lennon ve Clayton 1999)

2.2. Yüksek Dayanımlı Betonların Yangın Dayanıklılığını Etkileyen Faktörler

En önemli yapı malzemesi olan betonun yüksek sıcaklığa maruz kalması ile genellikle dayanım kaybı gözlenir. Basınç dayanımındaki düşüş yüzdesi birçok malzemeye ve deneysel faktöre dayanmaktadır. Bu faktörler; ısıtma hızı, ulaşılan maksimum sıcaklık, maksimum sıcaklığa maruz kalınan süre, maksimum sıcaklığa ulaşıldıktan sonra soğutma metodu, agrega ve mineral katkıların tipi şeklinde özetlenebilir.

2.2.1. Beton katkı tipi

2.2.1.a. Fiber katkıları

Kullanılan lif donatıları değişik boylarda ve biçimde olabilmektedir. Genellikle yapılan tanımlarda lif malzemesinin çapı ve boy/çap oranı belirleyici bir ölçüt olarak kabul edilmektedir ve bu değer lif narinlik oranı olarak adlandırılır. Fakat lifin belirli bir boyuttan ince olması gerektiğinden lif çapı da sınırlayıcı bir değerdir.

ASTM standartlarında bir malzemenin lif olarak tanımlanabilmesi için, boy/ortalama çap oranının $L/d > 10$ olması, lifin en büyük kesit alanının da $0,05 \text{ m}^2$ 'den daha küçük olması gibi sınırlamalar getirilmektedir. Amerikan Beton Enstitüsünün liflerle donatılı beton konusunda çalışan 544 sayılı komitesine göre, bir lifi tanımlayan en uygun sayısal parametre "lif narinlik oranı"dır. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan en uygun sayısal parametre "lif narinlik oranı"dır. Lif boyunun, lifin kesit alanı kadar alanı olan bir dairenin çapı olarak tanımlanan "eşdeğer lif çapı"na bölünmesiyle bulunan bu oranın, beton malzemedeki boyları 0,60 ile 7,62 cm (1/4"-3") arasında değişen lifler için tipik değeri 30 ile 150 arasında verilmektedir (Topçu 2006).

Polimer fiber katkıların (FRP) betonun güçlendirilmesi için kullanıldığı geçen on yıl boyunca FRP, oldukça fazla dikkat çekmiştir. FRP, iyi bir korozyon direnci sergileyen elektromanyetik olarak şeffaf bir malzemedir. Bu nedenle agresif dış koşulların veya elektromanyetik parazitlerin bulunması sebebiyle çeliğin kullanılmadığı yerlerde FRP'ler kullanılabilir. Betonun güçlendirme amacıyla uygulanan en önemli iki kullanım şekli; (i) tipi çelik güçlendirmesinde olduğu gibi iç güçlendirme ve (ii) beton elemanların onarımı ve güçlendirilmesi amacıyla uygulanan dış güçlendirme tabakaları. İlk kullanım şeklinde FRP çubukları, betonun içine gömülmektedir. Bu durumda betonun agresif çevre ortamından kaynaklanan kimyasal saldırıların yanında klorid gibi bazı dış etkilerde ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı FRP çubuklarının durabilitesi ile ilgili çalışmaların çoğu, yukarıda bahsedilen çevresel faktörlerin çubukların özellikleri üzerinde yaptığı etkilere yoğunlaşmıştır. Buna karşın yüksek sıcaklığa maruz kalan FRP çubuklarının davranışına çok dikkat edilmemiştir (Katz and Berman 2000).

2.2.1.b. Cam fiberler

Uzun zamandır cam ve çimentonun kimyasal olarak uyumsuz olduğu bilinmektedir. Çimento hamurundaki alkali ve camdaki silis, ortamda nemin bulunması durumunda reaksiyona girerler. Alkali-silika reaksiyonu (ASR), Portland çimentosu ile belirli agregalar arasında gerçekleşen kimyasal bir reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucunda beton şişerek beton yol ve diğer yapılarda şiddetli hasarlara sebep olan ve donma-çözünme veya korozyon gibi hasara yol açan diğer reaksiyonları hızlandıran bir jel oluşur. Bununla birlikte bu olay, aylar boyunca sürer ve en az 40°C'lik bir sıcaklık ve belirli koşulların yer almasını gerektirir. Bu nedenle camın betonda bir agrega olarak kullanımı ile alakalı ilk teşebbüsler başarılı olamamıştır. Cam agregası içeren sağlam beton üretiminde başarısı ispatlanmış olan literatürdeki diğer çalışmalara ek olarak 5 yıl boyunca Kuveyt Üniversitesi tarafından sivil yapılarda katı atık kullanımı üzerine çeşitli araştırma çalışmaları yürütülmüştür. Referanslardaki ASR etkisinin azaltılması ile ilgili olarak beton karışımlarındaki cam agrega boyutlarının kontrolü hakkında çeşitli öneriler

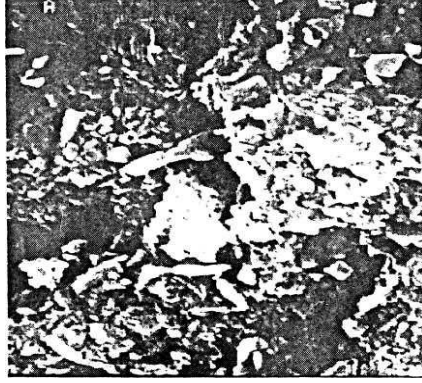
yapılmıştır. Atık cam içeren beton karışımların üretimi ile ilgili son teşebbüsler, dikkat çekici başarılar göstermiştir.

Blok duvarcılıkta atık cam kullanımı, ince agrega camının %20 oranına kadar karışıma katılması suretiyle test edilmiştir. Beton karışımında daha küçük boyutlu cam agregası kullanılması ile çimento matrisinde yer alan ASR olayına yol açan genişlemenin azaldığı keşfedilmiştir. Bu buluşlar, ince cam parçacıklarına sahip çimento özellikleri üzerindeki ASR etkisini araştıran çalışmaları desteklemiştir. Oran olarak %0-%35 aralığındaki UK bileşenlerine ek olarak toplam agreganın %0'ı ile %90'ı arasındaki çeşitli cam oranları da araştırılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları göstermiştir ki; betonda fazla miktarda çimento ilavesi yerine atık toprak cam kullanımı mümkündür. Çimento yerine %30 oranlarına kadar toprak cam kullanımı, puzolanik özellikleri yönünden araştırılmıştır. Sonuçlar, toprak cam ile üretilen betonların basınç dayanımlarının UK ile üretilen betonlara kıyasla daha yüksek olduğunu kanıtlamaktadır. Betonda agrega yerine 4–16 mm. boyutlarındaki atık camların kullanımı, %0-%60 oran aralığında analiz edilmiştir. Sonuçlar, cam kullanımının beton dayanımında küçük bir azalmaya sebep olmakla birlikte betonun işlenebilirliğinde herhangi önemli bir etkisinin olmadığını göstermiştir. İnce toprak camı ile karıştırılan çok gözenekli atık cam parçacıkları, ayrıca hafif beton elde etmek amacıyla da kullanılmıştır (Terro 2006).

2.2.1.c. Mineral katkılar

UK, SD ve pirinç kabuğu külü, YFC gibi malzemeler YDB'da en çok kullanılan mineral katkılardır. Bu malzemeler hidrasyon sırasında portland çimentosu ile reaksiyona girerek betonun dayanımından sorumlu ilave C-S-H jelleri oluştururlar. Çimentodan yaklaşık 50 kat daha ince olan SD, çimentonun hidrasyonu sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 ile hızlı reaksiyon yapmakta ve daha iri olan çimento danelerinin arasındaki boşlukları doldurarak filler etkisi göstermektedir. Özturan, Mehta, Massazza, Toutanji ve diğerleri, SD'nin beton içerisindeki davranışının fizikokimyasal olduğunu göstermektedir. Çok ince taneli oluşundan dolayı betonda SD kullanımı su

gereksinimini arttırmaktadır. Dolayısı ile bu malzeme süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılmaktadır. Pirinç kabuğu külü de %90–95 oranında silis içerdiğinden betondaki etkisi SD'na benzerdir. Şekil 2.1'de hidratasyona uğramış silika dumanlı çimento hamuru görülmektedir (Topçu 2006).



Şekil 2.1. Hidrate olmuş silika dumanlı çimento hamuru

Betonda SD, UK ve cürufun kullanılması, yüksek performanslı beton (HPC) üretiminde etkili yöntemlerdir. Son zamanlarda betonda metakaolin (MK) kullanılması ile ilgilenilmektedir. HPC'nin beton yapılarda kullanılmasının birtakım avantajlarının olmasına karşın, diğer betonlara kıyasla daha fazla gevrek olması büyük bir problemdir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında HPC, normal betonlara kıyasla patlama ve çatlama gibi daha ciddi bozulmalar göstermektedir. Geçmişte yapılan bir araştırma, MK kullanılarak üretilen HPC'nin betonun patlama olasılığını artırdığını ileri sürmüştür. Yoğun HPC sisteminin içinde yüksek buhar basıncının ortaya çıkması, en büyük sorun olarak öne sürülmüştür (Poon 2004).

Günümüzde betondan farklı özellikleri elde etmek için cüruf, UK, SD gibi puzolanik malzemelerle katkı maddeleri kullanılmaktadır. Ferro silika ve silika metal endüstrisinin bir ürünü olan SD, çimento hamuru ve agrega ile çimento hamuru ara yüzeyindeki boşlukları doldurmakta ve betonun geçirimsizliğini azaltmaktadır. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüksek performanslı betonlar üretmek amacıyla kullanılan SD'nın sağladığı katkı, değişik yönlerden araştırılmaktadır (Yüzer vd 2004).

Dünya’da ılıman iklim kuşağındaki bölgelerde betondaki çimentonun belirli bir kısmı yerine toz halindeki UK kullanımının beton üzerine yaptığı etkiler, yaygın bir şekilde araştırılmış ve bu bölgelerde daha iyi dayanım özelliklerine sahip betonların üretilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte tropikal bölgelerde ise UK kullanımının betondaki dayanım özellikleri üzerinde oluşturduğu etkiler etraflıca incelenmemiştir. Balendran’a göre OPC’nin yerine kısmen UK kullanılması, hem taze hem de sertleşmiş betonun kalitesini artırmaktadır:

- Daha düşük hidratasyon ısı; bu, işlenebilirlik periyodunu uzatmakta, kür süresince sıcaklık artışını düşürmekte ve termal gerilmeleri azaltmaktadır;
- Daha düşük su ihtiyacı; bu, terleme olasılığını düşürmek ve kuruma rötresini azaltmaktadır;
- Orta vadede daha iyi dayanım;
- Sünmede azalma,
- Uzun dönemde daha büyük elastisite modülü.

Alshami tarafından yapılan deneysel çalışma, 20, 35 ve 45°C’lik atmosfer sıcaklıkları altında çimentonun yerine kısmen UK kullanılmasının, betondaki basınç dayanımı gelişimini iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca hidratasyon ısı oranındaki azalma nedeniyle hem maksimum kür sıcaklığı hem de bu sıcaklığa ulaşmak için gerekli olan süre azalmıştır. Son söylenen bu buluşlar, PFA betonu kullanımının daha hızlı bir ısı dağılımı sağladığını ve böylece termal çatlama riskini azatlığını göstermektedir (Balendran *et al.* 2000).

Puzolanik gibi tamamlayıcı çimento malzemelerinin kısmen beton bünyesine katılması, yüksek performanslı bir betonun (HPC) hazırlanması için uygulanan etkili bir yöntemdir. Genelde bu karışım malzemeleri, mikro agreganın doldurma etkisi ile birlikte gelişen puzolanik reaksiyon vasıtasıyla betonun performansını artırmaktadır. Betonun daha sıkı bir mikro-yapıya sahip olması sülfat ve klorid gibi agresif iyonların beton içine difüzyonunu yavaşlatarak betonun durabilitesini ayrıca artırmaktadır. Bununla karşın sıkı içi yapı, betonun yangın direncini de azaltabilmektedir. Özellikle

geleneksel betonla karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık altında HPC betonunun patlama riski çok daha yüksektir. Gelecekteki araştırmaların bu sorunu çözememesi durumunda HPC'deki zayıf yangın direnci nedeniyle HPC betonu kullanımının bazı koşullarda sınırlandırılması önerilebilir (Chan *et al.* 2001).

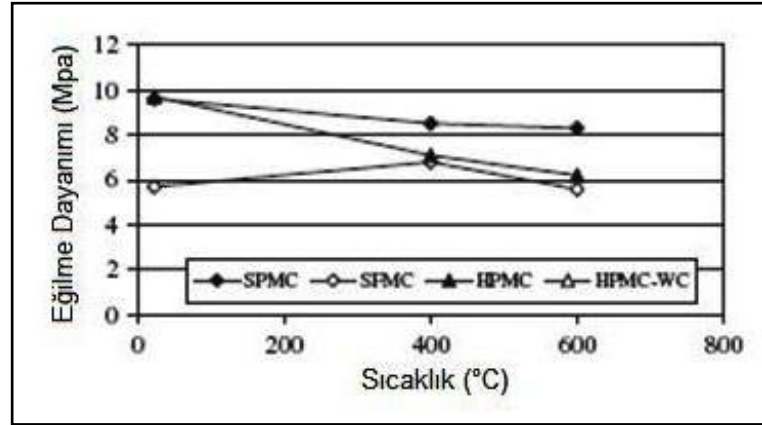
2.2.1.d. Kimyasal katkılar

Betona süper akışkanlaştırıcılar ile düşük s/ç oranında uygun bir işlenebilirlik kazandırılır. Bu katkı maddeleri R-SO₃ formülüne uyan organik polimerlerdir. R köküne bağlı üç grup mevcuttur. Bunlar:

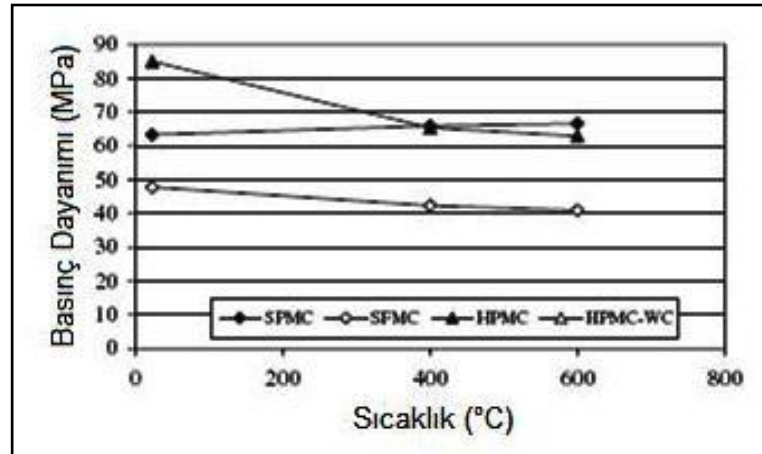
- Melamin formaldehit sülfonat kondanse,
- Naftalen formaldehit sülfonat kondanse,
- Dönüştürülmüş lignosülfonat'dır.

Süper akışkanlaştırıcılar taze betonun işlenebilmesini arttıırırlar. Katkı oranı arttırılarak 0–2 cm çökme veren bir betonu 22 cm çökmeli yapmak mümkündür. 0,50 değerinde s/ç oranı ile belirli bir işlenebilme sağlayan betonu bu katkılarla aynı işlenebilmeye sahip fakat s/ç oranı 0,35 olan bir betona dönüştürülebilir. Dolayısıyla süper akışkanlaştırıcılar:

- İstenilen işlenebilirliğe sahip, fakat s/ç oranı düşük betonlar üreterek mekanik dayanımı yükseltmek,
- S/ç oranını sabit tutarak taze betonun işlenebilirliğini arttırmak, akıcı kıvamda ve yeterli dayanımı sağlayan beton üretmek için kullanılır. Su azaltıcı-geciktirici katkıları ise çimentonun hidrasyonunu yavaşlatarak betonun yerine yerleştirilmesine daha fazla zaman kazandırır (Topçu 2006).



Şekil 2.2. Yüksek performanslı betonun sıcaklığa bağlı olarak eğilme dayanımında meydana gelen değişim

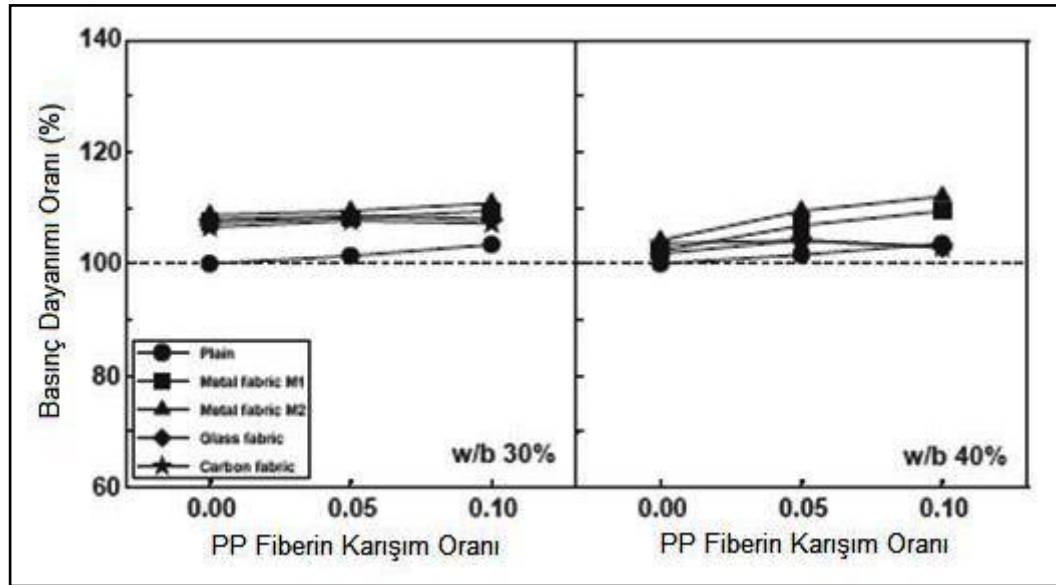


Şekil 2.3. Yüksek performanslı betonun sıcaklığa bağlı olarak basınç dayanımında meydana gelen değişim

Şekil 2.2'den de görülebileceği gibi süper-akışkanlaştırıcı kullanılarak üretilen mikro betonun eğilme dayanımı, yüksek performanslı mikro beton (HPMC)'un eğilme dayanımından 23°C için %1 oranında daha düşük, 400°C için %20 oranında daha fazla ve 600°C için %34 oranında yine daha fazla olmaktadır. SD kullanılarak üretilen mikro-betonların eğilme dayanımları ise, HPMC betonlarına kıyasla 23, 400 ve 600°C sıcaklıklar için sırasıyla %41, %4 ve %10 oranlarında daha düşük çıkmaktadır. Aynı şekilde süper-akışkanlaştırıcı kullanılarak (SD kullanılmadan) üretilen mikro-betonların

basınç dayanımları, HPMC'nin basınç dayanımından 23°C için %25 oranında daha düşük olurken, 400°C için %1 ve 600°C için %6 oranlarında daha fazla olmaktadır. SD kullanılarak üretilen mikro betonların basınç dayanımları ise, HPMC'nin basınç dayanımından 23°C için %44, 400°C için %35 ve 600°C için %35 oranlarında daha düşük çıkmaktadır. Bu da şunu göstermektedir; sadece SD kullanılarak üretilen mikro-betonların eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalma, sadece süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak üretilen mikro betonlara kıyasla daha fazladır ve SD ile üretilen beton, yüksek sıcaklıktan daha fazla etkilenmektedir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre HPMC'deki patlamanın sebebi, SD'daki genleşmedir (Husem 2006).

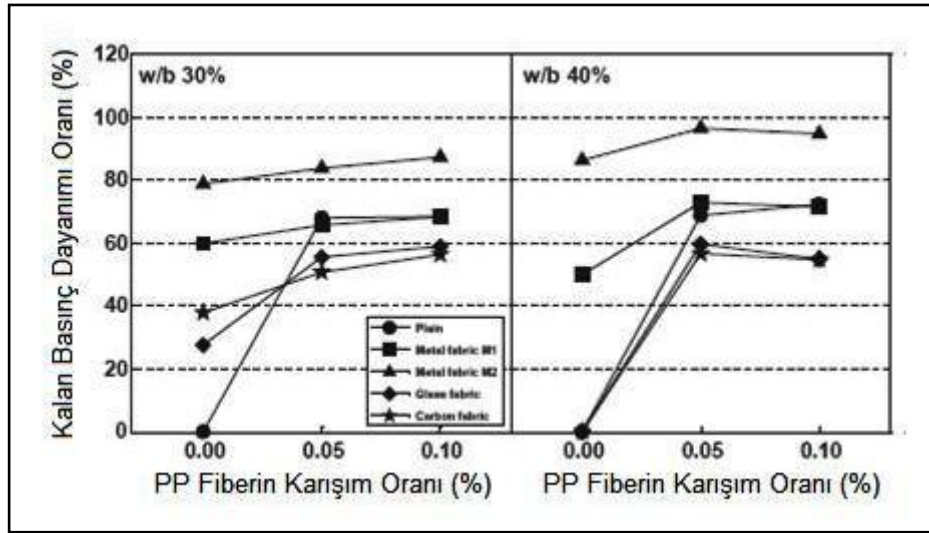
2.2.1.e. Beton katkı oranı



Şekil 2.4. PP fiber içeriklerine bağlı olarak basınç dayanımı oranları

Şekil 2.4, s/ç oranı, yanal hapsetme malzemesi ve PP fiber içerikleri, referans olarak göz önüne alınan sade betonun basınç dayanımı ile birlikte test edilen betonun basınç dayanım oranlarını göstermektedir. PP fiber içeriği arttıkça, basınç dayanımı biraz

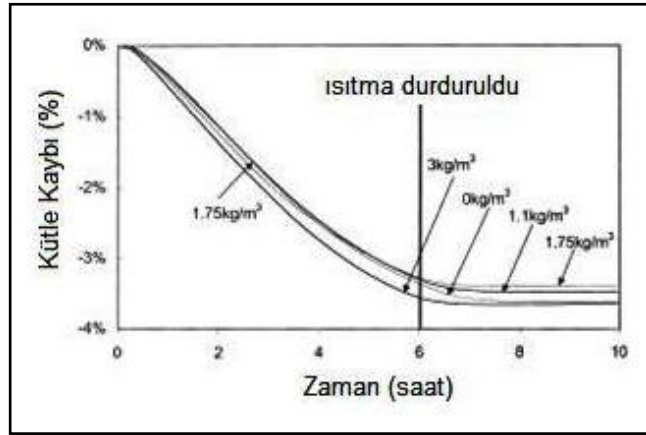
artmıştır. Çünkü PP fiber sayısının artmasıyla betonun çatlak önleme kabiliyeti artmakta ve böylece betonun tokluğu yükselmektedir. Yanal hapsedme malzemeleri ile çevrelenen betonun basınç dayanımı, yanallapsedilme gerilmesindeki artış nedeniyle sade betona kıyasla artmaktadır. Metal plaka kullanılması durumunda ise basınç dayanımındaki artış, cam ve karbon fiberlere kıyasla daha büyük olmaktadır. M₂ metal plakasının kullanılması durumunda M₂'nin tokluğunun M₁'den daha fazla olması nedeniyle dayanım da o oranda büyük olmaktadır (Tenchev and Purnell 2005).



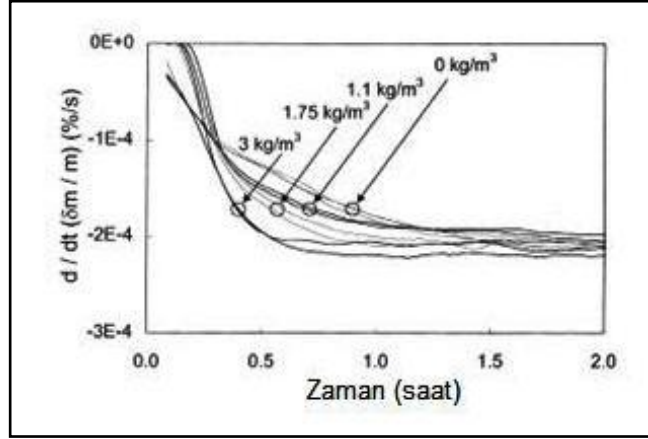
Şekil 2.5. PP fiber içeriğine bağlı olarak basınç dayanımları

Şekil 2.5, PP fiber içeriklerine ve yanallapsedme malzemelerine bağlı olarak artık basınç dayanımlarını göstermektedir. Sade betonda, bazı araştırmacılar çeşitli ölçümler yapmış olsalar dahi tüm numunelerin patlaması nedeniyle artık basınç dayanımını ölçmek imkânsızdır. Metal plaka ile yanallapsedilen betondaki artık basınç dayanımı oranları ise, M₁ ve M₂ için sırasıyla %50–60 ve %80–90 civarındadır. Buradan hareketle artık basınç dayanımının metal plaka kalınlığına bağlı olduğu söylenebilir. Cam fiber veya karbon fiber yardımıyla yanallapsedilen betonlardaki artık basınç dayanımını da (sade betonda olduğu gibi) ölçmek mümkün değildir. Fakat ölçülebilen 0,3'lük s/ç oranına sahip bazı numunelerde artık basınç dayanımı oranının %30 civarında olduğu görülmüştür. PP fiber içeriği arttıkça, artık

basınç dayanımı da az bir oranda artmaktadır. Hem PP fiber, hem de metal plaka ile yanal hapsedme işleminin birlikte uygulanması durumunda artık basınç dayanımı oranı %90'a kadar çıkmaktadır. Bu değer, hem PP fiberin hem de metal latanın uyguladığı yanal hapsedme kuvvetinin patlama direncini arttırması nedeniyle artık basınç dayanımı için en yüksek değerdir. Sadece PP fiberin kullanılması durumunda ise, bu değer %70 civarlarında kalmaktadır. PP fiber ile cam veya karbon fiberin yanal hapsedme için kullanılması durumunda artık basınç dayanımı, orijinal dayanımın %50–60'ı kadar olmakta, yani bir miktar azalmaktadır. Çünkü cam fiber veya karbon fiberin aderansındaki azalma nedeniyle yanal hapsedme kuvveti de azalmaktadır. Bununla birlikte eğer cam veya karbon fiber plakalar, yapıştırıcı ile beton yüzeyine yapıştırılırlar veya betonun içine gömülürlerse, yeterli yanal hapsedme kuvvetini sağlayabilirler. Özellikle karbon fiber plakalar, yeterli hapsedmeyi sağlayabilir, fakat çelik plaka ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır (Tenchev and Purnell 2005).

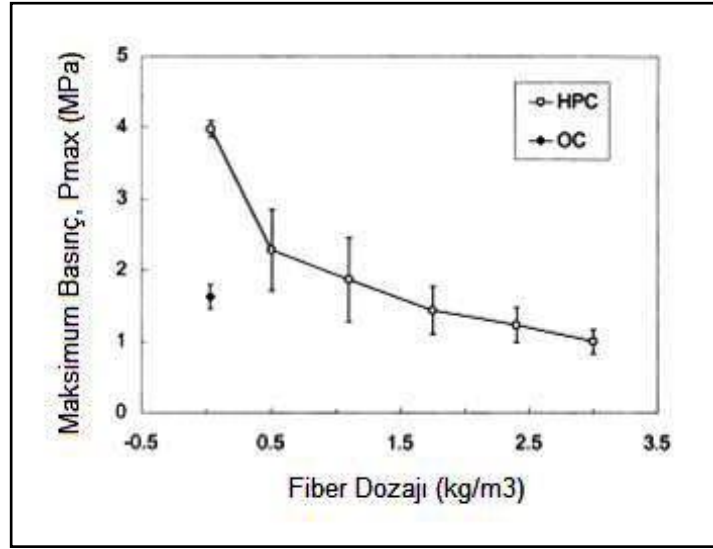


Şekil 2.6. PTM testleri: Çeşitli fiber dozajları için meydana gelen nispi kütle kayıpları

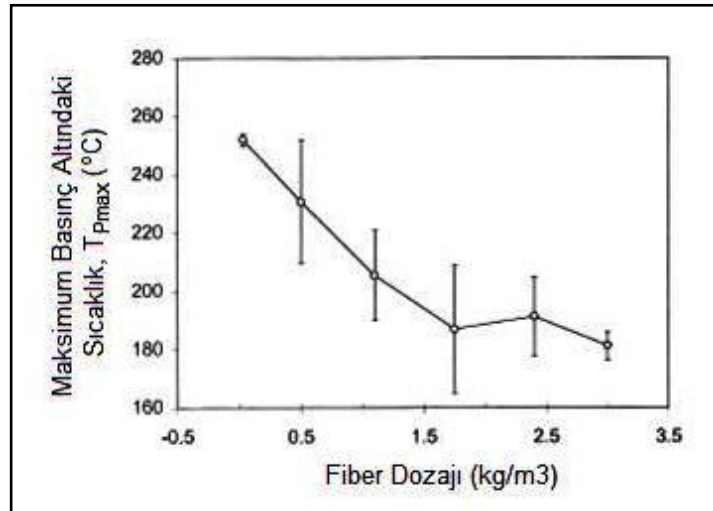


Şekil 2.7. Çeşitli fiber dozajları için zaman-kütle kaybı oranı ilişkisi

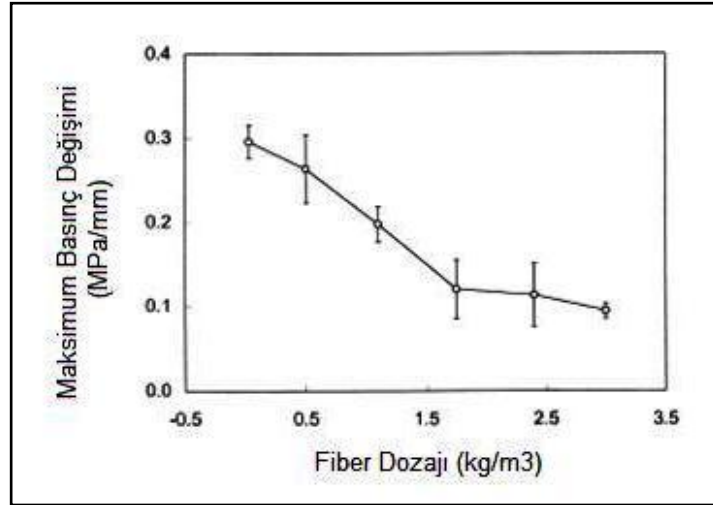
Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de kütle kayıpları ve bu kayıplara ait oranlar zamanın bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Bu eğriler, sayısal simülasyon için gerekli verileri sağlamaktadır. Artan fiber dozajı ile birlikte kütle kaybı oranı da artmaktadır. Kuruma-dehidrasyon sürecinin etkilediği alanın kalınlığının numune kalınlığına (120 mm.) kıyasla küçük (20 mm.) olmasına karşın sözü edilen fiber dozajı etkisi oldukça büyüktür. Fiber dozajına bağlı olarak kütle kaybında meydana gelen bu artış, suyun beton dışına kaçmasına olanak sağlayan gözenek ağı sisteminin oluşmasında fiberlerin katkısı olduğunu göstermektedir. Benzer gözlemler, 500 mm’lik kalınlığa sahip küçük harç numuneleri üzerinde Sarvanta ve diğerleri ile Sarvanta ve Mikkola tarafından da yapılmıştır (Kalifa *et al.* 2001).



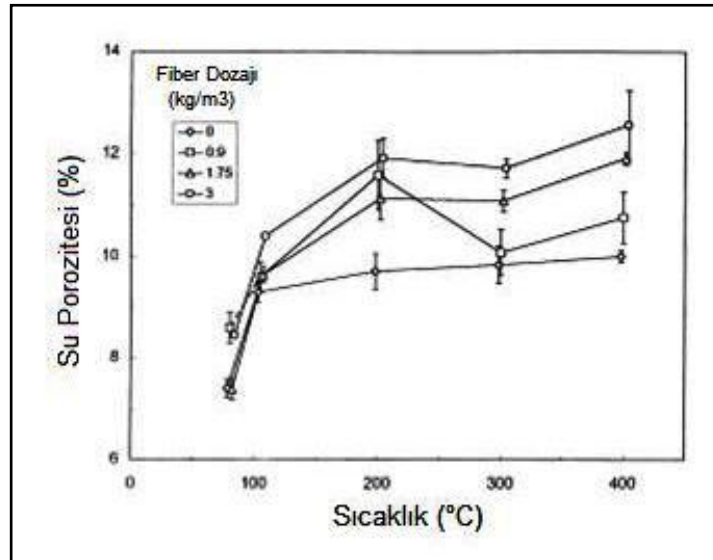
Şekil 2.8. Fiber dozajı-maksimum basınçlar



Şekil 2.9. Maksimum basınç altındaki sıcaklık-fiber dozajı



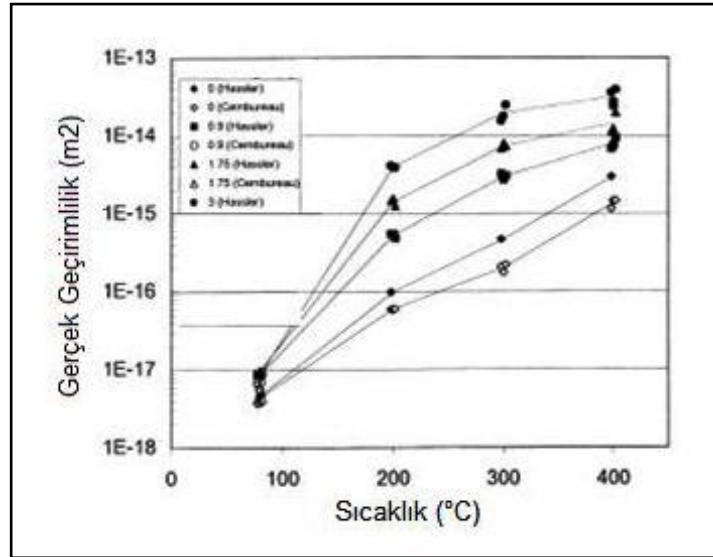
Şekil 2.10. Maksimum basınç değişimi-fiber dozajı



Şekil 2.11. Su porozitesi-ısıtıl işlem ve fiber dozajı

Porozite ölçümleri, ısıtıl işlem ve fiber dozajının bir fonksiyonu olarak Şekil 2.11’de gösterilmiştir. 80 ile 105°C arasında açık gözenek hacminde hızlı bir artışın meydana geldiği gözlenmiştir. Bunun ana sebebi, serbest ve ya fiziksel bağ suyundaki azalmadır. Bu olay, matraste büyük bir değişime yol açmamaktadır. Porozitedeki artış, fiber dozajına bağlı olarak artsa bile 105 ile 400°C arasındaki porozite artışı daha küçüktür.

Bu artış, 3 kg/m^3 'lük fiber dozajı için sade betonda %0,7 ile %2 arasındadır. Her halükarda ısıl işlem nedeniyle ortaya çıkan gözenek hacmindeki artış, geçirimsizliğin tersine oldukça düşüktür (Kalifa *et al.* 2001).



Şekil 2.12. Özgül geçirimsizlik-sıcaklık ve fiber dozajı

Şekil 2.12'de sıcaklık ve fiber dozajlarına bağlı olarak özgül geçirimsizlik değerleri verilmiştir. Düşük bir veri dağılımı kaydedilmiştir. Bu nedenle aşağıdaki analizlerde sadece ortalama değerler dikkate alınmıştır. Ayrıca sade beton üzerinde gözlenen sonuçlar, Tsimbrovska ve diğerleri tarafından yapılan gözlem sonuçlarına çok yakın çıkmıştır.

- Fiber betonlar, 80°C sıcaklık altında benzer geçirimsizlik değerlerine sahiptir. Bu değerler, sade betonun sahip olduğu geçirimsizlik değerlerinin sadece iki katı kadar büyüktür. Bu nedenle fiber ilavesi, geçirimsizlikle ilgili olarak başlangıçtaki gözenek ağının yapısını çok az bir seviyede etkilemektedir.
- 200°C sıcaklık altında fiber betonlar, sade betonlara kıyasla çok daha büyük bir geçirimsizlik artışı göstermektedir (Kalifa *et al.* 2001).

2.2.2. Yüksek sıcaklık derecesi ve süresi

Yangın esnasında meydana gelen sıcaklık, yangın mahallinin büyüklüğüne, yapıyı oluşturan malzemelerin ısı özelliklerine ve atmosfer koşullarına (özellikle rüzgâra) göre değişmektedir. Bu sıcaklıklar, en az 200–400°C'ye ve genellikle 600–800°C'ye, hatta bazen de 1000–1200°C'ye kadar ulaşabilmektedir (Ataman 1991). Bu sıcaklıkların etkisiyle beton dayanımındaki azalma aşağıdaki Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Beton dayanımlarının sıcaklıkla değişimi

Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı (%)	Basınç Dayanımı (%)
0	100	100
200	70	85
300	40	75
500	20	50
800	5	50

Beton yapıların yangın dayanımının hesabında dikkate alınması gereken sıcaklık-zaman ilişkisi Çizelge 2.3'de verilmektedir. Bu tablodaki veriler, $T=345 \cdot \log_{10}(8t+1)+T_0$ bağıntısından elde edilir. Bağıntıdaki T_0 (°C) ortam sıcaklığını, T (°C) ise t (dakika) anındaki ortam sıcaklığını göstermektedir.

Çizelge 2.3. Standart sıcaklık-zaman ilişkisi

T (dakika)	T (°C)
0	20
5	536
10	704
30	843
60	927
120	1010
240	1093
480	1260

Burada yangın şiddeti ve süresinin beton kesiti içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğunu belirtmek uygun olmaktadır. Bu durum yani sıcaklık etkisinin yüksek olduğu kısa süreli yangın hali aşağıdaki çizelgede, standart yangın ise, yukarıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Bazı araştırmacılar, yangın süresinin artmasıyla birlikte basınç dayanımındaki kayıpların da arttığını belirtmiştir. Ancak kayıpların önemli bir kısmı, ilk periyotta meydana gelmektedir. Örneğin bazalt agregalı betonda dayanım kayıplarının önemli bir kısmı ilk iki saatlik sıcaklık süresinde meydana gelmektedir (Yazıcı *et al.* 2000).

Çizelge 2.4. Kısa süreli yangın için sıcaklık değerleri

T (dakika)	T (°C)
0	20
12	982
18	593
24	482
36	191
60	149
90	121
180	60

Betonların maruz kaldığı yüksek sıcaklıkların (yangın vs. gibi) betonun dayanımına etkisi olmaktadır ve bu husus birçok araştırmaya konu teşkil etmiştir. Sıcaklığın yükselmesi, betondaki agreganın genleşmesine yol açmaktadır. Genleşme genel olarak agreganın cinsi ile yakından ilgilidir.

Sıcaklığın beton dayanımına etkisi, bilhassa 300°C'den sonra kendini göstermektedir. Sıcaklık değişimleri ile betonlarda görülen çatlamların nedeninin Ca(OH)_2 'in dehidratasyonu ile oluşan CaO 'in rehidratasyonu sonunda meydana gelen hacim değişiklikleri olduğu ortaya çıkmıştır (Boybay 1979).

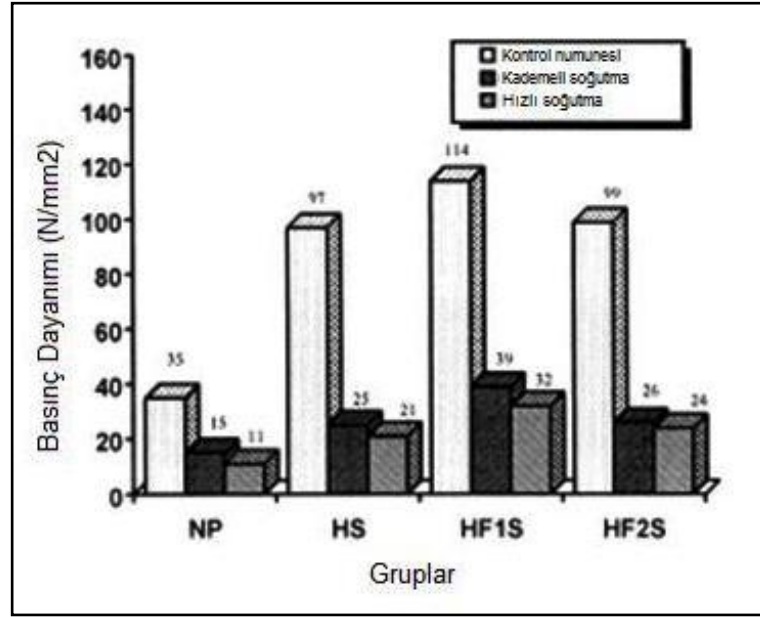
Çakıl betonu, 250°C'lik sıcaklığa 1 ve 2 saat maruz bırakıldığında boyalı ve boyasız beton numunelerinin basınç dayanımlarında görülen azalmalar, sırasıyla %9 ve %16 ile %5 ve %11 oranlarındadır. Fakat aynı beton, 500°C'lik sıcaklığa 1 saat boyunca maruz bırakıldığında boyasız numunelerin basınç dayanımı %50 oranında düşmektedir. Diğer taraftan boyalı beton, boyasız betonla karşılaştırıldığında az bir oranda etkilenmiştir. Çakıl betonunun aynı sıcaklığa aynı süre boyunca tabi tutulması durumunda eğilme dayanımındaki azalma, basınç dayanımındaki azalmadan daha yüksek olmaktadır. 250°C'ye 2 ve 3 saat maruz bırakılan boyalı ve boyasız çakıl betonu numunelerinin

eğilme dayanımları büyük ölçüde etkilenmektedir. Çakıl betonu, 250°C'ye 1 saati aşkın bir süre maruz bırakıldığında dayanımdaki azalma oranı genellikle daha da artmaktadır.

Çizelge 2.5. Çeşitli sıcaklıklara ve ısıtılma sürelerine maruz bırakılan korunmuş ve korunmamış çakıl betonlarının maksimum mekanik özellikleri

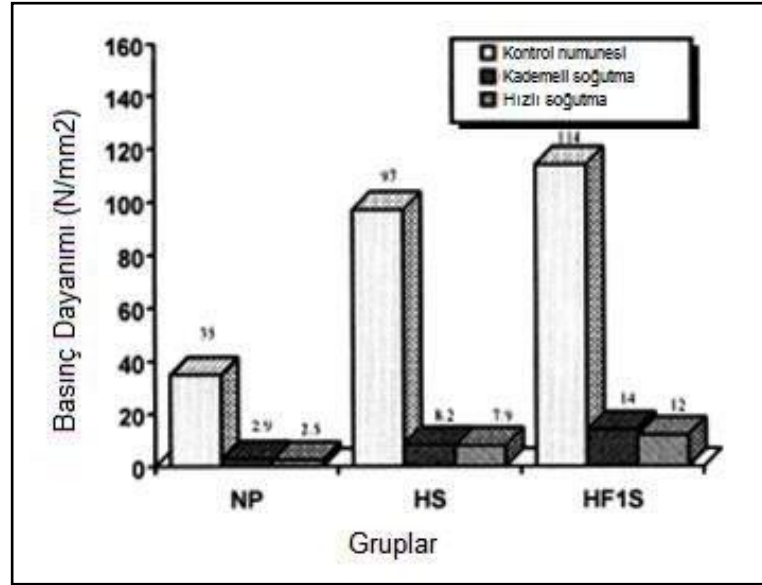
Çakıl betonunun mekanik özellikleri	Isıtılma Süresi (saat)	Sıcaklık						
		25 °C	250 °C	500 °C	750 °C	950 °C		
Basınç dayanımı (MPa)	Korunmamış	1	44	40.2	22.1	13.1	5.89	
		2	44	36.78	18.15	6.57	0.0	
		3	44	28.93	9.81	0.0	0.0	
	Korunmuş	1	44	41.69	26.0	14.22	6.87	
		2	44	39.24	23.55	7.85	0.0	
		3	44	32.37	13.73	2.95	0.0	
	Çekme dayanımı (MPa)	Korunmamış	1	2.55	1.96	0.98	0.59	0.11
			2	2.55	1.77	0.78	0.0	0.0
			3	2.55	1.37	0.39	0.0	0.0
Korunmuş		1	2.55	2.21	1.40	0.74	0.15	
		2	2.55	1.91	1.0	0.42	0.0	
		3	2.55	1.52	0.66	0.0	0.0	
Eğilme dayanımı (MPa)		Korunmamış	1	3.43	2.71	1.01	0.30	0.10
			2	3.43	1.96	0.69	0.0	0.0
			3	3.43	1.21	0.59	0.0	0.0
	Korunmuş	1	3.43	2.95	1.72	0.70	0.10	
		2	3.43	2.45	1.42	0.30	0.0	
		3	3.43	1.42	0.78	0.0	0.0	
	Aderans dayanımı (MPa)	Korunmamış	1	5.4	2.75	1.37	0.60	0.10
			2	5.4	2.35	0.98	0.15	0.0
			3	5.4	1.77	0.59	0.0	0.0
Korunmuş		1	5.4	2.95	1.67	0.80	0.15	
		2	5.4	2.16	1.13	0.17	0.0	
		3	5.4	1.47	0.69	0.0	0.0	

500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 1 saatlik periyot için yüksek dayanımlı boyalı ve boyasız çakıl betonu numuneleri, zamanla basınç dayanımlarını kaybetmiş ve bu dayanımları, oda sıcaklığındaki basınç dayanımlarının yaklaşık %55'ine kadar düşmüştür. Genellikle betonun mekanik özellikleri (basınç, çekme, eğilme ve aderans dayanımları), ısıtılma sıcaklıkları (>500 °C) veya yangın süreleri (>1 saat) ters orantılıdır (Sakr and El-Hakim 2005).



Şekil 2.13. 800°C'lik sıcaklıktan önce ve sonraki 90 günlük basınç dayanımları

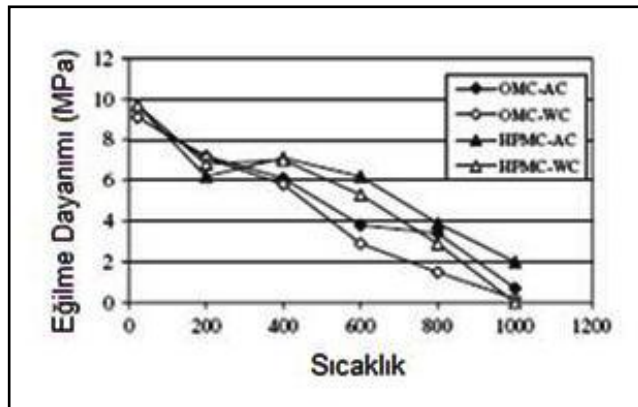
Şekil 2.13'de gösterildiği gibi HPC'nin basınç dayanımı, NSC'ye göre çok daha keskin bir şekilde düşmektedir. Standart kür edilmiş numune olarak söz edilen kontrol numunesi, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmadan ve 90 günlük iken teste tabi tutulmuştur. Sıcaklığın 800°C'ye ulaşmasıyla HPC'deki artık dayanım yüzdesi, yavaş soğutma için %26–34 ve hızlı soğutma için %22–28 arasında çıkmıştır. Maksimum sıcaklığın 1100°C olması durumunda ise, HPC'deki artık basınç dayanımı, yavaş soğutma için %8–12 ve hızlı soğutma için %8–10 civarında olmuştur. Bu durum, soğutma rejimlerinin basınç dayanımı üzerinde oldukça küçük bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca daha yüksek maksimum sıcaklıklara maruz kalan betonlarda soğutma hızı etkisinin daha az olduğu da gözlenmiştir (Chan *et al.* 2000).



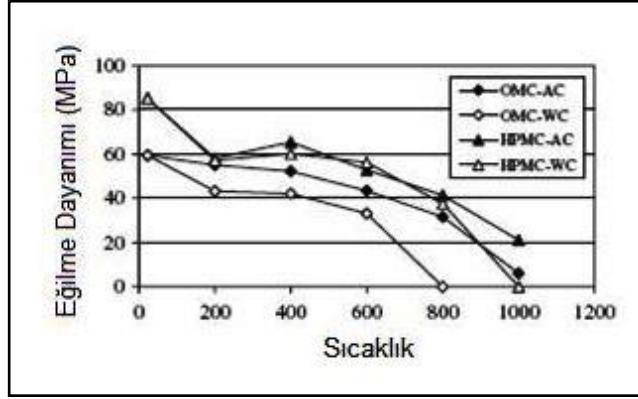
Şekil 2.14. 1100°C'lik sıcaklıktan önce ve sonraki 90 günlük basınç dayanımları

2.2.3. Soğutma şekli

Sıcaklıkla HPMC ve OMC betonlarındaki eğilme ve basınç dayanımı değişimleri, Şekil 2.15'de, mikro-betonların basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi ise Şekil 2.16'da verilmiştir. Bu şekillerde sıradan mikro beton OMC, yüksek performanslı mikro beton HPMC, havada soğutma (AC), suda soğutma ise (WC) şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 2.15. Eğilme dayanımının sıcaklığa bağlı olarak değişimi



Şekil 2.16. Basınç dayanımının sıcaklığa bağlı olarak değişimi

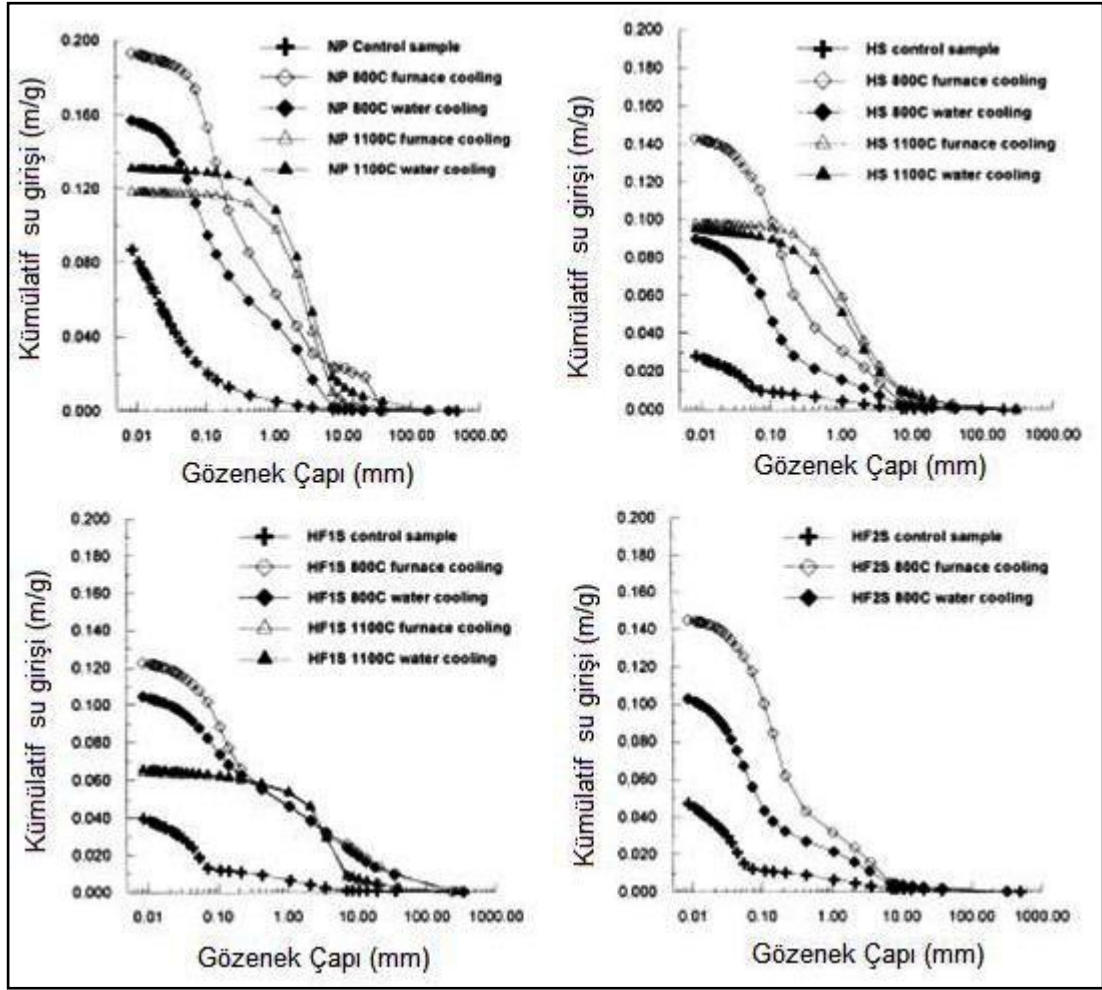
Farklı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra havada soğutulan OMC'nin eğilme dayanımı, referans numunelerinin eğilme dayanımlarına göre düşüktür. 200°C'de %21, 400°C'de %33, 600°C'de %58 ve 800°C'de %63. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra suda soğutulan OMC'nin eğilme dayanımı da referans numunelerine göre daha düşüktür. 200°C'de %22, 400°C'de %36, 600°C'de %68 ve 800°C'de %84. Havada soğutulan OMC'nin basınç dayanımı, referans numunelerine kıyasla yine daha düşüktür. 200°C'de %7, 400°C'de %12, 600°C'de %27 ve 800°C'de %47. Suda soğutulan OMC'nin basınç dayanımı da, referans numunelerine göre aynı şekilde daha düşüktür. 200°C'de %27, 400°C'de %29, 600°C'de %44. Çünkü numuneler, suda ayrıışmış ve 800 ve 1000°C'lik sıcaklıklarda numuneler üzerindeki basınç testleri tamamlanamamıştır.

Farklı sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra havada soğutulan HPMC'nin eğilme dayanımı, referans numunelerine kıyasla daha düşük olmaktadır. 200°C'de %36, 400°C'de %27, 600°C'de %36, 800°C'de %60 ve 1000°C'de %71. Farklı sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra suda soğutulan HPMC'nin eğilme dayanımı, referans numunelerine kıyasla daha düşük olmaktadır. 200°C'de %30, 400°C'de %28, 600°C'de %45, 800°C'de %70. Çünkü numuneler, suda ayrıışmış ve bu nedenle 1000°C için eğilme testleri tamamlanamamıştır. Havada soğutulan HPMC'nin basınç dayanımı, referans numunelerine kıyasla yine daha küçüktür. 200°C'de %32, 400°C'de %23,

600°C'de %26, 800°C'de %51 ve 1000°C'de %75. Suda soğutulan HPMC'nin basınç dayanımı da, referans numunelerine kıyasla aynı şekilde daha düşük olmaktadır. 200°C'de %33, 400°C'de %29, 600°C'de %34, 800°C'de %56. Çünkü numuneler, suda ayrılmış ve bu nedenle numuneler üzerinde 1000°C için basınç testleri tamamlanamamıştır.

Bu şekillerden de anlaşılacağı gibi, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra havada ve suda soğutulan yüksek performanslı betonun eğilme ve basınç dayanımları, referans numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları ile karşılaştırıldığında 200°C'ye kadar bir düşüş göstermektedir. 200–400°C sıcaklık aralığında ise dayanım, belirli bir artış gösterdikten sonra hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu azalmanın miktarı, suda soğutulmuş numunelerde daha fazla olmaktadır. Sıradan betonun eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalmalar, yüksek performanslı beton dayanımlarıyla karşılaştırıldığında çok daha yüksektir. Bu göstermektedir ki; yüksek sıcaklık etkilerine karşı yüksek performanslı beton daha dayanıklıdır. Bununla birlikte 600°C'nin üzerinde her iki beton tipinin dayanımındaki azalma, hızlı bir şekilde artmaktadır. Bunun sebebi, 300°C sıcaklığa kadar betonun agrega ve harç fazlarında önemli bir değişiklik olmaması ve buna karşın sıcaklığın 300°C'yi aşmasıyla agrega ve harç fazlarında ciddi değişimlerin ortaya çıkmasıdır. Bu sonuçlar, geçmişte yapılmış çeşitli araştırma çalışmalarından elde edilen sonuçlara uymaktadır (Husem 2006).

Farklı soğutma yöntemlerinin farklı sıcaklıklardaki farklı ısıtma süreleri için koruyucu boya ile boyanmış ve boyanmamış çakıl betonu üzerindeki etkileri Sakr ve El-Hakim (2005) tarafından yapılan çalışmada da incelenmiştir. Bu çalışmada 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kaplama malzemesinin basınç dayanımı üzerinde herhangi bir önemli etkisi olmamıştır. Fakat suyla soğutma, hava veya köpük ile soğutmaya kıyasla betonun basınç dayanımında daha büyük azalmalara yol açmıştır. Çünkü su yardımıyla soğutmak, betonun özelliklerinde büyük hasarlara neden olmaktadır (Sakr and El-Hakim 2005).

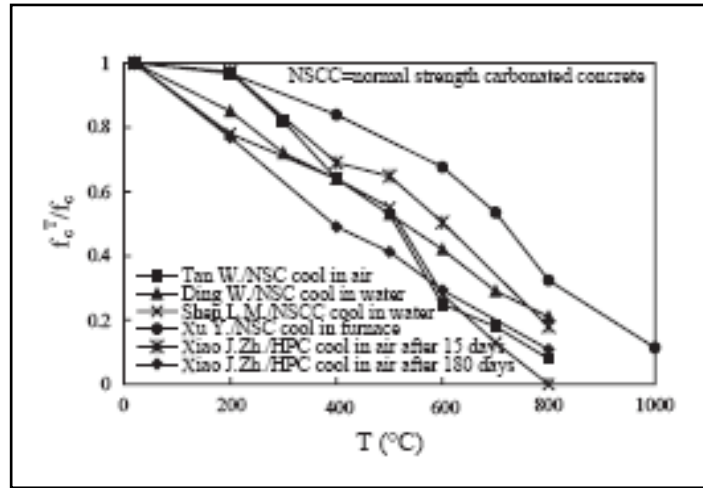


Şekil 2.17. Yüksek sıcaklıklardan önce ve sonraki kümülatif gözenek hacimleri

Şekil 2.17, farklı sıcaklıklara ve farklı soğutma rejimlerine maruz bırakılan farklı dayanım sınıflarındaki betonlarda ortaya çıkan kümülatif gözenek hacim dağılımındaki değişimleri vermektedir. 1100°C'ye maruz kalan numunelerde farklı soğutma rejimlerinin yaptığı etkinin, 800°C'ye maruz kalan numunelere kıyasla daha az belirgin olduğu gözlenmiştir.

1100°C'ye maruz kalan betondaki toplam porozitenin, 800°C'ye maruz kalan betona göre daha küçük olduğu görülebilmektedir. Bununla birlikte 1100°C'deki betonun sahip olduğu dayanım, 800°C'deki betona göre çok daha düşük olmaktadır. Bu test sonucu,

daha düşük poroziteye sahip betonların daha yüksek dayanımlara sahip olduğunu gösteren birçok modelle uyuşmamaktadır. Bu durum, sinterleşme etkisine, yani betondaki çimento hamuru ve agregaların yüksek sıcaklıklar altında erimesine bağlanabilir. Sinterleşmeye maruz kalan betonun bileşimi ve mikro-yapısı, sinterleşme olayından öncesine göre oldukça farklıdır. Bundan dolayı, 1100°C gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra porozite vasıtasıyla betonun sahip olduğu dayanımı değerlendirmek yeterli olmamaktadır (Chan *et al.* 2000).

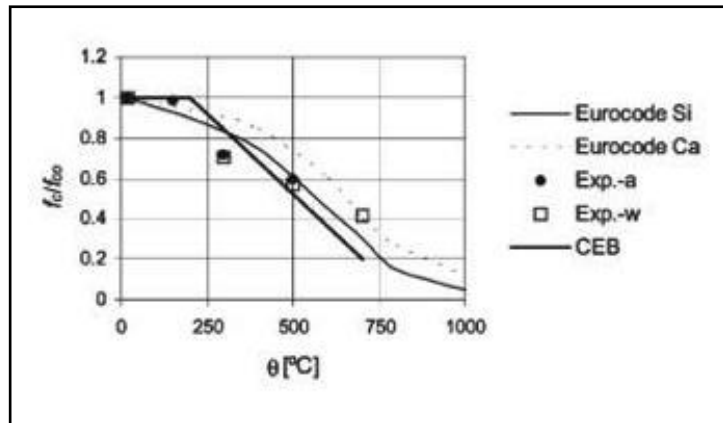


Şekil 2.18. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra farklı soğutma rejimlerine tabi tutulan betonun basınç dayanımı

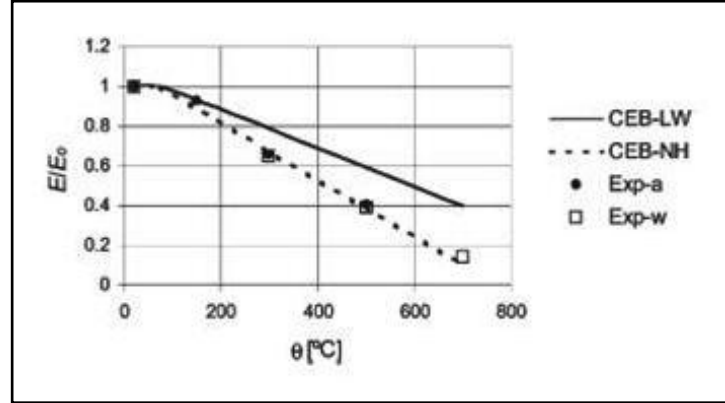
Yangına maruz kaldıktan sonra çeşitli soğutma rejimlerine tabi tutulan betona ait eksenel basınç dayanımı-sıcaklık eğrileri Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Sıcaklık arttıkça, betonun basınç dayanımı, tekdüze bir şekilde azalma göstermektedir. 400°C'nin altındaki dayanım azalma oranı, bu değer üzerindeki sıcaklıklara kıyasla daha düşüktür. Betonun yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımının, bu sıcaklık değerine maruz kaldığı andaki basınç dayanımına göre biraz daha düşük olduğu sonucuna varılabilir. Soğutma şeklinin etkileri de Şekil 2.18'den gözlemlenebilir. 400°C'nin altındaki sıcaklıklarda suyla soğutulan betondaki dayanım kaybı, havada soğutulan betona kıyasla daha büyüktür. Bununla birlikte 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda soğutma tipinin etkisi kaybolmaktadır. Suyla soğutma durumunda

sıcaklığın keskin bir şekilde düşmesiyle (örneğin soğuk su) birlikte dayanımdaki hasar daha fazla olmaktadır. Bazı çimento tanelerinin suyla hidrate olması nedeniyle dayanım daha sonraları bir miktar artış gösterebilmektedir. Buna karşın havada soğutulan betonun dayanımı, belirli bir zaman periyodu boyunca azalmaya devam edecek ve daha sonra yavaş bir şekilde dayanımda az bir miktar iyileşme ortaya çıkacaktır. Fırın içinde soğutma durumunda ise betondaki dayanım kaybı en düşük seviyede gerçekleşmektedir. Karbonatlı betonun suyla soğutulması durumunda ise sıcaklık 500°C'nin üzerine çıktığında dayanımdaki azalma daha büyük olmaktadır. Buna göre yaşlı (karbonatlı) betonarme binalardaki yangınların suyla söndürülmesi en uygun yaklaşım olacaktır. Şekil 2.19'dan görülebileceği gibi YFC içeren HPC'nin basınç dayanımı, zaman geçtikçe azalmaya devam etmektedir (Xiao and König 2004).

Hızlı soğutulan numunelerdeki dayanım kayıpları, yavaş soğutulanlara kıyasla daha büyük çıkmıştır. Bu etkinin nedeni, yüksek sıcaklıkların neden olduğu bozulmaya ek olarak numunelerin hızlı bir şekilde soğutulmasının suyla temas eden çimento hamurunun yeniden hidrasyonu tarafından karşılanamayacak termal şoklara yol açmasıdır. Bu tip bir soğutma rejiminin elastisite modülü üzerindeki etkisi ise çok büyük olmamaktadır.



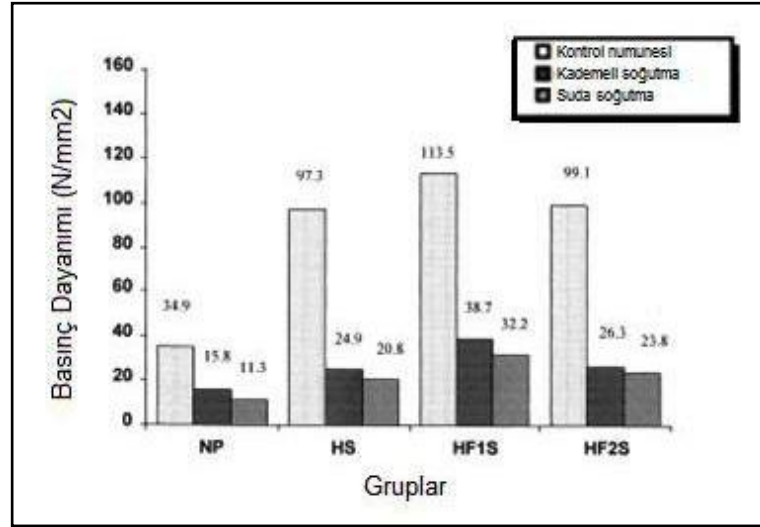
Şekil 2.19. Maruz kalınan maksimum sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan dayanım değişimi



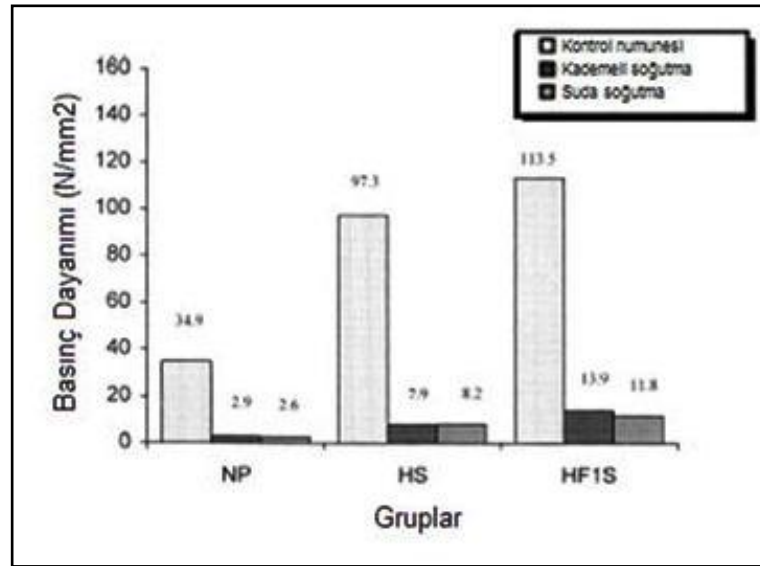
Şekil 2.20. Maruz kalınan maksimum sıcaklığa bağlı olarak ortaya çıkan elastisite modülü değişimi

Gözlenen dayanım kaybı ve rijitlik bozulmaları, Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de gösterildiği gibi CEB ve Eurocode’daki verilerle karşılaştırılmıştır. LEMIT yardımıyla elde edilen sonuçların, belirtilen şartnamelerdeki eğrileri genel olarak izlediği söylenebilir (Luccioni *et al.* 2003).

NSC ve HPC’nin 800°C’ye ve fırında soğutma işlemine tabi tutulduktan sonra sahip olduğu artık dayanım ve gözenek yapısındaki nispi değişim, önceki bir çalışmada verilmiştir. Şekil 2.21’de gösterildiği gibi HPC’deki basınç dayanımı, NSC’ye kıyasla çok daha keskin bir şekilde azalmıştır.



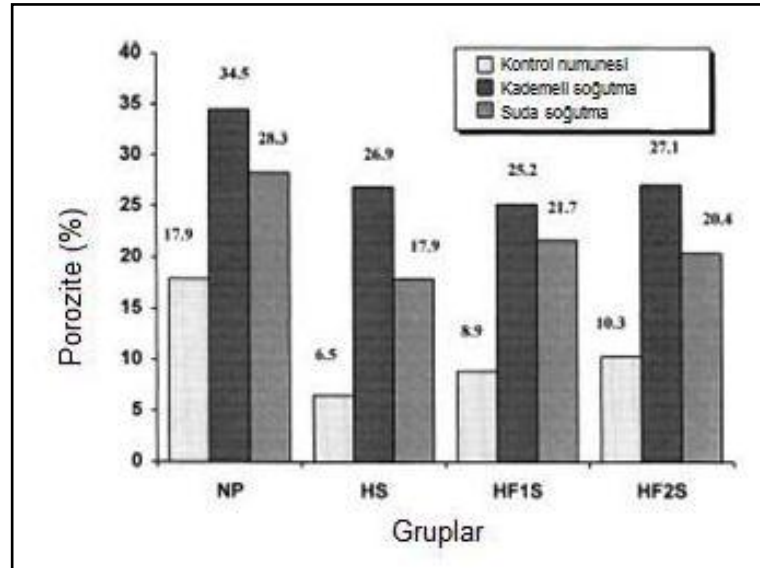
Şekil 2.21. 800°C'den önce ve sonraki basınç dayanımları



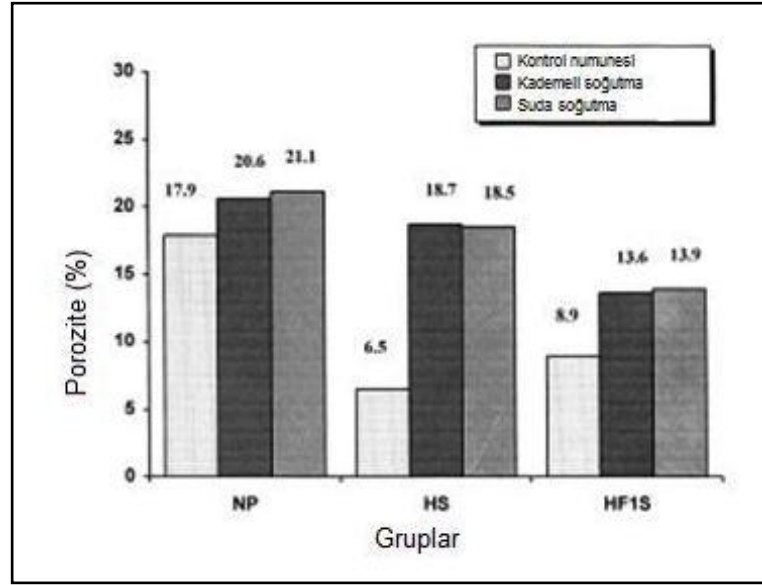
Şekil 2.22. 1100°C'den önce ve sonraki basınç dayanımları

800°C'ye maruz kaldıktan sonra üç grup HPC numunesinin sahip olduğu artık dayanım yüzdesi, fırında soğutma için %24,0–34,1 ve suda soğutma için %21,4–28,4 aralığındadır. Şekil 2.22'de gösterildiği gibi sıcaklığın 1100°C'ye ulaşmasıyla HPC'deki artık dayanım yüzdesi, fırında kurutma için %8,1–12,2 ve suda soğutma için %8,4–10,4 aralığında olmaktadır. Şu açıktır ki; soğutma rejimlerinin artık basınç dayanımı

üzerindeki, etkisi çok düşüktür. Üstelik betonun maruz kaldığı sıcaklık arttıkça soğutma oranının etkisi daha da azalmaktadır. Çelik fiber ilavesinin amacı, hızlı sıcaklık değişimi (ısıtma veya soğutma) nedeniyle betonda ortaya çıkan hacim değişimini engellemek ve böylece mikro-kusur oluşumlarını ve yayılımını azaltmaktır. Son zamanlarda yapılan çalışmalar, betonun yüksek sıcaklıklara maruz kalması durumunda betondaki çelik fiberin iyi bir performans gösterdiğini belirtmiştir. Örneğin; 800°C'ye ve fırında soğutma işlemine tabi tutulan fiber katkısız betonun (HS) artık dayanım yüzdesi %25,6 iken, fiber katkılı beton (HF1S) için bu değer %34,1 olmaktadır. Oda sıcaklığında ise HF1S'nin basınç dayanımı, HS'ye kıyasla %16,6 oranında daha yüksek çıkmaktadır. 800°C'ye ve fırında soğutma işlemine tabi tutulması durumunda ise HF1S'nin dayanımı, HS'ye göre %55,4 oranında daha yüksek olmaktadır. Bundan dolayı çelik fiberler, yüksek sıcaklığa maruz kalan betondaki bozulmayı belirli bir ölçüde azaltmaktadır. Bunun yanında polipropilen fiber ilavesi ise, betonun artık dayanımında ciddi bir azalmaya yol açmamaktadır (Luo *et al.* 2001).



Şekil 2.23. 800°C'den önce ve sonraki porozite



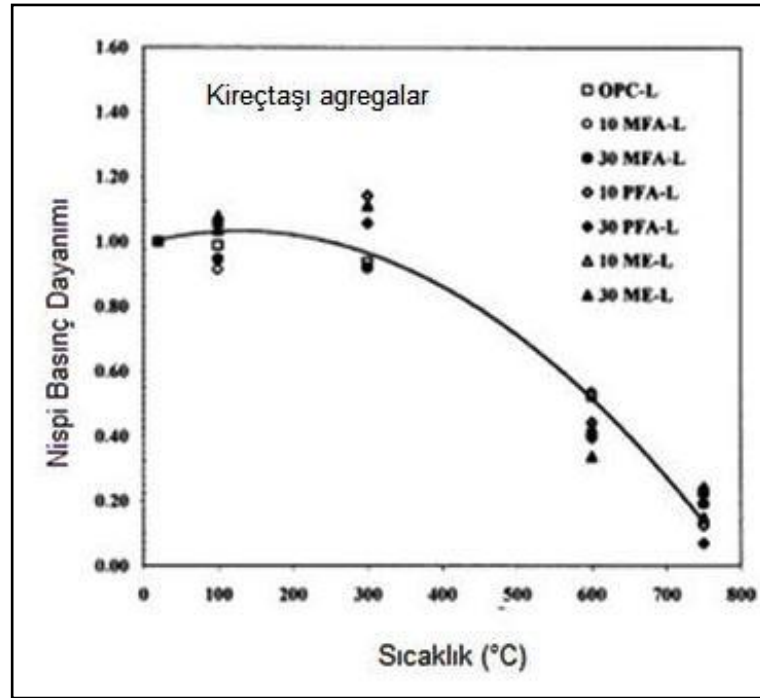
Şekil 2.24. 1100°C'den önce ve sonraki porozite

Şekil 2.23 ve Şekil 2.24'de NSC ve HPC'nin 800°C ile 1100°C'ye maruz kaldıktan sonra porozitelerinde meydana gelen değişim gösterilmiştir. NSC'ye kıyasla HPC'nin gözenek hacminde meydana gelen artış oranının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu, NSC'ye kıyasla HPC'de daha büyük bir dayanım azalmasına yol açan önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıklar altında betondaki sertleşmiş çimento harcının bozulması sonucu bileşenlerin yeniden hidrate olması nedeniyle suda soğutma, fırında soğutmaya kıyasla daha yoğun bir mikro-yapı oluşturmaktadır. Maksimum 800°C'lik sıcaklığa maruz kalınması durumunda HPC'nin porozitesinde başlangıçtaki poroziteye göre meydana gelen artış, fırında soğutma için %163,1–313,8 iken, suda soğutma için %98,1–175,4 oranlarında gerçekleşmiştir. 1100°C altında HPC'nin porozitesinde ortaya çıkan artış yüzdeleri ise, fırında soğutma için %52,8–187,7 ve suda soğutma için %56,2–184,6 civarında olmuştur (Luo *et al.* 2001).

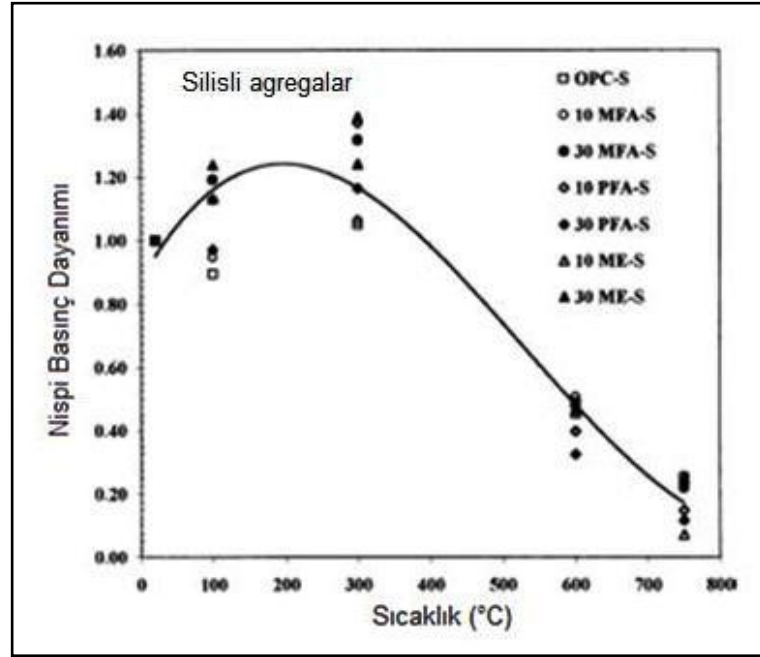
2.2.4. Agrega tipi

2.2.4.a. Kalkerli ve silisli agregalar

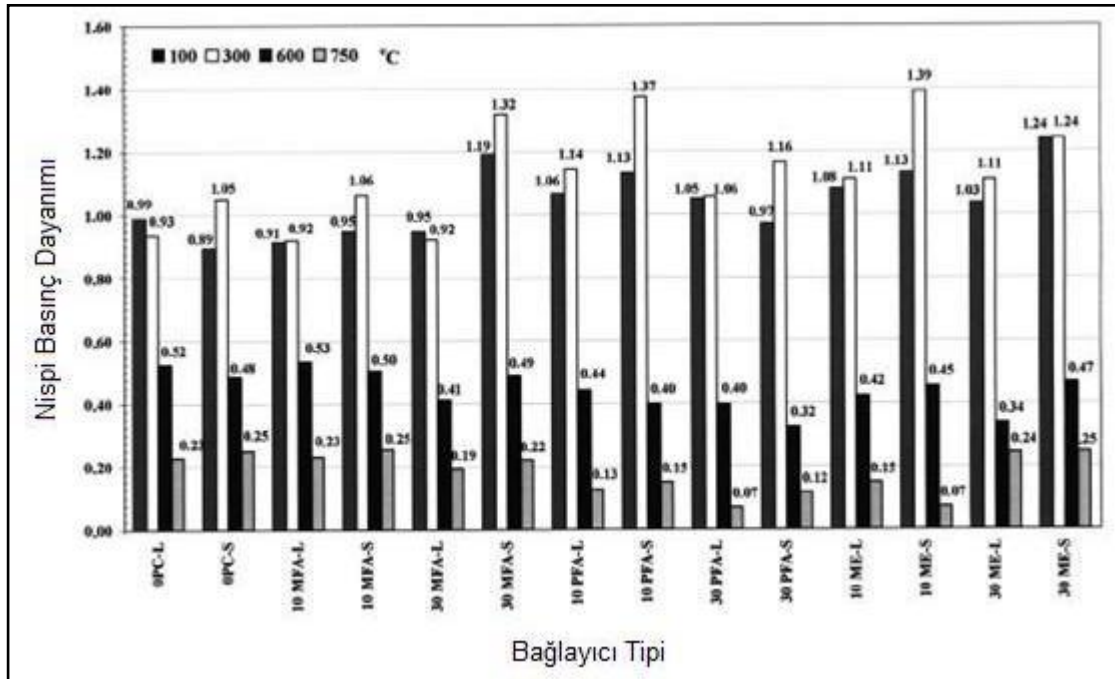
Farklı T sıcaklıklarına kadar ısıtılan betonun basınç dayanımı, f_r/f_{20} olarak ifade edilir. Buradaki f_r , T°C sıcaklıktaki dayanım, f^{20} ise 20°C'deki dayanımdır. f_r/f_{20} dayanım oranı, kireçtaşı ve silisli agregalar için sırasıyla Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da ve her iki agrega için de bağlayıcı tipine göre Şekil 2.27'de gösterilmiştir.



Şekil 2.25. Kireçtaşı betonunun nispi basınç dayanımı



Şekil 2.26. Silisli betonun nispi basınç dayanımı



Şekil 2.27. Bağlayıcı tipinin bir fonksiyonu olarak nispi basınç dayanımları

Dayanım kaybı bakımından 20–100°C, 100–300°C ve 300–750°C'lik üç sıcaklık aralığı vardır. Bu aralıkların her birinde meydana gelen dayanım kaybı farklıdır.

100°C'ye kadar ilk dayanım, bağlayıcı tipine bağlı olarak az miktarda değişmektedir. İlk dayanımlardaki değişim oranları, kireçtaşı betonlar için %-9 ile %-8 ve silis agregalı betonlar için %-3 ile %24 aralığındadır. OPC veya (%10) MFA içeren kireçtaşı betonların dayanımlarında sırasıyla %1 ve %9 oranlarında azalma görülmekte ve silisli betonlarda ise bu oranlar %11 ve %5 olmaktadır. Ayrıca kireçtaşı (%30) MFA numuneleri ile silis agregalı 30 PFA numunelerinin dayanımlarında sırasıyla %5 ve %3 oranlarında azalmalar olmuştur. Silis agregası içeren beton karışımlarının dayanımlarında ise artışlar görülmüştür. Bünyesinde kapiler su bulunduran betonlar ısıtıldıklarında çimento hamuru kurumakta ve serbest su dışarı çıkmaktadır. Atmosfer sıcaklığından 100°C'ye kadar beton dışına kaçan su, serbest sudur. Beton numuneler üç yaşındadır, bu nedenle bünyelerinde fazla miktarda serbest su ihtiva etmemektedirler ve incelenen beton karışımlarının aralarında önemli farklar bulunmamaktadır.

300°C'de dayanımdaki değişim aralığı, bağlayıcı tipine bağlı olarak kireçtaşı betonlar için %-8 ile %14 ve silisli agrega içeren betonlar için %5 ile %39 arasındadır. OPC veya (%10) MFA içeren betonların dayanımlarındaki değişimler aynıdır: kireçtaşı betonlar için %7–8'lik ufak bir artış ve silisli betonlar için %5–6'lık küçük bir azalma şeklindedir. Silisli diğer beton karışımlarında ilk dayanım, %16–39 oranında artarken, kireçtaşı betonlar için bu değerler sadece %6–14 civarındadır. Bu nedenle 300°C'ye kadar en iyi performansı, puzolanik betonlar ve silis agregalı betonlar göstermektedir. Buhar şeklinde uzaklaştırılan su, çimento hamurunun çevresindeki fazları etkilemektedir. Yüksek sıcaklık ve buhar akışına karşı gösterilen direnç nedeniyle su buharı, çimento hamurunda büyük bir basınç oluşturur. Sonuç olarak çimento hamurunun içinde bir otoklav durumu oluşmakta ve bu ise, hidrate olmamış çimento tanelerinin hidratasyonuna yol açmaktadır. OPC'deki Ca(OH)_2 ile puzolanik malzemedeki reaktif silika arasındaki reaksiyon sonucunda puzolanik malzemede ilave bir jel oluşur. Lea ve Straddling, 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda bir dayanım artışı

olduğuna işaret etmişlerdir. Bu dayanım artışı ise silisli agregalarla üretilen betonlarda görülmüştür. Bu olay, agrega ile çimento arasındaki aderansın daha güçlü olmasına bağlanabilir.

300 ile 600°C arasındaki sıcaklıklar altında beton dayanımında ortaya çıkan azalmalar daha fazla olmaktadır. Beton dayanımındaki azalmalar, kireçtaşı için %66–47 ve silisli agregalar için %68–51 aralığındadır. 300°C'nin üzerindeki sıcaklık bölgesi, Ca(OH)₂'nin bozunduğu bölgedir. Yaklaşık 600°C'de tüm numuneler, hemen hemen dehidrate olmuştur. Doğal puzolanlar (ME) ve kireçtaşı kullanılarak üretilen betonlarla silis agregalı PFA betonları, en yüksek dayanım kayıplarını göstermiştir (%58–68). Bu sıcaklıklarda OPC, her iki agrega için de daha iyi sonuçlar vermiştir. 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda test edilen tüm betonlar bozulmaya uğramış ve ilk dayanımlarının büyük bir kısmını (%75–93) kaybetmişlerdir. Bu durumda beton dayanımının ana kaynağı olan bağlayıcı da C-S-H jeli dehidratasyon göstermiş ve bağlayıcı, çimento özelliğini kaybetmiştir. Ayrıca bu sıcaklık altında kuvart dönüşümü (570°C) ve kireçtaşında dekarbonatlaşma olayı gerçekleşmiştir. Kireçtaşı kullanılarak üretilen betonların dayanımında az da olsa daha yüksek bir azalma meydana gelmiştir. Bu nedenle 300–750°C'lik sıcaklık aralığı, betonun dayanım kaybı açısından kritik aralık olarak kabul edilebilir (Savva *et al.* 2005).

2.2.4.b. Hafif agregalar

Hafif agregalar, doğal ve yapay olarak ikiye ayrılmaktadır.

a. Doğal hafif agregalar

Bu kategorideki başlıca agregalar diatomit, pomza taşı, volkanik cüruftür. Diatomit dışında bunların hepsi volkanik kökenlidir. Sadece belirli yerlerde bulunmaları nedeniyle doğal hafif agregalar yaygın bir şekilde kullanılmazlar.

Diatomit, diatom adı verilen ve silisli bir kabuğa sahip olan hafif agrega, deniz bitkisinin ve silisli artıkların birikmesiyle oluşmuş bir kayaç şeklidir. Çok yüksek poroziteye sahip, açık renkli ve taneli bir yapısı vardır.

Pomza (bims) açık renkli köpük benzeri volkanik bir camdır. Pomza volkanik olaylar sırasında doğal olarak genişmiş perlit olarak kabul edilebilir. Granülometrik dağılımının düzensizliği ve genişmeyen artık madde bakımından zengin oluşu gibi sakıncalarına rağmen tüm dünyada tüketimi 15 milyon ton/yıl düzeyindedir. Türkiye’de pomza yatak ve işletmeleri Niğde, Nevşehir, Van (Erciş) ve Bitlis (Tatvan)’da bulunmaktadır. Ayrıca Trabzon’dan özellikle de İran’dan boş dönen kamyonların Iğdır ve Aşkale’den getirip kullanıcılara sattıkları pomza agregasından briket ve diğer yapı taşları imal edilmektedir.

Birim hacim ağırlığı $500-900\text{kg/m}^3$ arasındadır. Pomza taşı ile yapılan betonlar $700-1400\text{ kg/m}^3$ arasında yoğunluklara sahiptir. Pomza taşı ile tatminkâr derecede dayanıklı betonlar elde edilebilir. Bu betonlar çok iyi yalıtkan su emme kabiliyetine sahip fazla rötre yapan betonlardır.

Pomza taşının Romalılar zamanından beri kullanıldığı bilinmektedir. Ergimiş lavın fişkırması sırasında açığa çıkan gazların hapsolmesiyle amorf yapılu pomza taşı parçacıkları oluşur. Bu nedenle agrega boşluklu ve hafiftir. Boşluklar yassı ve birbirine paraleldir. Boşluk miktarı %75 kadardır.

b. Yapay hafif agregalar

Suni hafif agregalar genellikle ticari adlarıyla anılırlar. Fakat en iyi sınıflandırma üretim metoduna göre yapılan sınıflandırmadır. Birinci grup ısı uygulamasıyla üretilmiş agregaları içerir (genleşmiş kil genleşmiş şist, perlit, vermikülit gibi). İkinci grup

YFC'nin özel bir soğutma işlemi ile geliştirilmesiyle elde edilir. Endüstriyel kül ve cüruflar ise üçüncü gruptadır.

Genleşmiş kil, şist ve cüruf, uygun bir döner fırında ergimeye başlayıncaya kadar ısıtılır ve açığa çıkan gazlardan dolayı ham madde, boşluklu bir yapı haline gelir. Bu boşluklu yapı birim hacim ağırlığının düşmesi için soğumaya bırakılır. Soğuyan kütle ya sonradan kırılır ya da önceden malzeme kullanılır. Genleştirme işlemi sinterleme ile de yapılabilir. Burada nemlendirilmiş malzeme sıcaklık artışı yavaş yavaş içine işlemesi için gezici ızgaralarla ocağın üzerinde gezdirilir.

Kırılmış malzemenin kullanılmasıyla parçacıkların üzerinde kabuk veya manto adı verilen bir tabaka oluşur. Bu yarı geçirimsiz bir tabaka ile kaplanmış küreye benzer parçacıklar, mantosuz parçacıklara göre daha düşük su emme kapasitesine sahiptir. Mantolu parçacıkların taşınması karıştırılması daha kolaydır ve üretilen betonların işlenebilirliği yüksektir. Fakat genellikle mantosuz agregalara göre daha yüksek fiyatlara sahiptirler.

Genleşmiş kil ve şist agregaları, sinterleşme metodu ile $650-900 \text{ kg/m}^3$ arasındaki yoğunluklara sahip olurlar. Bu agregalar, döner fırında üretildiklerinde ise ancak $300-650 \text{ kg/m}^3$ arasında bir yoğunluğa ulaşırlar. Bu malzemelerin kullanılmasıyla üretilen betonlar ise, $1400-1800 \text{ kg/m}^3$ arası yoğunluğa sahiptirler. Genleşmiş kil ve şist ile üretilen betonlar genellikle diğer hafif agregalar kullanılarak üretilen betonlara kıyasla yüksek dayanımlara sahip olmaktadır.

Perlit tabiatında bulunan silisli volkanik bir camdır. Perliti diğer volkanik camlardan ayıran en önemli özellik, yumuşama noktasına kadar ısıtıldığı zaman orijinal hacminin 4-20 misli genişlemesidir. Bu genişleme ham perlit kayasındaki % 4-6 oranındaki kombine sudan kaynaklanır. Yaklaşık 1000°C 'ye kadar ısıtıldığı zaman içinde bulunan suyun buharlaşmasından dolayı mısır gibi patlar ve böylece içinde hava kabarcıkları

mevcut olan hafif, beyaz ve ince bir agregaya meydana gelir. Türkiye’de üretilen tek suni agregaya olan perlit ile üretilen hafif betonlar genellikle düşük dayanımlıdır.

Perlit betonlarının sünme deformasyonları yüksektir. Gerek ısı yalıtımından gereğince faydalanmak, gerek taşıyıcılardaki donatının korozyonunu önlemek için bu betonların su ve neme karşı yalıtımı şarttır.

Perlit betonunun en önemli malzemesi olan genleştirilmiş perlit agregasının fiziksel özellikleri karışımın başarısını en çok etkileyen faktördür. Perlit agregası tanelerinin taşıma ve boşaltma sırasında ufalanması oldukça kolaydır. Ufalanma sebebiyle agreganın “su isteği” artabilmekte, gevşek birim ağırlığı artmakta ve sonuçta önceden belirlenmiş beton birim ağırlığının çok daha üstüne çıkmaktadır. Bu tür problemlerin yaşanmaması için alınan perlit torbalarının ağırlıklarını ölçmek yeterli olacaktır. Olması gerekenden ağır torbaların red kriteri olarak en çok $+5 \text{ kg/m}^3$ ’e müsaade etmek uygundur.

Perlit agregasının yoğunluğu $30\text{--}240 \text{ kg/m}^3$ arasındadır. Perlit ile yapılan betonlar düşük dayanımlı, fazla rötre yapan ve esas olarak yalıtım amacıyla kullanılan betonlardır.

Vermikülit, Amerika ve Afrika’da bulunan mika benzeri tabakalı bir malzemedir. $650\text{--}1000^\circ\text{C}$ aralığında ısıtıldığı zaman vermikülitin ince tabakalarının pul pul dökülmesiyle (eksfolidasyon) hacmi birkaç hatta bazen 30 kat artar. Sonuç olarak ekfolidasyona uğramış vermikülitin birim hacim ağırlığı $60\text{--}130 \text{ kg/m}^3$ arasındadır. Vermikülit ile yapılan betonlar çok düşük dayanımlı fazla rötre yapan, fakat mükemmel yalıtkan olan betonlardır.

Genleşmiş YFC, fırından çıktığında yaklaşık $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$ ’de eriyik durumdayken havada yavaş soğumaya bırakıldığında gri kristal yapılı, taş gibi bir malzeme haline dönüşmektedir. Genleştirilmiş YFC ise iki yolla üretilir. Birinci metotta fırından yeni çıkmış ergimiş cürufun içine belirli bir miktarda su püskürtülür. Sonuç olarak buhar açığa çıkar ve hala plastik kıvamda olan cürufun bünyesinde kabarcıklar meydana gelir

ve cüruf, bu boşluklu yapıda sertleşir. Pomza taşına benzer bir görünüm alır. Bu Su Jeti işlemidir. Makine işleminde ise ergimiş cüruf bir miktar su ile çabucak karıştırılır, kızgın su buharı ile cüruf bileşenlerinin bir kısmının kimyasal reaksiyonu sonucu çeşitli gazlar açığa çıkar ve bu gazlar elde edilen yapının boşluklu olmasını sağlar.

Yüksek fırın cürufları kireç, silis, alümin, demir, magnezi, manganoksit ve kükürt gibi maddelerden oluşmaktadır. Görüldüğü gibi yüksek fırın cüruflarını oluşturan oksitler portland çimentosunu oluşturan oksitlerle benzerlik göstermektedir, fakat farklı yüzdelere sahiptirler. Cüruf içerisindeki bu maddelerin yüzdeleri kullanılan hammaddelerin özelliklerine göre değişiklikler gösterir.

Genleşmiş cüruf soğutma işleminin detaylarına ve parçacıkların boyut ve granülometrisine bağlı olarak yoğunluğu $300\text{--}1100\text{ kg/m}^3$ civarında olur. Genleşmiş cüruf ile üretilen betonların yoğunlukları $950\text{--}1750\text{ kg/m}^3$ arasındadır.

Ayrıca yüksek fırından çıkan cüruf suda ani olarak soğutma işlemine tabi tutulursa elde edilen ürüne “Granüle YFC” denir. Ferrokrom cürufu bu tip bir cüruftur. Ferrokrom cürufu kullanılarak üretilen betonların birim hacim ağırlıklarında %17–20 civarında bir azalma oluşmaktadır. Ayrıca kullanılan çimento ile granüle cüruf ve kum miktarları değiştirilerek yalıtım, yarı taşıyıcı ve taşıyıcı hafif betonlar elde edilebilir. Elde edilen hafif betonlar $1300\text{--}1900\text{ kg/m}^3$ civarında yoğunluğa sahiptir.

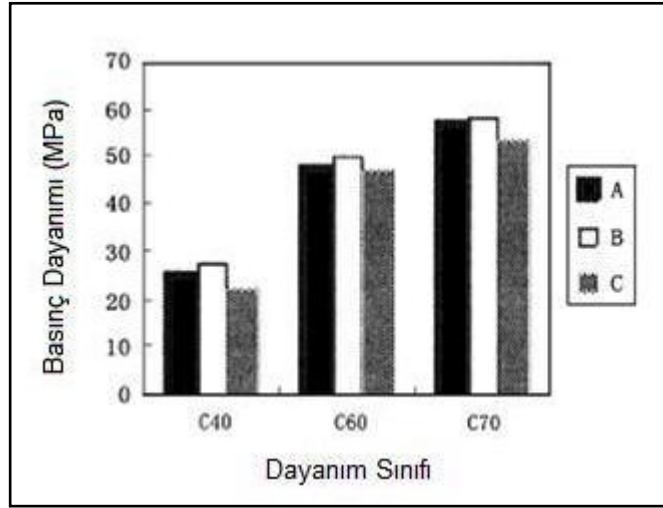
Klinker agregası, yüksek derecede yanmış endüstriyel yüksek sıcaklıklı fırın artıklarından elde edilir. Klinker agregasının betonun içinde genişip dayanıksızlığa neden olan yanmamış kömür çeşitlerinden ayrılmış olması çok önemlidir. Araştırmacılar klinker agregasının betonarme betonunda veya yüksek dayanıklılık gerektiren betonlarda kullanılmasını tavsiye etmemektedir.

Klinker agregası, ince ve kaba dane olarak kullanıldığında elde edilen betonlar 1100–1400 kg/m³ arasında yoğunluğa sahiptir. Fakat sık sık karışımın işlenebilirliğini arttırmak için doğal kum kullanılır. Bu şekilde üretilen betonlar 1750–1850 kg/m³ arasında yoğunluğa sahiptir. Günden güne pratikteki değeri artan hafif beton imalinde kullanılan UK'ün en önemli özelliği hafif olmasıdır. Yıllardır hafif agregada denilince akla fırın klinkeri geliyordu. Daha sonra doğal pomza ve YFC, son yıllarda ise geliştirilmiş kilden yapılmış hafif agregalar kullanılmaya başlanmıştır. Sinterleştirilmiş UK'den üretilen hafif agregalar 1950'lerde geliştirilmeye başlanmış ve beton yapımında en çok kullanılan agregada tipi olarak ortaya çıkmıştır. Düşük kalorili olmaları nedeniyle endüstride yakıt olarak kullanılmayan kömür artıkları toz halinde yakılarak elektrik enerjisi üretiminde kullanılmaktadır. Bu kömürlerin dane çapları 0,2–0,5 mm. dolaylarındadır. Kül oranları da oldukça yüksektir. Bu kömürler, termik santrallerde su ile fırın içine püskürtülerek yakılmaktadır. Termik santralin tipine göre 1100–1600°C sıcaklıkta yakılan bu kömürlerin %10–20'si kazan altına düşerek su ile uzaklaştırılır. Buna kazan altı cürufu denir. Geriye kalan daha ince partiküller baca çekimi ile taşınarak siklon veya elektro filtrelerde toplanır. Baca gazları ile sürüklenen ve hava ile temas ederek ani soğuma ile puzolanik özellik kazanan bu küllere UK denir. Bu kül parçacıklarının çapları 1–10 mikron arasındadır. Hafif olmaları nedeniyle bu isim verilmiştir. UK ile hafif agregada üretimi ana hatları şöyle özetlenebilir; UK'ler 1100–1200°C arası sıcaklıkta yakıldığı zaman tanecikler eriyerek birbirine yapışır, yuvarlak biçiminde olan bu taneler hafif olmakta ve iyi bir mekanik dayanım göstermektedir. Ergiyerek yapışma olayına sinterleşme denir. Elde edilen agregalar yuvarlak biçimdedir ve hafif agregada olarak kullanılırlar.

2.2.5. Betondaki nem içeriği

Lau ve Anson (2006) tarafından yapılan çalışmada betonun yüksek sıcaklıklara ısıtılma sonrasındaki basınç dayanımı ile doygunluk yüzdesi arasındaki ilişki incelenmiştir. Maruz kalınan farklı maksimum sıcaklıklar için doygunluk oranı arttıkça, neredeyse her zaman basınç dayanımında ufak bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Bu

nedenle yangın testi sırasında beton numunelerin nemi, basınç dayanımını etkilediği belirtilmiştir. Daha yüksek nem içeriğine sahip beton numuneler, ilave küçük bir dayanım kaybına maruz kalmaktadır. Dayanımdaki bu kaybın nedeni, boşluk yapısında lokal hasara sebep olan boşluklardaki iç basınç etkileridir (Lau and Anson 2006).



Şekil 2.28. Betonun 800°C'ye kadar ısıtılmasının ardından su içeriğinin basınç dayanımı üzerindeki etkisi

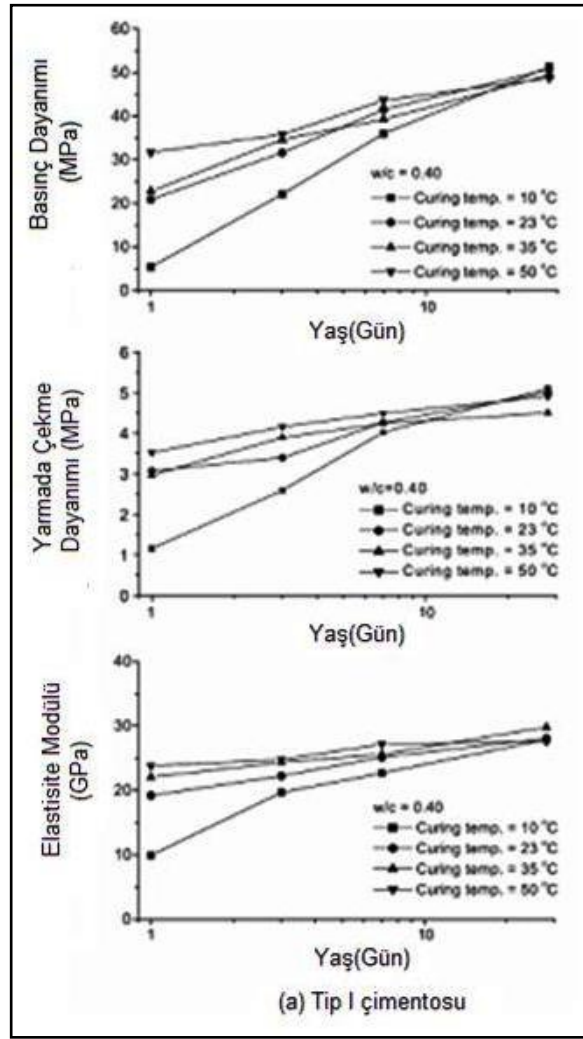
Betonun 800°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra sahip olduğu basınç dayanımı, Şekil 2.28'de gösterilmiştir. Etiket A, yangın etkisinden önce sabit ağırlıklarına kadar 105°C'de kurutulan numuneleri; Etiket B, tipik numuneleri; Etiket C ise, yangın testinden önce 48 saat boyunca suda bekletilen numuneleri ifade etmektedir.

Şekil 2.28, farklı su içeriklerinin betonun yüksek sıcaklık sonrasındaki dayanım değerlerini etkilediğini göstermektedir. HSC'nin yoğun içyapısı nedeniyle buharın yüksek sıcaklık altında beton dışına çıkması oldukça zordur. Bunun sonucunda beton yüzeyinde çatlamalara neden olan buhar basıncı ortaya çıkmaktadır. Daha sonraları ise, beton özellikleri daha da kötüleşmektedir (Li *et al.* 2004).

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, çevresel faktörler (beton bileşenleri, yüksek sıcaklıktan önceki dayanım, nem içeriği vs.) kadar malzemeye de bağlıdır. Özellikle yüksek sıcaklığa maruz kalan HPC’de malzemedeki nem içeriği veya malzeme yapısı, en önemli faktörlerden biridir. Çünkü patlama olayı, beton içindeki su buharı transferini ve buharın beton dışına salıverilmesini zorlaştıran yoğun mikro-yapı nedeniyle meydana gelmektedir. Nem içeriğinin artması, HPC’deki patlama eğilimini ve olasılığını da artırmaktadır (Chan *et al.* 2001).

2.2.6. Bağlayıcı tipi

Şekil 2.29, Tip I çimentolu betondan elde edilen deneysel sonuçları göstermektedir. Şekil 2.30’den görülebileceği gibi artan kür sıcaklığı ile birlikte 1 ve 3 günlük basınç dayanımları da artmaktadır. Bununla beraber bu eğilim, artan yaşla birlikte tersine dönmektedir. 10°C’de kür edilen 0,40 s/ç oranına sahip betonun 28 günlük basınç dayanımı en büyük iken, 50°C’de kür edilen betonun basınç dayanımı ise en küçük olmaktadır. Bu sonuçlar, erken yaşlarda yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun daha yüksek basınç dayanımına ulaştığını, buna karşın ileriki yaşlarda ise basınç dayanımının düştüğünü göstermektedir. Bu olay “köprü etkisi” olarak ifade edilmektedir. Aynı olay, artan kür sıcaklığı ile birlikte yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülünde de ortaya çıkmaktadır. Buna karşın elastisite modülündeki köprü etkisi, basınç dayanımındaki kadar belirgin değildir. Bunun nedeni, basınç dayanımı ile elastisite modülünün sahip olduğu artış oranlarının farklı olmasıdır.

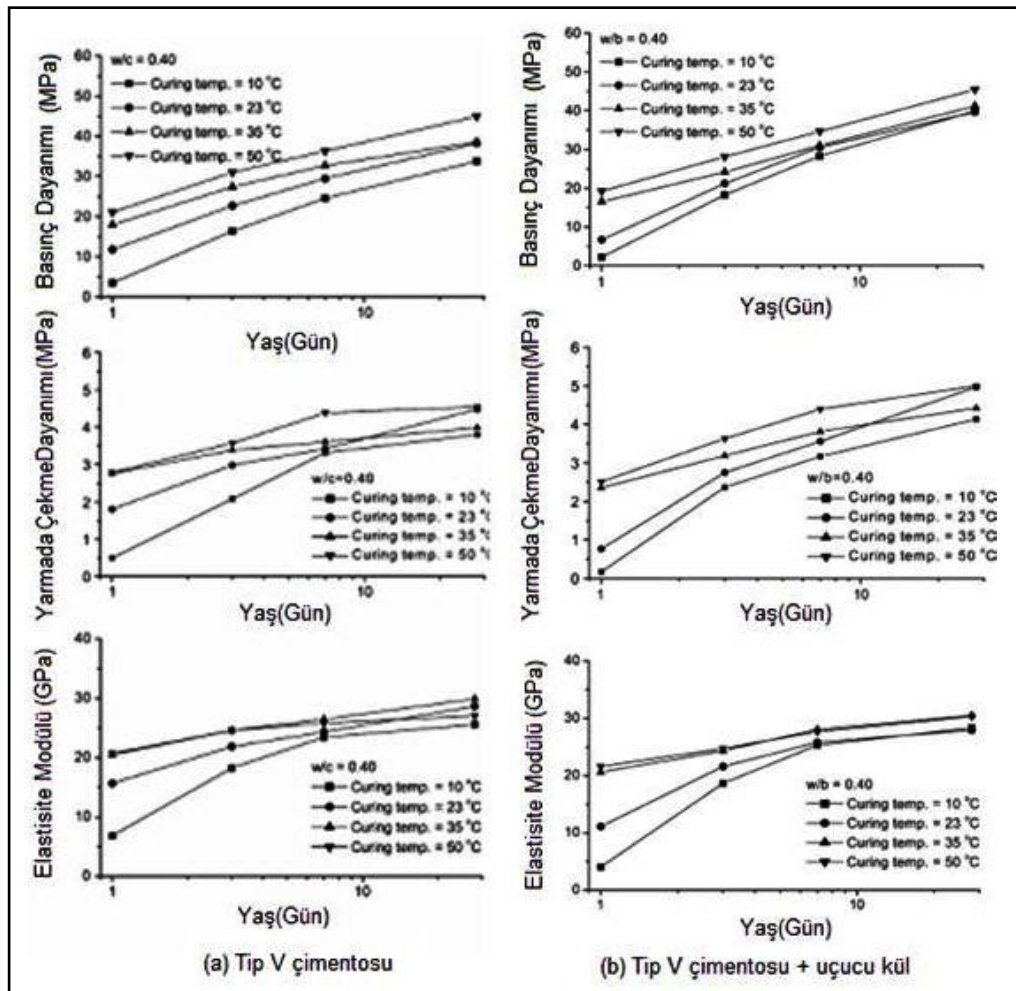


Şekil 2.29. Tip I çimentolu betona ait deneysel sonuçlar

Normal sıcaklık altında kür edilen 3 günlük betonun basınç dayanımı, 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %50–60'ı kadardır. Bununla birlikte 3 günlük betonun sahip olduğu elastisite modülü ise, 28 günlük elastisite modülünün %80–90'ı kadar olmaktadır. Betonun erken ve ileriki yaşlarında sahip olduğu elastisite modülleri arasındaki farkın basınç dayanımları arasındaki farka kıyasla daha küçük olması nedeniyle ileriki yaşlardaki elastisite modülünde meydana gelen köprü etkisi, ileriki yaşlardaki basınç dayanımı kadar belirgin olmamaktadır. Çizelge 2.6, 0,40 ve 0,50 s/ç oranlarına sahip betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modüllerine ait deneysel sonuçları göstermektedir (Kim *et al.* 2002).

Çizelge 2.6. Tip I çimentolu betonun deneysel sonuçları

	Basınç Dayanımı (MPa)				Yamada Çekme Dayanımı (MPa)				Elastisite Modülü (GPa)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
<i>w/c = 0.40</i>												
10 °C	5.4	22.1	36.0	51.3	1.2	2.6	4.0	5.1	10.7	21.2	24.4	30.0
23 °C	20.9	31.6	41.5	50.8	3.0	3.4	4.2	5.0	20.7	23.9	27.1	30.2
35 °C	22.8	34.6	39.2	49.4	2.9	3.9	4.2	4.5	23.7	26.2	27.6	32.1
50 °C	31.7	35.8	43.6	48.7	3.5	4.1	4.5	4.9	25.6	26.7	29.2	29.7
<i>w/c = 0.50</i>												
10 °C	3.5	14.3	24.7	36.9	0.6	2.2	3.1	4.2	9.1	19.2	23.4	27.6
23 °C	9.4	23.4	31.5	42.4	1.8	2.9	3.8	4.7	16.9	25.0	26.4	28.8
35 °C	17.1	24.2	33.1	41.3	2.5	3.4	3.9	4.2	20.7	24.5	26.5	29.1
50 °C	19.8	28.1	34.6	39.3	2.6	3.5	3.9	4.4	22.3	24.9	27.0	30.1



Şekil 2.30.(a)-(b) Tip V çimentolu beton ile Tip V+UK betonuna ait deneysel sonuçlar

Şekil 2.30 (a) ve (b), Tip V çimentolu beton ile Tip V+UK betonuna ait deneysel sonuçları göstermektedir. Şekil 2.30(a)'dan da görülebileceği gibi 1 ve 7 günlük betonun dayanımı ile elastisite modülleri artan kür sıcaklığı ile beraber artmaktadır. Fakat 23°C'de kür edilen betonların 28 günlük basınç dayanımı ile elastisite modüllerindeki artış oranı, 35°C'de küre edilen betonlara kıyasla daha büyük çıkmaktadır. Tip I çimentolu betonlarla karşılaştırıldığında Tip V çimentolu betondaki köprü etkisi, çimento tiplerinin hidrasyon oranları arasındaki fark nedeniyle o kadar da belirgin değildir. Tip V çimentolu betonun hidrasyon oranı, Tip I çimentolu betona kıyasla daha yavaştır ve bu nedenle Tip V çimentolu betondaki köprü etkisi gecikmektedir. Ayrıca test edilen yaşlardaki Tip V çimentolu betonda meydana gelen köprü etkisi, Tip I çimentolu betondaki kadar belirgin olmamaktadır. Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8, su/bağlayıcı oranları sırasıyla 0,40 ve 0,50 olan Tip V çimentolu beton ile Tip V+UK betonuna ait deneysel sonuçlar vermektedir. Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8'den görülebileceği gibi 0,40 ile 0,50 su/bağlayıcı oranına sahip betonlar, aynı eğilimi göstermektedir (Kim *et al.* 2002).

Çizelge 2.7. Tip V çimentolu betonun deneysel sonuçları

	Basınç Dayanımı (MPa)				Yamada Çekme Dayanımı (MPa)				Elastisite Modülü (GPa)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
w/c= 0.40												
10 °C	3.4	16.4	24.5	33.8	0.5	2.1	3.3	3.9	6.9	18.2	23.4	25.6
23 °C	11.8	22.7	29.4	38.2	1.8	2.9	3.4	4.5	15.7	21.9	24.3	28.6
35 °C	17.9	29.4	32.7	38.5	2.8	3.4	3.6	4.0	20.5	24.6	26.5	29.9
50 °C	21.0	38.2	36.3	44.9	2.8	3.5	4.4	4.5	20.7	24.6	25.8	27.1
w/c= 0.50												
10 °C	2.3	10.9	17.2	24.7	0.3	1.5	2.2	2.9	3.5	14.1	18.4	22.5
23 °C	7.1	17.2	22.3	30.7	1.1	2.5	3.0	3.9	12.5	19.8	23.5	26.8
35 °C	10.2	17.3	21.9	28.6	1.8	2.5	2.8	3.6	14.2	19.9	22.3	27.9
50 °C	10.3	17.4	22.5	27.1	1.6	2.6	3.0	3.5	16.0	19.2	22.9	24.6

Çizelge 2.8. Tip V çimentosu+UK betonunun deneysel sonuçları

	Basınç dayanımı (MPa)				Yarmada çekme dayanımı (MPa)				Elastisite modülü (GPa)			
	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days	1 day	3 days	7 days	28 days
<i>w/c= 0.40</i>												
10 °C	2.2	18.2	28.2	39.9	0.2	2.4	3.1	4.1	4.0	18.6	25.3	28.3
23 °C	6.7	21.1	30.5	39.6	0.8	2.8	3.5	5.0	11.1	21.6	25.8	28.0
35 °C	16.5	24.1	31.0	41.2	2.4	3.2	3.8	4.4	20.6	24.3	28.0	30.5
50 °C	19.2	28.1	34.6	45.4	2.6	3.6	4.4	5.0	21.6	24.7	27.7	30.3

2.2.7. Koruyucu örtü

Betonarme ve öngerilmeli beton elemanların yangın dayanımı her şeyden önce donatıyı örten koruyucu betona (paspayı) bağlıdır. Aşağıda verilen deneysel sonuçlar, betonun yangın dayanımının koruyucu örtü kullanımıyla sağlanmasının diğer önlemlerden daha pratik ve daha etkili olduğunu göstermektedir.

- 10 mm'lik betona eşdeğer 15 mm'lik kireçtaşı sıvası
- 10 mm'lik betona eşdeğer 5 mm'lik vermikülit sıvası
- 1–2 saatlik yangın için 2 cm'lik alçı sıva (3 cm'lik beton örtü kalınlığına eşdeğer)
- 3–4 saatlik yangın için 3 cm'lik alçı sıva (5 cm'lik beton örtü kalınlığına eşdeğer)

Alçının betonarme yapıları yangına karşı en iyi koruyucu malzeme olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan 1400°C'lik endüstri fırınlarının betonarme cidarlarının 4–6 cm. kalınlığında ateşe dayanıklı tuğlalar ile kaplanarak korunduğu da bilinmektedir.

Çizelge 2.9. Betonarme kirişlerde yangın sürelerine göre beton örtü kalınlıkları

<i>Agrega Türü</i>	<i>Yangının Süresi (saat)</i>	<i>Beton Örtü Kalınlıkları (mm)</i>
Kireçtaşı, Kalkerli, Çakıl, YFC, Fırınlanmış Kil, Şist, Granit vb. Agregalar	1	19
	2	25
	3	33
	4	38
Granit, Kuartz, Silisli Çakıl, %30'dan Fazla Kuartz İçeren Agregalar, Çakmaktaşı vb. Agregalar	½ - 1	19
	1-2	25
	2-3	38
	2-4	50

Donatılı beton elemanların davranışında koruyucu örtü özellikle önemlidir. Çünkü koruyucu örtünün kaybı, çelik donatıyı direkt olarak yangına maruz bırakır. Bu da betonarme elemanda yangın hasarını daha da artırır (Lennon and Clayton 1999).

Yangına karşı en etkili koruma yöntemi, ısıya dirençli malzemelerle yapı elemanlarını korumak ve doğru malzeme seçmektir (Yazıcı *et al.* 2000).

Isınma süresinin dayanıma etkisini tespit etmek için yapılan araştırmalarda ilginç sonuçlar ortaya çıkmıştır. Şöyle ki; kısa bir süre için yüksek sıcaklıklara kadar ısıtma betonun dayanımını hafifçe artırmaktadır. Bunun dışında yüksek sıcaklıklardaki dayanım kaybı, kuru betonlarda daha düşük olmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan betonlarda eğilme dayanımının basınç dayanımına kıyasla daha fazla etkilendiği belirlenmiştir (Boybay 1979).

2.2.8. Isı geçişi ve transferi

Isı bir enerji eşiidi olup yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki bir ortama kendiliğinden geçer. Ancak soğutma develerinde olduğu gibi ısının düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama verilmesi, sisteme dışarıdan bir enerjinin tatbiki ile mümkün olabilmektedir. Bu husus bilindiği üzere Termodinamiğin II. Kanun'un Clasius (1850) tarafından verilen ikinci ifadesinde belirtilmiştir (Dağsöz 1991).

Isının farklı sıcaklıktaki iki ortamın birinden diğerine geçmesi halinde göz önüne alınan iki ortamın arasında kalan ortamları da geçmesi söz konusudur. Örneğin sıcak bir odadan daha düşük sıcaklıktaki dış havaya duvar üzerinden geçen ısının büyüklüğü, sıcaklık farkı yanında yüzeye, zamana ve ortamların fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Isının geçtiği ortamlar, gaz veya sıvı akışkanlar ile katılar olabilmektedir.

- Isı iletimi – Kondüksiyon,
- Isı taşınımı – Konveksiyon,
- Isı ışınımı – Radyasyon olmak üzere üç türlü ısı geçişi mevcuttur (Luccioni *et al.* 2003).

Katı cisimlerde ısı enerjisinin bir molekülden diğerine aktarılması ile meydana gelen ısı geçişi şeklinde ısı iletimi denilmektedir (Yüncü ve Kakaç 1999).

Termodinamikte bir işlem sırasında sistem ile çevresi arasındaki sıcaklık farkı nedeni ile sistemin sınırından geçen enerji ısı olarak tanımlanır. Isı, sistemin sınırında geçişi halindeki enerji şeklidir. Isı geçişinin nedeni de ısı farkıdır (Yüncü ve Kakaç 1999).

2.3. Betonun Boşluklu Yapısı ve Geçirimsizliği

Su, yapı malzemelerinin bozulmasındaki temel faktördür. Boşluklu ortamlara nüfuz ederek zararlı maddeleri taşır ve gözeneklerde donarak hasar verir. Homojen boşluklu bir malzemenin ıslak bir yüzeyinde sabit bir hidrolik potansiyel olduğu zaman, sıvı kapiler su emmeye bağlı olarak önemli ölçüde yükselir. Bu nedenle, teknik uygulamada yapı inşaatlarının zemin üzerinde kalan yaklaşık 1 metrelik kısımları rutubetin neden olacağı bozunmanın meydana gelebileceği bölge olarak değerlendirilmektedir (Hanzic and Ilic 2003).

Çeşitli uluslararası organizasyonlarda gerçekleştirilen birçok araştırma (Bilodeau *et al.* 2004) ve CANMET ve NRC’de gerçekleştirilen çalışmalar (Bilodeau *et al.* 1997; Bilodeau *et al.* 1998) göstermiştir ki polipropilen liflerin betonda kullanımı hidrokarbon yangınına maruz kalan betonlardaki patlama sayılarını oldukça azaltmıştır. Ayrıca buradan tekrar görülmektedir ki betondaki patlama sayısı:

- çimento hamurunun yoğunluğuna,
- beton içerisinde yer alan hafif agreganın tipine ve miktarına,
- lifin tipine, inceliğine ve uzunluğuna bağlıdır.

Isıl işlemin hafif agreganın özelliklerine etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Kordierit esaslı kompozitlerin ısıtmaya bağlı olarak mikroyapı değişimleri, boşluk gelişimi ve özellikleri Tulyaganov *et al.* (2002) tarafından incelenmiştir. Chandrasekhar and Pramada (2001)’ya göre ısıtılan ürünlerin görünen birim ağırlığı ile su emmeleri uyum göstermektedir; daha düşük birim ağırlığa sahip numuneler daha çok miktarda suyu adsorbe ederler. Dondi *et al.* (2004) de bir hafif agrega olan zeolitik tuf üzerinde çalışmış, numuneleri 2–5 dakikalık sürelerde 1350–1500°C’deki fırınlara koymuştur. Çalışmalarında hem yüksek sıcaklıklardaki genleşmeyi hem de yanan ürünlerin teknolojik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca yanan zeolitik tufün genleşmesinin temel olarak kimyasal kompozisyona ve su içeriğine bağlı olduğundan bahsedilmektedir. Duvarcı *et al.* (2007) da yaptığı çalışmada

800°C'ye kadar orijinal yapının değişmediğini bundan dolayı zeolitik tfn çok yüksek olmayan sıcaklıklardaki uygulamalar için kullanılabileceğini belirtmektedir. Mineral katkılı çimentoların ve hafif agregalı betonların kılcal geçirimsizlik katsayısını konu alan birkaç alışma (Taşdemir 2003; Türkmen and Kantarcı 2007) yapılmıştır. Taşdemir (2003) yaptığı araştırma neticesinde betonun kılcal su emme katsayısının kr şartlarına çok duyarlı olduğunu belirtmektedir. Kr şartlarının betonun kılcal su emme katsayısına olan etkisinin düşük dayanımlı betonlarda daha yüksek olduğu görülmektedir.

Hafif agreganın normal ağırlıklı agregadan daha pahalı olması, belli tip ince mineral artıklarından ve yanmış atıklardan hafif agrega üretimini daha cazip bir “yeniden kullanım” uygulaması olarak karşımıza çıkarmaktadır (Cheeseman and Virdi 2005). Doğal agregalar genellikle 2,4–2,8 g/cm³ arasında değişen tane yoğunluğuna sahipken, hafif agregaların yoğunluğu 0,8–2,0 g/cm³ aralığında değişir. Bundan dolayı hafif agregalar, hafif agregalı betonların, hafif blokların ve diğer hafif inşaat ürünlerinin üretiminde kullanılırlar. Düşük yoğunluğun sağladığı faydalar arasında ısı yalıtımı ve ısı ataleti de vardır. Hafif agregaların kullanıldığı diğer alanlar ise hafif geoteknik dolgu maddesi, yalıtım ürünleri, zemin mekaniği, hidro-kültür, drenaj, çatı bahçesi ve filtrasyon ürünleri olarak sıralanabilir. Piyasada pek çok çeşit hafif agrega bulunmaktadır. Bunlar arasında hem doğada kendiliğinden meydana gelen düşük yoğunluklu malzemeler (rneğin: pomza, cüruf, volkanik küller, diyatomit), hem de kil, şist, silisli kayaçlar ya da arduvaz gibi ısıl işlem uygulanarak elde edilen kayaçlar vardır. Hafif agregalar ayrıca uçucu kül, kağıt fabrikası atığı, kanalizasyon atığı, genleştirilmiş yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünlerden de elde edilmektedir. İngiltere’de en fazla üretilen hafif agrega olan Lytag, enerji santrallerinde yakılan kömür cürufunun toz haline getirilerek sinterleştirilmesiyle elde edilmektedir (Cheeseman and Virdi 2005).

Hafif agregalar işlenebilirlik, dayanım ve yüksek sıcaklıklara olan dayanıklılığı gibi gelişmiş özellikleriyle son yıllarda oldukça ilgi çekmeye başladı. Bugüne kadar kılcal geçirimsizlik katsayısı ile ilgili yapılan deneysel araştırmaların çoğu doğal agregalarla ve

doğal agregalı beton karışımlarıyla ilgiliydi. Bu çalışmanın amacı ise, GPA, PA, PPF ve HSK içeren yüksek dayanımlı betonların birim ağırlık, basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik katsayısı gibi özelliklerinin yüksek sıcaklıklar altında nasıl değişim gösterdiğini incelemektir.

2.3.1. Betonun boşluklu yapısı

Beton mekanik, fiziksel, kimyasal ve biyolojik etkenlerle dayanıklılığını kaybeden bir yapı malzemesidir. Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde iki ana faktör vardır: su ve beton bünyesindeki boşluklar ile çatlaklar içindeki taşınım. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin beton içine taşınımı (transferi) ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Taşınım boyutu, hızı ve etkisi büyük lde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton bünyesindeki mikro iklime bağlıdır. Beton içindeki boşluklar agrega ve imento hamurunda olmak üzere ikiye ayrılır. Bu boşluklar normal beton hacminin %10' una kadar çıkabildiği gibi, %1'in altına da düşebilir. %10 civarında boşluk içeren bir beton kalıcı olmayan ve dayanımı düşük bir betondur. Hidratasyonun tam geliştiği olgun ve yoğun imento hamurlarında, kapiler boşluklar jel tarafından işgal edilir. Bu şekilde ağ sistemi şeklindeki gözenekler tıkanır, dayanıklı ve geçirimsiz bir yapı oluşur (Baradan 2002).

Boşluk çaplarının ve kapiler boşlukların temaslarının düşük olması, yüksek performanslı betonların özelliğidir. Bu iki durum, permeabilite ile ilgili olan fiziksel ve kimyasal proseslerde, yüksek performanslı betonlar ile geleneksel betonlar arasındaki davranış farklılıklarını belirler. Yüksek dayanımlı betonların yapı-agrega ilişkileri, geleneksel betonlardan üstündür. Çünkü agrega taneleri arasındaki yüzeyler nispeten kktr. Donmaya karşı yüksek direnç için agreganın %10'dan daha büyük su emmemesi gerekir (Orchard 1962; Kucharska 1994).

Kılcal boşluk hacmindeki azalmanın büyük boyutlu boşlukların yok olması ile birlikte devam ettiği belirtilmiştir. Demek ki, hidrasyon olayı gelişirken betonun çimento hamuru içindeki kılcal boşlukların sadece hacmi azalmakla kalmamakta, fakat aynı zamanda bunların boyutları da küçülmektedir. Kılcal boşlukların çaplarının küçülmesi ise betonun kılcal su emme kuvvetini büyütürken, kılcallığın zamanla artmasının nedeni olmaktadır (Auskern 1973). Betondaki kapiler boşlukların hidrasyonla bloke edilmesi için w/c oranına bağlı olarak gerekli süre Çizelge 2.10’da verilmiştir.

Çizelge 2.10. Kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli süre-w/c ilişkisi

Olgunluk süresi	3 gün	7 gün	14 gün	6 ay	1 yıl	bloke olmaz
w/c oranı	0,40	0,45	0,50	0,60	0,70	0,70 üstü

Betondaki kılcallık, geçirimsizlik, su emme olayları betonun boşluk yapısı ve betonu oluşturan bileşenlerin boşluk yapısıyla ilgili olduğundan sertleşmiş betonda yer alan boşluklar:

- Çimentonun hidrasyonu ile ilgili olarak, sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan “jel boşlukları” ve “kapiler boşluklar”,
- Hava sürüklenmiş betonlardaki sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan “sürüklenmiş hava kabarcıkları”,
- Taze betondaki terleme nedeniyle betondaki suyun yüzeye çıkma eğilimi sonucunda, sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan boşluklar; ayrıca, üst kısımlara hareket eden suyun iri agrega tanelerinin ve betonarme demirlerinin altlarında birikmesi nedeniyle yer alan boşluklar,
- Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeniyle, çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşabilecek boşluklar,
- Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi işlemleri esnasında betonun içerisinde oluşan “hapsolmuş hava boşlukları” ve
- Agrega tanelerinin yapısında bulunabilecek boşluklar (Erdoğan 2003).

Kapiler boşluklar hidrasyonun herhangi bir aşamasında hidrasyonun katı ürünlerinin dolduramadığı gözeneklerdir. Hidrasyonun ilerlemesine bağlı olarak jel büyümekte ve kapiler boşluk sistemi azalmaktadır. Dolayısıyla kapiler boşluk oranı; w/c oranına ve hidrasyon derecesine etki eden faktörlere bağlıdır. Kapiler boşlukların boyutunun 1,3µm mertebelerinde olduğu ve çimento harcı içinde rastgele dağılıp, bir ağ sistemi oluşturduğu bilinmektedir. Bu ağ sistemi şeklindeki yapı, betonun geçirimsizliğinden ve donma-çözülme olayı sonucu betonun zarar görmesinden sorumludur.

Kapiler boşluklar, çimento hamurundaki çimento tanelerinin arasında yer alan suyun oluşturduğu küçük boşluklardır. İlk zamanlarda bu boşlukların neredeyse tümünün arasında bağlantı bulunmaktadır. Çimento hamurunun içerisinde gelişigüzel dağılım gösteren ve değişik şekillere ve boyutlara sahip kapiler boşlukların ortalama çapı 0,0005 mm kadardır. Kapiler boşlukların içerisindeki su, kuru ve sıcak ortamda buharlaşmaktadır; ıslak ortamda ise, boşlukların içerisine su girebilmektedir. Bu boşlukların içerisindeki su, soğuk havada, 0°C normal olarak donma gösterebilmektedir.

Hidrasyon sonucu 90 günlük betonlarda kılcal boşlukların hacmi azalmakta ve aynı zamanda bu boşlukların çapları küçülmektedir. Çapların küçülmesi ise betonun kılcal su emme kuvvetini büyütmede, dolayısıyla 90 günlük betonların kılcallığı artmaktadır (Uyan 1975).

Jel boşlukları; hidrasyon sonucunda oluşan jellerin yapısında yer alan (jel yapısının bir parçası olan) boşluklardır. Birbiriyle bağlantısı olan bu boşlukların çapı 15–20 angström civarındadır. (1 angström= 10^{-7} mm). Jel boşluklarının boyutu çok küçük olduğundan, jel üzerinde adsorbe durumunda olan suyun mobilitesi çok azdır. Jel boşluklarındaki su -78°C de donmaktadır.

Terleme nedeniyle oluşan boşluklar; yerine yerleştirilen taze betonun içerisindeki su yukarıya doğru çıkma eğilimi göstermektedir. Suyun bu hareketi, çimento hamuru içerisindeki çok küçük kanalların oluşmasına neden olabilmektedir. Terleme sonucunda

oluşmuş olan küçük kanalların sertleşmiş çimento hamurunda yer alması, betonun geçirimliliğini belirli ölçüde artırabilmektedir.

Hapsolmuş hava boşlukları; betonun karılması esnasında betonun içerisine kendiliğinden girmiş olan havanın oluşturduğu boşluklardır. Betonun içerisindeki hapsolmuş hava boşluklarının toplam hacminin yüksek olması, betonun yoğunluğunu azaltmakta, su emme kapasitesini ve geçirimliliğini artırmakta, beton dayanımı ve dayanıklılığını azaltmaktadır.

Agregalardaki boşluklar değişik şekillerde ve boyutlarda olmaktadır. Granit ve mermer gibi yoğunluğu nispeten yüksek olan taşlardan oluşan agregalardaki boşlukların boyutu genellikle, sertleşmiş çimento hamurunda mevcut olan kapiler boşlukların ortalama boyutu kadardır. Genel olarak boşlukların birbiriyle bağlantısı bulunmamaktadır. Betonda kullanılan puzolanik özelliklere sahip ince taneli mineral katkıları kullanıldığı takdirde, bu tür malzemelerdeki silika ile çimentonun hidrasyonu sonunda ortaya çıkan kalsiyum-silika-hidrat jelleri oluşturmaktadır. Çimento hamurundaki jel miktarı artmakta, kapiler boşluk oranı azalmaktadır.

Taşınımın boyutu, hızı ve etkisi büyük ölçüde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton yüzeyindeki mikro-iklime bağlıdır. Bu nedenle beton bünyesini ve boşluk yapısını iyi tanımak gerekir. Beton içindeki boşluklar agrega ve çimento hamurunda olmak üzere ikiye ayrılır. Bu boşluklar normal beton hacminin %10'una kadar çıkabileceği gibi, %1'in altına da düşebilir. Doğaldır ki %10 civarında boşluk içeren bir beton, bal peteği görünümünde, çok düşük dayanımlı ve kalıcı olmayan bir betondur. Boşluk oranını kontrol etmek, en düşük değere indirebilmek, beton teknolojisinin kurallarına uymakla olanaklıdır (Baradan 2002).

2.3.2. Betonun kılcal geçirimliliği

Beton yüzeyinin alt yüzünün, bir sıvı veya pratikte en çok rastlanan su ile temas etmesi halinde, suyun cismin içinde yükselmesi kılcallık olayı olarak ifade edilir. Beton kılcal boşluk içerdiğine göre, kılcallık olayının bu malzemede meydana gelmesi, başka bir deyimle betonun alt yüzünün sıvı ile temas etmesi halinde suyun yukarıya doğru hareket etmesi gayet doğaldır. Çimento dozajı 250–400 kg/m³ arasında olan ve değişik granülometriye sahip betonlar üzerinde yapılan bir çalışmada görünen porozitenin (%80–90)'ını kılcal boşluk hacminin oluşturduğu görülmüştür. Buradan betonların önemli ölçüde kılcallık olayına maruz kaldığı anlaşılmaktadır (Postacıoğlu 1987).

Betonun kılcallığı ve geçirimliliği, betonun boşluk yapısına ve bu boşlukların karakterine bağlı özelliklerdir. Tek başına toplam boşluk oranı (porozite) bir anlam ifade etmemekte, hem kılcallık ve hem de geçirimlilik yönünden, temel olarak betonun boşluklarının sürekli olup olmamaları önemli bulunmaktadır. Çünkü kılcallık veya hidrostatik basınç etkisiyle su hareketi ancak sürekli boşluklar içinde oluşabilir. Şu halde betonun geçirimliliği sürekli boşlukların oranı (görünen porozite) ile yakından ilgilidir. Görünen porozite ile birlikte betonun geçirimliliği de artar. Betonun kılcallığının da, genellikle görünen porozite ile aynı yönde değiştiği saptanmıştır. Ancak, betonun kılcallığı ve geçirimliliği, yalnız boşlukların sürekli olmalarına ve bunların oranına değil, ayrıca bu boşlukların çaplarına bağlıdır. Görünen poroziteyi sabit tutmak şartıyla, boşlukların çapları küçüldüğünde kılcallık artar, geçirimlilik azalır. Buna karşılık boşluk çapları büyüdüğünde kılcallık azalırken, geçirimlilik artar. Onun içindir ki zaman ilerledikçe betonun geçirimliliği azalırken, kılcallık saklama süresi ile birlikte artar. Saklama süresinin geçirimliliğe ve kılcallığa etkisi, betonun çimento hamuru bünyesindeki kılcal boşlukların çaplarının küçülmesi sonucudur. Çünkü zamanla hidrasyon olayı gelişirken sürekli boşluk oranında pek büyük değişiklik olmamakta fakat kılcal boşlukların çapları küçülmektedir. Çapların küçülmesi ile kılcal su emme kuvvetini büyüttüğünden kılcallığı arttırırken, geçirimliliğin azalmasının nedeni olmaktadır (Uyan 1975).

Beton üretiminde kullanılan suyun miktarı, sadece çimentonun hidratasyonu için gerekli olan su miktarı kadar değildir. Taze betonun istenilen işlenebilmeyi kazanabilmesi için hidratasyon için gerekli olan su miktarından daha yüksek miktarda su kullanılmaktadır. O bakımdan, beton yapımında kullanılan w/c oranı büyüdükçe, çimento hamurunun içerisinde yer alan kapiler boşlukların toplam hacmi daha büyük olmaktadır. 1 cc çimentonun hidratasyonu sonucunda üretilen çimento jelinin hacmi 2,1–2,2 cc kadardır. Ortaya çıkan jel, kapiler boşlukların içerisine taşarak yer almaktadır. O nedenle, hidratasyonun ilerlemesi ve daha çok miktarda jel üretilmesi ile kapiler boşlukların hacminde azalma meydana gelmektedir. Böylece, kapiler boşlukların arasındaki bağlantı azalabilmektedir. Kapiler boşlukların arasındaki bağlantı olmayınca da kapiler su emme gerçekleşmesi azalacaktır.

Kapiler emme etkisi, boşluk yüzeylerindeki enerjiye bağlıdır. Kılcal boşluklardan yükselen su sütununun ağırlığı, yüzey geriliminden doğan yükselme kuvvetine eşit olunca denge sağlanır. Sıvının erişebileceği yükseklik kılcal borunun yarıçapı ile ters orantılıdır. Kılcallığın zamanla artışını daha iyi değerlendirmek için, hidratasyona bağlı olarak betonun boşluk yapısında meydana gelen değişiklikleri incelemek gerekir. Bu değişiklikler betonun sertleşmiş çimento hamuru bünyesindeki kılcal ve jel boşluklarında olur. Önce bütün boşluklar kılcal boyuttadırlar. Hidratasyon olayı gelişirken bu boşluklar hidrate elemanlar tarafından doldurulur ve böylece, zamanla jel boşlukları artarken toplam kılcal boşluk hacmi azalır. 90 günlük betonların kılcal boşluk yüzdeleri 28 günlüklere göre daha küçük olmaktadır (Uyan 1975).

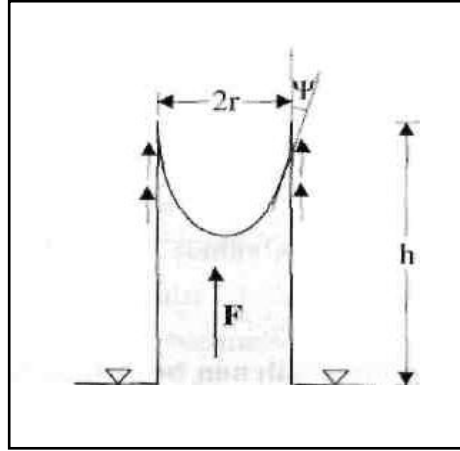
Kılcal porozitedeki azalmanın hidratasyonun gelişimi ile doğrudan doğruya orantılı olduğu belirtmiştir (Auskern 1973).

Kılcal boşluklar zamanla hidrate elemanlar tarafından doldurulduğuna göre kılcallığında zamanla azalacağı akla gelebilir. Bu ancak çimentonun hidratasyonunu tamamlayabilmesi için gerekli minimum su bulunması (yaklaşık olarak w/c oranı 0,40) halinde geçerli olabilir. Çünkü w/c oranı 0,40 iken hidratasyon olayı tamamlandığında, sertleşmiş çimento hamuru içindeki kılcal boşlukların tümü jel boşluklarına dönüşerek

ortadan yok olacaklardır. Fakat w/c oranı 0,40'dan daha büyük değerler aldığıında; çimentonun hidrasyonu tamamlansa da, çimento hamuru bünyesindeki kılcal boşluklar devamlı olarak kalacak ve bunların çapları küçülecektir. Betonun agrega ve harç fazından oluşan iki fazlı malzeme olarak düşünürsek, betonun kılcallığını, agrega ve harç fazlarının beton içinde bulunuş oranlarından daha çok harç fazının kılcallık özelliğinin belirlediği anlaşılmıştır. Harç fazının kılcallığı ile betonun kılcallığı arasında lineer bir bağıntı elde edilmiştir. Bağıntının lineer olması, betondaki kılcal su hareketinde, harç fazındaki boşlukların, harç fazı ile agrega taneleri arasındaki veya agregadaki boşluklara göre çok daha önemli rol oynadığını göstermektedir (Uyan 1975).

Beton, heterojen ve boşluklu bir yapı malzemesidir. Betonun yapısındaki zayıflık, kılcal boşluk ve betonun işlenebilirliği için gereğinden fazla konulan su miktarına bağlanmaktadır. Betondaki bu iki olumsuz etkeni aşağı çekmekle betonun niteliğinde önemli artışlar yapılabilmektedir. Kılcal boşlukları küçültmek, beton içerisindeki fazla suyu sonradan almak veya çimento tanelerini homojen bir şekilde dağıtan bir takım akışkanlaştırıcılarla w/c oranını düşürmek beton niteliğini arttırıcı yöntemlerdir (Akyüz 1991).

Yukarıda açıklandığı gibi betonun geçirimliliği, sürekli boşlukların oranına doğrudan doğruya bağlıdır. Sürekli boşlukları oluşturan gerek kılcal ve gerek daha büyük boyutlu boşluklar geçirimliliği mümkün kılar. Hâlbuki kılcallık olayında, yalnızca kılcal boyutlu boşlukların oranı önemlidir. Örneğin, beton içinde büyük boşlukların oranı ile birlikte geçirimlilik artarken, kılcallıkta bir değişme olmayabilir. Buna karşılık kılcal boşluk oranında bir artma olduğunda hem kılcallık ve hem de geçirimlilikte bir yükselme görülecektir. Bu duruma göre görünen porozite, geçirimliliğin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Genel olarak görünen porozitenin büyümesi kılcallığı arttırmaktadır. Kılcallık; toplam boşluk miktarından daha çok beton içindeki sürekli kılcal boşlukların miktarına (toplam kılcal boşluk hacmi) ve bunların çapına bağlı olması ile açıklanabilir (Uyan 1975).



Şekil 2.31. Kılcal yolla su emme

Betonun kılcal yolla su emmesi Şekil 2.31’de gösterilmiştir.

F yükselmeyi sağlayan kuvvet;

$$F=2\pi r.\gamma.\cos\psi \text{ dir.}$$

Burada;

γ : yüzey gerilimi,

ψ : sıvı yüzeyinin katı cisim yüzeyi ile yaptığı ıslatma açısıdır.

En yüksek konumda, bu kuvvet sıvı ağırlığına eşittir.

$$2\pi r.\gamma.\cos\psi=\pi.r^2.h_{\max}.\rho.g$$

Burada ρ sıvının kütleli yoğunluğu olup, h_{\max} ;

$$h_{\max} = \frac{2\gamma.\cos\psi}{r\rho g}$$

şeklinde bulunur. Görüldüğü gibi diğer faktörlerin aynı kalması halinde kılcal boru çapının küçüklüğüne bağlı olarak kılcal yolla su emme yüksekliği artmaktadır. Bu nedenle cüruf gibi gözenekli malzemelerin kullanıldığı yerlerde, su yapı elemanı içinde kolay yükselemez (Baradan 2002).

Sürekli olarak su içinde bulunan yapılar da önlem alınmadığı takdirde suyu emebilir. Su ilk önce kapiler emme yolu ile beton bünyesine girer. Hidrolik basınç olayın daha hızlı gelişmesini sağlar. Beton yüzeylerin bazen havayla teması ve suyun buharlaşması durumunda suyun taşınım olayı süreklilik kazanır. Taşınım olayının yoğunluğu; buharlaşma, kapiler emme ve hidrolik basınç arasındaki ilişkilere bağlıdır. Doğaldır ki su ile beraber erimiş maddeler de (karbonatlar, klorürler ve sülfatlar) taşınır. Buharlaşma bölgesinde betona zarar veren maddelerin zamanla miktarı artar. Eriyik maddelerin beton yüzeyinde kristalize olması, çiçeklenme olayı bu etkiye bağlanabilir.

2.3.2.a. Agreganın kılcal geçirimsizliğe etkisi

Agregalar TS 706 (2003) standardında, doğal, yapay veya her iki cins yoğun mineral malzemenin, genellikle 100 mm'ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerinin bir yığını olarak tarif edilir. Agregalar, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımıyla bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir (Erdoğan 1995).

Su emme özelliği, agreganın boşluk yapısından kaynaklanmaktadır. Agregaların boşluk yapısı arttıkça su emme özelliği de artar. Dayanımı yüksek agregaların su emme yetenekleri daha düşüktür. Su emme özelliği yüksek olan agregalar, hidrasyon esnasında gerekli olan suyun bir kısmını emerek dayanımın düşmesine sebep olurlar. Yüksek boşluk oranlarına sahip agregalar beton dayanımının düşük olmasına neden olur. Agregaların, hidrasyon için gerekli suyun küçük bir kısmını emmesi durumunda,

özellikle su-çimento oranı düşük betonlar için, bir miktar su ilave etmek gerekli olacaktır (Kömürcü 1993).

Agrega tanelerindeki boşluklar; normal ağırlıklı agregalarda, agrega katı hacminin %0 ile %20 si arasında değişen boşluk bulunabilmektedir. Hafif agregalarda bu oran %30-%50 kadardır (Erdoğan 2003).

Yüksek dayanımlı beton üretiminde, kırmataş agregaların doğal agregalara oranla daha etkin olduğu bilinmektedir. Kırmataş betonun basınç dayanımı eşit şartlarda doğal agrega betonuna nazaran yaklaşık %30–35 oranında daha iyi neticeler verdiği belirtilmektedir (Çelik 1991). Bunun başlıca nedeni girintili çıkıntılı ve köşeli bir şekil ihtiva eden kırmataş agregaların beton içerisinde daha iyi bir aderans sağlamasıdır. Agregalar için genellikle şu kontroller de yapılmalıdır:

- Silt ve kil ile kirlenmeye kesinlikle müsaade edilmemeli ve titizlikle kontrol edilmelidir. Çünkü bu kirlilik çimento hamuru-agrega arasındaki aderansı çok düşürür ve karışımın su ihtiyacını artırır.
- Eğer akışkanlaştırıcı bir kimyasal kullanılmayacak ise en büyük dane boyutu 16 mm hatta 10mm olarak tercih edilmelidir. Böylece çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans alanı artar ve birim alana gelen gerilmeler azalır. Süper akışkanlaştırıcı bir kimyasal katkı kullanıldığında bağ mekanizması çokça güçlendirildiğinden, küçük dane boyutlarına ihtiyaç azalır. Bu tür bir katkı ile 25 mm'ye kadar en büyük dane boyutları başarılı sonuçlar vermektedir.
- Yine iyi bir bağ dayanımı elde etmek için köşeli (kırmataş) agregalar kullanılmalıdır. Ancak aşırı köşelilik ve yassı, uzun taneler karışım suyu ihtiyacını arttıracığından bunlardan kaçınılmalı, miktarları %5 gibi bir değerle sınırlanmalıdır.
- Özellikle düşük w/c oranlı karışımlara kaba agrega seçerken bir miktar su emmesi olan bir tür tercih edilse, hidrasyon ürünlerinin agreganın hemen yakınında oluşabilmesi için gereken suyu agreganın kendi depolamış olur ve özellikle ilerideki zamanlarda çimento hamuru ile agrega arasındaki aderans artarak dayanım kazanır.

- İnce agrega olarak düşük w/c oranları için kaba kum uygundur: ancak yüksek dozda süper akışkanlaştırıcı kullanılabilirse, ince bir kum kullanımıyla karışımın ayrışması önlenir (Üzümeri ve Özden 1991).

Betonun kılcallığı agreganın granülometrisiyle yakından ilgilidir. Boşluksuz, dolayısıyla kılcallığı az olan beton ancak kompasitesi büyük bir agrega ile elde edilir. Agreganın kompasitesi ise granülometrik birleşimine bağlı olduğundan, uygun bir granülometri seçilerek kompasitenin büyük değer alması sağlanabilir. Ancak kompasitesi küçük bir agreganın taneleri arasında kalan boşluklar, kompasitesi büyük agregaya göre daha çok çimento ile doldurularak kılcallık küçültülebilir. Bu bakımdan agrega granülometrisinin kılcallığa etkisini çimento dozajını da birlikte göz önüne alarak düşünmek gerekir (Uyan 1975).

Agregalar, betonun iskeletini teşkil eden çeşitli boyutlardaki sert tanelerden meydana gelen, betonun maruz kalacağı kuvvetlere karşı koyan bileşenler olarak tarif edilmektedir (Postacıoğlu 1987).

Doğal kumlar arasında özellikle beton üretiminde en elverişli olanlar tuz içermeyen dere kumudur. Bununla beraber yapılarda kullanılacak kum mutlaka test edilmelidir.

İyi agregalar; temiz, sert, su etkisiyle yumuşamayan, mukavemetli, çimento ile zararlı reaksiyonlar yapmayan, donatıya etki edecek zararlı kimyasallar içermeyen cinsten olmalıdır. Agregalarda beton kalitesi için aranan diğer özellikler ise, mekanik mukavemet, donma, aşınma ve darbeye karşı dayanıklılıktır. Bunların dışında tane şekli, boşluk ve yüzey karakteristikleri de yeterince uygun olup yakın mesafeden ve makul fiyatla elde edilebilir olmalıdır. Ülkemizde 1980 itibariyle TS 706'da yenilik yapılarak alman betonarme şartnamesi olan DIN 1045 sistemi kullanılarak kare gözlü elek serisi esas alınmıştır. Bu elek serisinin göz açıklıkları; 0,25 mm, 0,50 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 31,5 mm, 63 mm ve 90 mm mertebesindedir (Gündoğdu 1998; Postacıoğlu 1987).

Agrega karışımının içerisinde bir miktar ince taneli malzeme bulunması kompasiteyi artırır. Ayrıca kohezyonu da artırarak betonun aşırı terlemesini önler. Orta sınıf agreganın gereğinden fazla olması ise ayrışmayı artırır. İri tanelerin miktarındaki artış ise incelik modülünün büyük değerleri almasını sağlar. Maksimum tane çapının büyük seçilmesi ile de betonda kompasite daha da artırılabilir (Postacıoğlu 1987).

Hafif agregaların bünyelerinde fazlaca boşluk içermesi nedeniyle birim ağırlıkları 1,5 kg/lt'nin altındadır. Başlıca hafif agregalar volkanik tüf, pomza, sünger taşı, kül ve yüksek fırın cürufudur. Bunlardan başka; pişmiş toprak, GPA ve ytong hammaddesi de yapay hafif agregalar sınıfına girer. Ağır agregalar ise özgül ağırlığı 3,5 kg/lt'nin üzerindedir. Başlıcaları barit, hematit, limonit ve demir-çelik kırıntılarıdır (Gündoğdu 1998).

Doğal bir malzeme olan agregalarda, aranan en önemli özelliklerinden biri bunların mekanik özelliklerinin ve özellikle basınç mukavemetlerinin yüksek olmasıdır. Mekanik mukavemeti düşük olan agregaları kullanarak, yüksek mukavemetli bir beton elde etme olanağı pek yoktur (Postacıoğlu 1987).

2.3.2.b. Çimentonun kılcal geçirimsizliğe etkisi

Çimento üretiminde klinkere az miktarda alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ilave etmekle çimentonun katılaşma süresinde değişiklik yapılabilmektedir. Ayrıca beton üretimindeki en pahalı malzeme olan çimentonun üretim maliyetini arttırmada büyük rol oynayan enerji kayıpları alınacak tedbirlerle büyük oranda düşürülebilir. Bu tedbirler; Pişirme öncesinde kalkere bir miktar puzolanik özelliğe sahip katkı maddesi ilave etmek (%10'dan az), Ön konsolidasyon yaptırmak, Naf ve Lif gibi bazı mineralizatörler kullanmak suretiyle kalkerin ayrışma sıcaklığının 900°C den 250°C 'ye düşürmek, ilkel malzeme olarak bir miktar bitümlü şist kullanmak, klinkerin öğütülmesinde ise bazı fiziksel ve mekanik yöntemlere baş vurmak şeklinde sıralanabilir (Gündoğdu 1998).

Çimento türleri hidrasyon ısısı bakımından en yüksekten en düşüğe doğru şu şekilde sıralanmaktadır: Alüminli çimentolar, Yüksek mukavemetli portland çimentoları (PÇ 52,5 ve PÇ 42,5), portland çimentoları PÇ 32,5 ve puzzolanlı çimentolardır. Çimentolarda hidrasyon birkaç yıl devam eder. Zaman içinde gelişmekte olan bu olaya hidrasyon sinetiği denir. Çimento hamurunda her durumdaki su oranı hidrasyon süresince değişir (Postacıoğlu 1987).

Sertleşme başlangıcında suyun yaklaşık %50'si Van der Waals kuvvetleri ile çimento parçacıklarına tutunan sudur. Çimento hamurunun başlangıçtaki mukavemetini elde etmesi bu adsorbe su seviyesinde gerçekleşir. Fakat zaman içinde hidrasyonun devam etmesiyle adsorbe su azalır. Böylece hidrate elemanların miktarının artmasıyla mukavemette de zamanla artış olur. Çimento içindeki makro boşluklar azalır, mikro ve jel boşlukları artar (Süvari 1995).

Çimentoyu oluşturan klinker ve alçı taşı ne kadar ince öğütülürse çimento tanelerinin yüzeylerinin toplamı o kadar artmaktadır. Böyle bir durumda, su ile temas eden tanelerin yüzeyi daha fazla olmakta, kimyasal reaksiyonlar daha hızlı ve daha iyi gelişebilmektedir ve kılcallık boşluklar kapanabilmektedir.

Betondaki su hareketi çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunların başlıcaları çimento hamuru içindeki boşlukların miktarı ve yapısıdır. Çimento, su ile temas ettiği andan itibaren çimento fazında: hidrate elemanlar (jeller), hidrasyon yapmamış çimento tanecikleri (anhidritler) ve çimento hamurunda bulunan su oluşur (Süvari 1995).

Çimento hamurunda su ihtiva eden boşlukları da özetlemek gerekirse; Jel taneleri arasındaki boşluklar, kılcal boşluklar ve 0,1mm den büyük boşluklardır. İşlenebilir bir betonda azda olsa bulunan bu tür boşlukların miktarı, dağılımı ve bir ağ oluşturup oluşturmadığı önemlidir (Baradan vd 2002).

Yapı malzemelerinin, boşlukları ile ilgili en önemli özelliği su geçirimsizliğidir. Betondaki boşluk yapısının azaltılması, betonun performansını olumlu yönde etkiler.

Çimento içeriği arttıkça ve w/c oranı düştükçe kılcal geçirimsizlik azalır (Taşdemir 1998; Kocataşkın 2000).

Betonun kimyasal bozulmasına karşı istenilen dayanıklılığın sağlanabilmesi için geçirimsizlik ve w/c oranı sınırlandırılarak uygun bir çimento seçilmelidir. Belirtilen bu dayanıklılığa ulaşabilmek için w/c oranı 0,60'dan büyük olmamalıdır. Çok kuvvetli zararlı etkiler karşısında, uzun süre kalacak olan betonlarda, dayanıklılığın sağlanması olanağı bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu gibi betonlarda, yukarıda anlatılan özel önlemler alındıktan ve betonun bu koşullara uygun şekilde üretimi yapıldıktan sonra, zararlı etkiye sahip madde ile betonun doğrudan doğruya temas etmesini önlemek için uygun yalıtım ve koruma önlemleri alınmalıdır.

Ayrıca çimento hamurunda serbest kireç (Ca(OH)_2), alkaliler (Na_2O , K_2O), bazı önemsiz bileşenler, hidrate olmamış çimento ve taze hamurun içindeki suyun bıraktığı gözenekler vardır. Bu boşluklara kapiler boşluklar adı verilir. Betonun kalıcılığını büyük ölçüde etkileyen kapiler boşlukların oranı, w/c oranına ve hidrasyon derecesine bağlı olarak çimento hamuru hacminin %40'ına kadar çıkabilir. Alınacak önlemlerle kapiler boşluk oranının sıfıra yakın değerlere kadar indirilmesi mümkündür (Baradan 2002).

28, 56 ve 120. günlerde betonların kılcallık katsayısı ise sırasıyla $25,587 \text{ cm}^3/\text{dak}$, $19,939 \text{ cm}^3/\text{dak}$ ve $31,545 \text{ cm}^3/\text{dak}$ olarak, kılcal boşluk yüzdesi ise sırasıyla %22,4, %19,99 ve %52,4 olarak değişmiştir. Normal şartlarda, ilk olarak tüm boşluklar kılcal boyuttadır. Hidrasyon olayı gelişirken, bu boşluklar hidrata elementler tarafından doldurulur ve sertleşmiş çimento hamuru bünyesinde kılcal ve jel boşluklar meydana gelir. Betonun zamanla jel boşlukları artarken kılcal boşlukları azalır (Türkmen 2002).

Kılcallık betonun boşluk yapısına bağlıdır. Betonun boşluk yapısı ise agrega taneleri arasındaki boşluğun çimento hamuru tarafından doldurulması ile önemli derecede ilgilidir. İlk akla gelen, çimento hamuru agrega taneleri arasındaki boşluğu doldurmaya yeterli değilse beton bünyesinin büyük ölçüde boşluklu bir yapıya sahip olacağı ve

kılcallığın artacağı, diğer taraftan çimento hamuru agrega taneleri arasındaki boşluğu doldurmaya yeterli ise kılcallığın küçüleceğidir. Ancak kılcallık boşluk miktarına değil bu boşlukların birbirleriyle bağlantılı ve kılcal boyutlarda olmalarına da bağlıdır.

Yaptığı çalışmada çimento dozajının etkisini yüksek ($300\text{--}800\text{ kg/m}^3$) ve düşük ($160\text{--}300\text{ kg/m}^3$) dozajlı betonlar üzerindeki betonlar üzerinde incelemiştir. Joisel metoduna göre hesaplanarak üretilen betonların granülometrisi sabit tutulmuştur. Yüksek dozajlı betonların kılcallığının, çimento dozajının artması ile azaldığı ve saf çimento hamurunun kılcallığına yaklaştığı gözlenmiştir. Ancak dozajın 366 kg 'dan küçük değer alması halinde betonda boşluklar artmaya başlamaktadır. Düşük dozajlı betonlarda; sadece dozajın 300 kg/m^3 ten itibaren düşürülmesi ile yetinilmemiş, karışıma azaltılan çimento miktarının hacmine eşdeğerde $40\text{--}100$ mikron tane boyutlu filler malzemesi katılmıştır. Çalışmada, azaltılan çimentonun yerine bu şekilde filler malzemesi katılması halinde, dozajın 160 kg/m^3 'e kadar düşürülmesinin betonun kılcallığına önemli bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır (Marill 1956).

Aydemir (1962)'de ise betonun dozajı arttırıldıkça kılcallığın azalacağını belirtmesi ile yetinilmiştir.

Yapılan çalışmada ise değişik agrega granülometrisi ve kıvamlar için, dozajın betonun kılcallığını nasıl etkilediği sistematik bir şekilde araştırılmıştır:

Eski DIN 1045 deki: (D) eğrisine uygun; kuru kıvamlı betonlarda; 28 ve 90 günlük betonlarda, kılcallıkla dozaj değişimlerinin birbirine ilişkisi; dozajın 180 kg/m^3 'ten 250 kg/m^3 'e artması halinde kılcallıktaki azalma hızlı olmaktadır. Dozajın 250 kg/m^3 ten itibaren artmasıyla kılcallığın değişim hızı azalmaya başlamakta ve dozajın 350 kg/m^3 'ten daha büyük değerleri için bu hız değişimi çok yavaşlamaktadır. Plastik ve akıcı kıvamlı betonlarda; dozaj 250 kg/m^3 'ten az iken dozajın azalmasıyla 28 günlük kılcallığın hızla arttığı, dozajın bu değerinden itibaren ise kılcallığın sabitleşmeye başladığı görülmüştür. 90 günlük betonlar için dozajın bu kritik değeri 350 kg/m^3

olmaktadır. Akıcı kıvamlı betonlarda; kılcallık 28 ve 90 günlük numunelerde birbirinin hemen hemen tamamen aynı bir değişim göstermektedir. Dozajın 300 kg/m^3 değerine kadar kılcallık azalmakta, bu değerden itibaren sabitleşmektedir. Agreganın granülometreleri (E) eğrisine uygun kuru, plastik ve akıcı kıvamlı betonlarda, kılcallığın dozaja göre değişimi aynı olmakta, genel olarak dozaj 350 kg/m^3 değerine kadar artarken kılcallık hızla azalmaktadır. Dozajın 350 kg/m^3 değerinden itibaren daha büyük olmaktadır. Ayrıca 90 günlük kılcallığın 28 günlük kılcallığa göre artış oranı dozajın $300\text{--}350 \text{ kg/m}^3$ değerinden itibaren daha büyük olmaktadır. Agreganın granülometreleri (F) eğrisine uygun betonlarda dozajın kılcallığa etkisi yalnızca 250 kg/m^3 düşük dozlu ve 400 kg/m^3 yüksek dozlu betonlarda incelenmiştir. 400 kg/m^3 dozlu betonların kılcallıklarının, 250 kg/m^3 dozlu kılcallıklarından çok daha düşük olduğu görülmektedir. Sonuç olarak dozaj ile orantılı olarak çimento hamuru arttıkça agreganın taneleri arasındaki boşlukların dolması sonucu kılcallık azalmaktadır. Bu azalma agreganın granülometreleri (D) eğrisine uygun betonlarda yaklaşık olarak dozajın 300 kg/m^3 değerinden, agreganın granülometreleri (E) eğrisine uygun betonlarda ise yaklaşık olarak dozajın 350 kg/m^3 değerinden itibaren belirli şekilde yavaşlamaktadır. Dozajın bu kritik değerlerinden daha fakir dozlu betonlarda, beton bünyesinde önemli miktarda kılcal boşluklar meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu kritik dozaj değerlerinin üstünde hemen hemen sabitleşen kılcallığın sınır değerleri, değişik şartlarda birbirinden farklı değerler olmaktadır. Bu da, dozajın kılcallığa etkisini, diğer faktörlerle beraber düşünmek gerektiğini ortaya çıkarmaktadır (Uyan 1975).

Kılcallığın zamanla artışını daha iyi değerlendirmek için, hidrasyona bağlı olarak betonun boşluk yapısında meydana gelen değişiklikleri incelemek gerekir. Bu değişiklikler betonun sertleşmiş çimento hamuru bünyesindeki kılcal ve jel boşluklarında olur. Önce bütün boşluklar kılcal boyuttadırlar. Hidratasyon olayı gelişirken bu boşluklar hidrate elemanlar tarafından doldurulur ve böylece, zamanla jel boşlukları artarken toplam kılcal boşluk hacmi azalır. 90 günlük betonların kılcal boşluk yüzdeleri 28 günlüklere göre daha küçük olmaktadır (Uyan 1975).

Kılcal porozitedeki azalmanın hidrasyonun gelişimi ile doğrudan doğruya orantılı olduğu belirtmiştir (Auskern 1973).

Bağlayıcı maddeler; tane çapı 90 mikrondan küçük toz halindeki yapı malzemeleridir (Özcan 1999, Postacıoğlu 1987). Bağlayıcılara su ilave edildiğinde elde edilen karışım başlangıçta plastik bir haldedir. Bu durum çimento ve suyun aralarında hidrasyon yapmasıyla zamanla değişerek katılaşma ve sertleşme gerçekleşir. Burada; hidrasyon; kimyasal olay, katılaşma; fiziksel olay olup sertleşme ise mekanik bir olaydır (Postacıoğlu 1987).

2.3.2.c. Katkı maddelerinin kılcal geçirimsizliğe etkisi

Çimentoların sahip olduğu özellikleri iyi yönde ve belirli ölçüde değiştirmek amacıyla betonun üretimi esnasında karışıma az miktarda ilave edilen maddelere katkı maddeleri denir. Bu maddelerin kullanılmasıyla çimentonun mukavemet artışını hızlandırmak, beton üretiminde daha az su kullanarak mukavemeti arttırmak, kendiliğinden sıkışabilen beton üretmek, soğuk havalarda beton dökülebilmek ve dış etkilere karşı dayanıklı betonların üretmek mümkündür.

Genel anlamda, mineral katkı maddelerinin betonda dayanıklılığı artırıcı fonksiyonlarının en başında, beton boşluk yapısını iyileştirmeleri ve dolayısı ile kılcal geçirimsizliği azaltmaları gelmektedir. Betonun bir fiziksel özelliği olarak bahsedilebilen kılcallık veya geçirimsizlik, dayanıklılığının önemli bir belirleyicisidir. Betonda geçirimsizlik, bağlayıcı malzeme miktarı, su içeriği, agrega tane dağılımı ve kür koşulları gibi değişkenlere bağlıdır (Uyan vd 1998).

Mineral katkıların beton geçirimsizliğine olan etkisi, dayanıma olan etkisinden daha belirgindir. Yapılan çalışmalar, çimento hamuru içindeki iri agreganın altında kalan boşlukların, daha fazla olduğunu göstermektedir. İri agreganın altındaki büyük

boşluklar, betondaki terleme sonucu oluşur. Söz konusu boşluklarda, kalsiyum hidroksit kristalleri gelişir. Bu kristaller, gevrek ve geçirimli olup kolayca karbonatlaşabilir. Bu zayıf bölge, hem betonun dayanımını, hem de geçirimliliğini önemli ölçüde etkiler. w/c oranı düştükçe ve çimento içeriği arttıkça kılcal geçirimlilik azalır (Taşdemir 1998).

Basınç dayanımı, betonun tüm pozitif nitelikleri ile paralellik gösterir. Yüksek dayanımlı beton; Doludur, serttir, su geçirmez, aşınmaz ve dış etkenlere karşı dayanıklıdır. Böylece betonda basınç dayanımını belirlemekle, onun hakkında genel bir değerlendirme yapılabilir. Ayrıca basınç dayanımını belirlemek diğer denetleme yöntemlerine göre daha kolaydır (Kantar 1998; Öztürk 1996).

Yüksek performanslı betonda kimyasal ve mineral karışımların kullanımı, betonun boşluk yapısının düşmesine neden olabilir. SAK'lar, betonun karışım suyunu %25'lere varan oranda azaltırken SD, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral karışımlar, betonun porozitesindeki düşmenin yanında, harç yapısı ve agrega ara yüzeyindeki boşlukların azalmasını sağlarlar (Hassan *et al.* 2000).

Betonda kılcallık olayı, betonun boşluk yapısı ile doğrudan ilgilidir. Betonun boşluk yapısı ise, betonu oluşturan bileşenlerin agrega taneleri arasındaki boşluğu doldurması ile ilgilidir. Betondaki bileşenler agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurmaya yeterli değilse, betonun boşluk yapısı artacağı gibi, kılcallık özelliği de beraberinde artacaktır. Yüksek dayanımlı betonlar normal betonlara göre bu konuda biraz daha şanslı sayılabilirler. Yüksek dayanımlı betonların bünyesine katılan SD, cüruf gibi endüstriyel katkı maddeleri betonun boşluk yapısını düşürür. Fakat bu endüstriyel katkıların betondaki etkisi, betonun diğer birçok özelliği ile de ilişkilidir. Örneğin betonun yeteri derecede işlenebilir olması, su-bağlayıcı ilişkisinin iyi ayarlanmasına bağlıdır. Aksi takdirde, kullanılan malzeme üzerine düşen işlevi yapamayacaktır. Faydası beklenen durumda zararıyla karşılaşılacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Programının Tanıtımı

Bu bölüm, Materyal ve Yöntem kısımlarından oluşmaktadır. Materyal kısmında çalışmanın amacı doğrultusunda doğal agrega, Genleştirilmiş perlit agregası (GPA), Pomza agregası (PA), Hava sürükleyici katkı (HSK), çimento, Silis dumanı (SD), karma suyu, Süper akışkanlaştırıcı (SAK) maddesi ve kullanılan diğer malzemeler ile çalışmalarda kullanılan aletler hakkında bilgi verilmektedir. Yöntem kısmında ise agrega özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemler, bu agregalar ile üretilen betonların karışım hesaplarının belirlenmesi, taze betonun üretimi ve sertleşmiş betonun özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler açıklanmıştır.

Agrega deneyleri, beton üretimi, taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton üzerinde yapılan deneyler Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında yapılmıştır. Gerek agrega deneylerinde gerekse beton deneylerinde TSE (Türk Standartları Enstitüsü) standartları dikkate alınmıştır.

Betonun yüksek sıcaklık etkilerinde dayanıklılıklarını karşılaştırmak için sabit w/c (0,35) oranında ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA ve PA kullanılmıştır. Aynı w/c oranına sahip betonda %4 ve %6 hava boşluğu oluşturmak için %0,075 ve %0,15 oranında hava sürükleyici katkı kullanılarak betonlar hava boşluklu betonlar üretilmiştir. Ayrıca agrega hacmi yerine %0,15, %0,25, %0,35 ve %0,50 oranlarında polipropilen lif (PPF) kullanılarak üretilen betonlar da kontrol betonları ile karşılaştırılmıştır. Beton örnekler üretildikten sonra bir gün kalıpta bekletilmiş olup kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ kirece doymuş suda bekletilmiş ve sudan çıkarılan numuneler deneylere maruz bırakılmadan önce 1 gün laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmışlardır. Birim ağırlık, basınç mukavemeti ve kılcal geçirimsizlik için

her gruptan 3'er adet 10x20 cm'lik silindirik numune üretilmiştir. Böylece 4 grup PA, 4 grup GPA, 4 grup PP lif ve 2 grup hava sürükleyici katkılı beton olmak üzere 14 grup için 336 silindir numune üretilmiştir. Ayrıca her bir grubun karşılaştırılmasında kullanılmak üzere kontrol betonları üretilmiştir. Kontrol gruplarında yüksek sıcaklık etkilerinden sonra soğutma şekillerinin etkisi de incelenmiştir. Bu amaçla 7 farklı sıcaklık için 6'şar adet (3 suda soğutma, 3 havada soğutma) ve ısıtılmamış ($23\pm 1^{\circ}\text{C}$ için) 3'er adet olmak üzere 45 silindir numunesi üretilmiştir. **Böylelikle çalışmada üretilen numune sayısı toplam 381 silindir olmuştur.** Beton grupları Çizelge 3.10-Çizelge 3.13'de detaylı olarak gösterilmiştir. Çalışmada agrega deneyleri ve beton üretimi yapılarak taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır. Numunelerden elde edilen taze ve sertleşmiş beton deney sonuçları yorumlanarak Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.2. Materyal

3.2.1. Deneyde kullanılan malzemeler

a. Agregalar

Agregaların granülometri bileşiminin o agregayı kullanarak üretilen betonun özellikleri üzerinde, önemli etkileri olduğundan; çalışmada ayarlanmış tek tip granülometri kullanma yoluna gidilmiştir. Betonlu oluşturan agregaların tane dağılımı en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak TS 802 (1985)'de belirtildiği gibi gösterilen ideal bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. Bu açıdan araştırmada agregalar ayarlanmış granülometri eğrisine uygun olarak kullanıldığından, agregalar 2, 4, 8 ve 16 mm'lik eleklerden elenmiş ve elde edilen agregalar kum için 0-2 ve 2-4, iri dere agregası için 4-8 ve kırmataş için ise 8-16'lık tane sınıfları halinde kullanılmak üzere muhafaza edilmiştir.

Deneyleerde dere agregası olarak Erzurum ili sınırları içerisinden temin edilen doğal, kırılmamış agregası kullanılmıştır. Kırılmamış, doğal agregası dere malzemesi olup kullanımdan önce yıkanmış halde temin edilmiştir.

Çalışmada 8–16 tane sınıfı için dere agregası yerine Erzurum-Erzincan il sınırındaki Karayolları tesislerinden temin edilen kalker türü kırma taş su ile yıkanarak temizlenerek kullanılmıştır. Bu agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneyleerle malzemelerin çeşitli özellikleri tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.



şekil 3.1. Agregaların sınıflara ayrılmış şeklindeki görünümü



Şekil 3.2. Agregaların sınıflara ayrılmış şeklindeki diğer görünümü

b. Genleştirilmiş perlit agregası

Genleştirilmiş perlit agregası, İzmir Cuma Ovası Etibank Perlit Genleştirme Tesislerinden sağlanmıştır. Genleştirilmiş perlit agregası karışımlarda 0–2 tane sınıflı ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Genleştirilmiş perlit agregasının fiziksel ve kimyasal analizi sonuçları malzeme ile birlikte firmadan temin edilmiştir. Genleştirilmiş perlit agregasının fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Genleştirilmiş perlitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel Özellikleri		Kimyasal Özellikleri	
		Bileşen	(%)
Özgül ağırlık	0,28	SiO ₂	71
Renk	Beyaz	Al ₂ O ₃	12,5
Ergime Noktası (°C)	1300	Na ₂ O+K ₂ O	7,3
Isı İletkenliği (W/mK)	0,034–0,045	CaO	0,3

c. Pomza agregası

Deneylelerde kullanılan pomza agregası Van-Erciş mevkiinden alınmıştır. Agregası tane çapı (0–2 mm) aralığındaki ince agregası yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası kullanılmıştır. Pomza agregasının fiziksel ve kimyasal analizi Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarı ve Kimyasal Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Analiz sonuçları izelge 3.2 ve izelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Pomza agregasının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özgöl ağırlık	Kuru özgöl ağırlık	0,74
	Doygun kuru yüzey ağırlık	1,08
	Görünen özgöl ağırlık	1,13
Su emme (%)		46
Klorür muhtevası (%)		0,0037
Asitte çözünebilen sülfat (%)		0,182
Toplam kükürt muhtevası (%)		0,033
Magnezyum sülfat (%)		1,41

Çizelge 3.3. Pomza agregası kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal bileşen	Yüzde miktarı (%)
SiO ₂	69,78
Al ₂ O ₃	11,16
F ₂ O ₃	2,11
CaO	2,47
MgO	0,6
SO ₃	0,06
Kızdırma kay.	4,66
Na ₂ O	4,33
K ₂ O	2,87
Cl	0,0496
Toplam	98,04
Özgül ağırlık (0-2mm)	1,08

d. Çimento

Bu çalışmada, Aşkale Çimento Fabrikasının 2007 yılında üretmiş olduğu Portland çimentosu (PÇ 42,5) kullanılmıştır. Bu çimentonun yine aynı fabrikada yaptırılan fiziksel, mekanik ve kimyasal analizlerinin sonuçları Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Özgül Ağırlık		3,13
Priz Başlangıcı (saat)		2,10
Priz Sonu (saat)		3,15
Hacim Genleşmesi (mm)		3
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	23,5
	7 gün	35,3
	28 gün	47,0
Eğilme dayanımı(MPa)	2 gün	5,0
	7 gün	6,2
	28 gün	7,7

Çizelge 3.5. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşen	Oran (%)
SiO ₂	19,94
Al ₂ O ₃	5,28
Fe ₂ O ₃	3,45
CaO	62,62
MgO	2,62
SO ₃	2,46
Kızdırma Kaybı	1,99
Na ₂ O	0,23
K ₂ O	0,83
Cl	0,0107
Tayin Edilemeyen	0,08
Toplam	100
Serbest CaO	0,51
Çözünmeyen Kalıntı	0,70

e. Karma suyu ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi

Beton üretiminde kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. Çalışmada karma suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

Süper Akışkanlaştırıcı katkı maddesi olarak Sika® firmasının ürettiği Sikament FFN adlı ürün kullanılmıştır. Bu ürün betonun karma suyunu yüksek oranda azaltarak erken ve son dayanımını artıran veya aynı miktarda su ile betona yüksek oranda akışkanlık özelliği kazandıran süper akışkanlaştırıcı katkı maddesidir. Su azaltıcı özelliği olarak katkısız betona göre 1 günlük dayanımı %40, 28 günlük dayanımı ise %15 artırmaktadır. Karışıma çimento ağırlığının %1,5'i kadar katılmıştır. Karışımda kullanılan suyu dozaja bağlı olarak %20'nin üzerinde azaltmıştır. Sika firmasından bazı özellikleri ile temin edilen süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Süper akışkanlaştırıcı katkının özellikleri

Adı	Sikament FFN
Tipi	Melamin sülfonat polimeri esaslı sıvı
Renk	Kahverengi, homojen ve sıvı
Yoğunluk (kg/L)	1,22±0,02

f. Silis dumanı

Antalya Electrometalurji İşletmesinde Silico Ferrokrom üretimi esnasında baca gazları ile beraber ortamı terk eden tozlar elektro filtrede toplanmaktadır. Tozların toplanmasının ilk amacı çevre kirliliğini önlemek içindir. Bu çalışmada söz konusu tesisten fiziksel ve kimyasal analizi ile birlikte temin edilen SD kullanılmıştır. SD'nin

kimyasal bileşimi Çizelge 3.7’de verilmiştir. Karışımlarda çimento ağırlığının %7’si kadar SD kullanılmıştır.

Çizelge 3.7. Silis dumanının kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	93,7
Fe ₂ O ₃	0,35
Al ₂ O ₃	0,3
MgO	0,85
CaO	0,38
C	-
S	-
Kızdırma Kaybı	5,45

g. Hava sürükleyici katkı maddesi

Hava sürükleyici katkı olarak; Sika firmasının ürettiği Sika® AER adlı; kullanıma hazır ASTM C 260 standardına ve TS EN 934-2 özelliklerine uygun katkı maddesi kullanılmıştır. Betonda %4, %6 oranında boşluk oluşturacak şekilde yapılan deneme karışımları sonunda karışıma sırasıyla %0,075 ve %0,15 oranlarında katılarak hava sürüklenmiş boşluklu betonlar elde edilmiştir. Hava sürükleyici katkının bazı özellikleri Çizelge 3.8’de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Hava sürükleyici katkının bazı özellikleri

Adı	Sika AER
Kimyasal Yapı	Özel yüzey aktif maddelerden oluşan sıvı
Renk	Renksiz, şeffaf, homojen sıvı
Yoğunluk (kg/L)	1.01±0.01
pH değeri	3–7

h. Polipropilen Lif

Polipropilen lif olarak Sika firmasının ürettiği Sika® Fibre adlı katkı maddesi kullanılmıştır. Karışımlara agrega hacminin %15, %25, %35, %50'si oranlarında katılmıştır. Sika-Fibre, yüksek kalitedeki monofilament mikro polipropilen liflerden oluşur. Sika-Fibre taze betonun şekil değiştirme kapasitesini artırarak betondaki plastik büzülme çatlaklarını kontrol altına almak ve azaltmak amacıyla üretilmiştir. Polipropilen lifin bazı özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Polipropilen lifin bazı özellikleri

Özgül Ağırlık	0,91 g/cm ³
Lif Uzunluğu	12 mm
Lif Çapı	18 mikron-nominal
Su Emme	Eser miktarda
Ergime Noktası	160°C
Tutuşma Sıcaklığı	365°C
Isı İletkenliği	Düşük
Liflerin Özgül Yüzey Alanı	250 m ² /kg
Asit Direnci	Yüksek
Alkali Direnci	%100
Çekme Dayanımı	300–400 N/mm ²
Elastiklik Modülü	~ 4000 N/mm ²

i. Diğer malzemeler

Sertleşmiş beton numunelerin başlıklanmasında kükürt, beton numunelerinin kuru için kirece doygun su ortamının sağlanmasında kireç ve numuneleri kalıplardan kolayca çıkmasını sağlamak için kalıplarda ince motor yağı kullanılmıştır.

3.2.2. Deneyde kullanılan aletler

a. Elekler

Deneylerde TS 1227- ISO 3310–1(1996)'ye uygun toplama kabı, 2 mm ile TS 1226 ISO 3310–2 (1996) ye uygun 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.

b. Betonyer

ELE firmasının ürettiği 135° açılı yapacak kadar manevra yapabilen 100 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betonyer kullanılmıştır.

c. Çökme konisi

Çökme konisi, taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalden yapılmış kesik koni şeklindedir. Alt kısmında oynamasını önlemek için iki adet basma kulaklığı mevcuttur.

d. Şişleme çubuğu

Numunelerin kalıplara konulup, sıkıştırılması işlemi sırasında 600 mm uzunluğunda 16 mm çapında standart çelik şişleme çubuğu kullanılmıştır.

e. Kalıplar

10x20 cm ebadında plastik silindirik kalıplar kullanılmıştır.

f. Fırın

Numunelerin yüksek sıcaklıklarda ısıtılması için 1100°C kapasiteli, 5°C/dakika ve 12°C/dakika sıcaklık artış hızı olmak üzere iki farklı ısıtma hızına sahip özel olarak yaptırılmış fırın kullanılmıştır.

g. Pres

Bu çalışmada sertleşmiş beton deneylerinde numunelerin basınç dayanımlarının belirlenmesinde ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır.

3.3. Yöntem**3.3.1. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler**

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuara getirilen dere agregası ve kırmataş agregası için agrega deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS 1114 EN 13055-1'de belirtilen dörde bölerek küçültme (çeyrekleme) metodu kullanılmıştır. Bu metotta

belirtildiği gibi, laboratuardaki malzemenin tümünü temsil etmesi için yığının her tarafından alınan örnekler düz bir zemin üzerine her tarafı eşit ve çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra bu dairesel yığın kürekle dörde bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar çeyrekleme işlemine devam edilmiştir.

Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu değerler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Dere agregası ve kırmataş agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 (1999)'a göre belirlenmiştir. Deneylerde TS 1227- ISO 3310-1(1996)' ya uygun toplama kabı, 2 mm ile TS 1226 ISO 3310-2 (1996)'ya uygun 4 mm, 8 mm, 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır. Dere agregası ve kırmataş agreganın düzeltilmiş granülometri eğrisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Bu çalışmaya konu olan betonlarda %55 iri, %45 ince agrega oranları kullanılmıştır. İri agreganın %35'i 8-16 mm, %20'si de 4-8 mm arasındaki agregalardan alınmıştır. İnce agreganın %15'i 2-4 mm, %30'u ise 0-2 mm arasında olacak şekilde granülometri düzeltilmiştir. Agregalarının tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 prEN 933-1(1997)'a göre belirlenmiştir.

Hafif agrega olan GPA ve PA için beton karışım hesaplarında kullanılan özgül ağırlık faktörü deneyi, agreganın kullanıldığı andaki nem durumuna göre, TS 3234 (1978)'e göre piknometre yöntemi ile belirlenmiştir. Piknometre olarak 1000 mL'lik cam mezür kullanılmış olup 10 dakikalık su emme süresi esas alınmıştır.

Bu deneyde, agreganın içinde bulunan ve tane büyüklüğü 0,063 mm den küçük olan ince maddelerin oranı, tane büyüklüğüne bağlı olarak, aşağıdaki yöntemlerden biri ile belirlenir. İri ve ince agregaya için TS 3527'ye göre bulunan sonuçlar Çizelge 4.2 ve 'de verilmiştir. Deneylerde, iri agregaya için yıkama yöntemi, ince agregaya için ise çökeltme yöntemi kullanılmıştır. TS706 EN 12620 (2003)' e göre 0–4 mm, 1–4 mm, 2–8 mm ve 4–63 mm agregaya gruplarında bulunabilecek ince maddelerin maksimum miktarı (agrega numunesinin ağırlıkça %'si olarak), sırasıyla, %4, %3, %2 ve % 0,5 olmalıdır.

TS 1744–1' e göre deney numunesi 8 mm göz açıklı kare gözlü tel elekten geçen agregaya ölçü silindirinin 130 ml işaret çizgisine kadar doldurulmuştur. Üzerine 200 mL'lik işaret çizgisine ulaşınca kadar %3'lük sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. 24 saat bekletildikten sonra numuneler üzerindeki sıvının rengine bakarak agregaya da zararlı organik madde olup olmadığına karar verilmiştir.

Bu standart, deneylerde beton yapımında kullanılacak doğal ve yapay agregaların kuru veya doymuş kuru yüzey özgül ağırlıklarını ve görünen özgül ağırlığı ile su emme oranını belirlemek üzere uygulanan deney yöntemlerini içermektedir (Anonim 1980). Agregaların kuru özgül ağırlığı, doymuş kuru yüzey özgül ağırlığı ve görünen özgül ağırlığı ince ve iri agregalara ayrı ayrı uygulanan deneylerle TS EN 1097–6'ya uygun olarak tayin edilmiştir.

3.3.2. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Bu bölümde, deneyler için üretilen beton karışımlarının tespiti ile bu betonlarda kullanılan agregaların granülometri eğrilerinin tespitinde izlenen yol açıklanmıştır.

Beton karışım hesabı; istenen kıvam, işlenebilme, dayanım, dayanıklılık, hacim sabitliği ve diğer aranan özelliklere sahip en ekonomik betonu elde etmek amacıyla gerekli

agrega, çimento, su, hava ve gerektiğinde katkı maddesi miktarlarını tespit etmek için yapılan hesaptır. Beton karışım hesaplarının amacı, sonunda elde edilecek, yerine dökülmüş 1 m³ beton için gerekli bileşenlerin önceden tahmin edilmesidir.

Uygulamada genellikle en büyük tane boyutlu 16 mm olan agrega için kum yüzdesi, kuru gevşek hacim esasına göre, %40 ile %60 arasında olmalıdır. İnce agrega olarak tabii kum kullanıldığında, kumun kuru gevşek hacminin toplam agreganın %40'ının üstüne çıktığı enderdir. Agreganın en büyük tane boyutu azaldıkça ince agrega oranı artar.

Beton karışımlarında kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 16 mm olarak alınmıştır. Agreganın tane dağılımı ise en büyük tane çapına bağlı olarak TS 706 (2003)'da verilen sınır değerler içinde kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarlama sonucu tane sınıflarının oranları, 0–2 için %30, 2–4 için %15, 4–8 için %20, 8–16 için %35 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1 incelendiğinde seçilen bu eğri de TS 706 (2003)'da, maksimum tane çapı 16 mm için verilen standart eğrilerde “uygun bölge” (3. bölge)'ye düşmektedir.

Yukarıda açıklandığı şekilde çalışmada ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır. Bu sebeple agregalar karışımlara doğal halleri ile değil de tane sınıflarına ayrılmış olarak katılmışlardır. Ayırma işleminde 0–2 mm ince agrega için hem dere agregası hem de GPA, hem de PA, 2–4 mm'lik ince ve 4–8 mm'lik iri agrega için dere agregası, 8–16 mm'lik iri agrega için kırmataş agrega kullanılmıştır. Üretilen betonlarda su/bağlayıcı madde oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Ayrıca karışımlarda çimento ağırlığının %7'si kadar SD kullanılmıştır.

Karışımlarda, karışımdaki (0–2) aralığındaki toplam agrega hacminin %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA ve PA; toplam karışım hacminin %0,075 ve %0,15 oranlarında HSK katılmıştır. PPF ise agrega hacminin %15, %25, %35, %50'si

oranlarında katılmıştır. Ayrıca mukayese amaçlı olarak kontrol numuneleri üretilmiştir. Böylelikle toplam 16 grup karışım yapılmıştır.

3.3.3. Karışım oranlarının belirlenmesi

Beton karışım hesabı hacim esasına göre yapıldıktan sonra, ince agregaya hacmi özgül ağırlık faktörüyle, iri agregaya hacmi ise özgül ağırlık ve nem yüzdeleri ile çarpılarak karışıma ağırlıkça ilave edilmiştir

Agrega tane sınıflarının oranları belirlenirken ayarlanmış granülometri eğrisi kullanılmıştır (Şekil 4.1). Buna göre 0–2 tane sınıfı kumdan %30, 2–4 tane sınıfı ince agregadan %15, 4–8 tane sınıfı iri agregadan %20 ve 8–16 tane sınıfı iri agregadan %35 oranlarında malzeme karışıma ilave edilmiştir. Betonun kapasitesine bağlı olarak bir seferde 45 dm³ beton üretilmiştir.

Beton karışımı için TS 802'ye göre hesap yapılmıştır. Burada ilk olarak çimento dozajı (500 kg/m³) ve su miktarı (çimento ağırlığının %35'i) olarak alınmıştır. Karma suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır. Su içinde betona olumsuz bir etki yapacak herhangi bir zararlı maddeye rastlanmamıştır. Su sıcaklığı ise yaklaşık 20°C olarak belirlenmiştir. Sonra %2'lik hava hacmi (hava sürüklenmemiş betonlarda), çimento hacmi ve suyun hacmi 1000 dm³'den çıkarılarak toplam agregaya hacmi bulunmuştur. İşlenebilirliği iyileştirmek için beton numunelerinde çimento ağırlığının %1-2'si kadar SAK kullanılmıştır.

Örnek 1: Kontrol numuneleri için karışım hesabı

- Dozaj 500 Kg/m^3 (PÇ 42,5),
- Silis Dumanı (SD) %7,
- Su-Bağlayıcı Oranı: 0,35

$$\text{Su hacmi (V}_{\text{SU}}\text{)}=500 \times 0,35=175 \text{ kg veya } 175 \text{ dm}^3$$

$$\text{Çimento hacmi (V}_{\text{Ç}}\text{)}=465/3,10=150 \text{ dm}^3$$

$$\text{Silis Dumanı hacmi (V}_{\text{SD}}\text{)}=35/2,2=15,909 \text{ dm}^3$$

$$\text{Hava hacmi (V}_{\text{H}}\text{)}= 1000 \times 0,02=20,00 \text{ dm}^3$$

$$\text{S.A.K. hacmi (V}_{\text{SAK}}\text{)}= 500 \times 0,015/1,2 = 6,25 \text{ dm}^3 \text{ olur.}$$

Bu durumda 1 m^3 'lük karışım içindeki agrega hacmi ise;

$$V_a=1000-[175+150+15,909+20+6,25]$$

$$V_a=632,84 \text{ dm}^3 \text{ bulunmuştur.}$$

%93'lük PÇ + %7 Silis Dumanı için agrega hacimleri:

$$\text{Kum (0-2)} \quad : \quad \%30 \text{ için} \quad (632,84 \times 0,30)=189,852 \text{ dm}^3$$

$$\text{Kum (2-4)} \quad : \quad \%15 \text{ için} \quad (632,84 \times 0,15)=94,926 \text{ dm}^3$$

$$\text{Çakıl (4-8)} \quad : \quad \%20 \text{ için} \quad (632,84 \times 0,20)=126,568 \text{ dm}^3$$

$$\text{Çakıl (8-16)} \quad : \quad \%35 \text{ için} \quad (632,84 \times 0,35)=221,494 \text{ dm}^3$$

Agregaların KYD Ağırlıkları:

$$\text{Kum (0-2)} \quad : \quad 189,852 \times 2,40=455,645 \text{ kg}$$

$$\text{Kum (2-4)} \quad : \quad 94,926 \times 2,54=241,112 \text{ kg}$$

$$\text{Çakıl (4-8)} \quad : \quad 126,568 \times 2,62=331,609 \text{ kg}$$

$$\text{Çakıl (8-16)} \quad : \quad 221,494 \times 2,68=593,605 \text{ kg}$$

Beton İçin Gereken Malzeme Miktarı:

Çimento	:	465 kg
SD	:	35 kg
Su	:	175 kg
S.A.K.	:	6,25x1,2=7,5 kg
Kum (0–2)	:	455,645 kg
Kum (2–4)	:	241,112 kg
Çakıl (4–8)	:	331,609 kg
Çakıl (8–16)	:	593,605 kg
TOPLAM	:	2.304,471 kg/m³

Örnek 2: %25 GPA agregalı numuneler için karışım hesabı

- Dozaj 500 Kg/m³ (PÇ 42,5),
- Silis Dumanı %7,
- Su-Bağlayıcı Oranı: 0,35
- %25 GPA

Su hacmi (V_{SU})=500x0,35=175 kg veya 175 dm³

Çimento hacmi (V_C)=465/3,10=150 dm³

Silis Dumanı hacmi (V_{SD})=35/2,2=15,909 dm³

Hava hacmi (V_H)=1000x0,02=20,00 dm³

S.A.K. hacmi (V_{SAK})=500x0,015/1,2=6,25 dm³

GPA hacmi (V_{GPA})=189,852x0,25x0,28=13,29 dm³ olur.

Bu durumda 1 m³'lük karışım içindeki agrega hacmi ise;

$V_a=1000-[175+150+15,909+20+6,25]$

$V_a=632,84$ dm³ bulunmuştur.

%93'luk PÇ+%7 Silis Dumanı için agrega hacimleri:

Kum (0–2)	:	%22,5 için	$(632,84 \times 0,225) = 142,389 \text{ dm}^3$
GPA (0–2)	:	%7,5 için	$(632,84 \times 0,075) = 47,463 \text{ dm}^3$
Kum (2–4)	:	%15 için	$(632,84 \times 0,15) = 94,926 \text{ dm}^3$
Çakıl (4–8)	:	%20 için	$(632,84 \times 0,20) = 126,568 \text{ dm}^3$
Çakıl (8–16)	:	%35 için	$(632,84 \times 0,35) = 221,494 \text{ dm}^3$

Agregaların KYD Ağırlıkları:

Kum (0–2)	:	$142,389 \times 2,40 = 341,734 \text{ kg}$
GPA (0–2)	:	$47,463 \times 0,28 = 13,290 \text{ kg}$
Kum (2–4)	:	$94,926 \times 2,54 = 241,112 \text{ kg}$
Çakıl (4–8)	:	$126,568 \times 2,62 = 331,609 \text{ kg}$
Çakıl (8–16)	:	$221,494 \times 2,68 = 593,605 \text{ kg}$

Beton İçin Gereken Malzeme Miktarı:

Çimento	:	465 kg
Silis Dumanı	:	35 kg
Su	:	175 kg
SA	:	$6,25 \times 1,2 = 7,5 \text{ kg}$
Kum (0–2)	:	341,734 kg
GPA (0–2)	:	13,290 kg
Kum (2–4)	:	241,112 kg
Çakıl (4–8)	:	331,609 kg
Çakıl (8–16)	:	593,605 kg
TOPLAM	:	2.203,85 kg/m³

Örnek 3: %0,15 PP Lif katkıli numuneler için karışım hesabı

- Dozaj 500 Kg/m^3 (PÇ 42,5),
- Silis Dumanı %7,
- Su-Bağlayıcı Oranı: 0,35
- %0,15 PP Lif

Su hacmi (V_{SU})= $500 \times 0,35 = 175 \text{ kg}$ veya 175 dm^3

Çimento hacmi (V_C)= $465/3,10 = 150 \text{ dm}^3$

Silis Dumanı hacmi (V_{SD})= $35/2,2 = 15,909 \text{ dm}^3$

Hava hacmi (V_H)= $1000 \times 0,02 = 20,00 \text{ dm}^3$

S.A.K. hacmi (V_{SAK})= $500 \times 0,015/1,2 = 6,25 \text{ dm}^3$ olur.

PP Lif hacmi (V_{PP})= $1000 \times 0,015 = 1,5 \text{ dm}^3$ olur.

Bu durumda 1 m^3 'lük karışım içindeki agrega hacmi ise;

$V_a = 1000 - [175 + 150 + 15,909 + 20 + 6,25 + 1,5]$

$V_a = 631,34 \text{ dm}^3$ bulunmuştur.

%93'lük PÇ+%7 Silis Dumanı için agrega hacimleri:

Kum (0–2) : %30 için $(631,34 \times 0,30) = 189,402 \text{ dm}^3$

Kum (2–4) : %15 için $(631,34 \times 0,15) = 94,701 \text{ dm}^3$

Çakıl (4–8) : %20 için $(631,34 \times 0,20) = 126,268 \text{ dm}^3$

Çakıl (8–16) : %35 için $(631,34 \times 0,35) = 220,969 \text{ dm}^3$

Agregaların KYD Ağırlıkları:

Kum (0–2) : $189,402 \times 2,40 = 454,565 \text{ kg}$

Kum (2–4) : $94,701 \times 2,54 = 240,541 \text{ kg}$

Çakıl (4–8) : $126,268 \times 2,62 = 330,823 \text{ kg}$

Çakıl (8–16) : $220,969 \times 2,68 = 592,198 \text{ kg}$

Beton İçin Gereken Malzeme Miktarı:

Çimento	:	465 kg
Silis Dumanı	:	35 kg
Su	:	175 kg
SA	:	6,25x1,2=7,5 kg
PP Lif	:	1,5x0,91=1,365 kg
Kum (0–2)	:	454,565kg
Kum (2–4)	:	240,541kg
Çakıl (4–8)	:	330,823kg
Çakıl (8–16)	:	592,198kg
TOPLAM	:	2.301,992 kg/m³

Örnek 4: %0,075 Hava sürükleyici katkılı numuneler için karışım hesabı

- Dozaj 500 Kg/m³ (PÇ 42,5),
- Silis Dumanı %7,
- Su-Bağlayıcı Oranı: 0,35
- %0,075 HSK

Su hacmi (V_{SU})=500x0,35=175 kg veya 175 dm³

Çimento hacmi (V_C)=465/3,10=150 dm³

Silis Dumanı hacmi (V_{SD})=35/2,2=15,909 dm³

Hava hacmi (V_H)=1000x0,04=40,00 dm³

S.A.K. hacmi (V_{SAK})=500x0,015/1,2=6,25 dm³ olur.

HSK hacmi (V_{HSK})=500x0,00075/1,01=0,371 dm³ olur.

Bu durumda 1 m³'lük karışım içindeki agrega hacmi ise;

$V_a=1000-[175+150+15,909+40+6,25+0,371]$

$V_a=612,47$ dm³ bulunmuştur.

%93'luk PÇ+%7 Silis Dumanı için agrega hacimleri:

Kum (0–2)	:	%22,5 için	$(612,47 \times 0,30) = 183,741 \text{ dm}^3$
Kum (2–4)	:	%15 için	$(612,47 \times 0,15) = 91,870 \text{ dm}^3$
Çakıl (4–8)	:	%20 için	$(612,47 \times 0,20) = 122,494 \text{ dm}^3$
Çakıl (8–16)	:	%35 için	$(612,47 \times 0,35) = 214,364 \text{ dm}^3$

Agregaların KYD Ağırlıkları:

Kum (0–2)	:	$183,741 \times 2,40 = 440,978 \text{ kg}$
Kum (2–4)	:	$94,926 \times 2,54 = 233,351 \text{ kg}$
Çakıl (4–8)	:	$126,568 \times 2,62 = 320,934 \text{ kg}$
Çakıl (8–16)	:	$221,494 \times 2,68 = 574,497 \text{ kg}$

Beton İçin Gereken Malzeme Miktarı:

Çimento	:	465 kg
Silis Dumanı	:	35 kg
Su	:	175 kg
SA	:	$6,25 \times 1,2 = 7,5 \text{ kg}$
HSK	:	$0,371 \times 1,01 = 0,375 \text{ kg}$
Kum (0–2)	:	440,978 kg
Kum (2–4)	:	233,351 kg
Çakıl (4–8)	:	320,934 kg
Çakıl (8–16)	:	574,497 kg
TOPLAM	:	$2.252,635 \text{ kg/m}^3$

Ölçülen taze birim ağırlık değerleri karışım hesabında elde edilen teorik birim ağırlık değerlerine bölünerek her bir karışım grubu için elde edilen kat sayılar teorik değerlerle çarpılarak gerçek karışım oranları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10 - Çizelge 3.13'de verilmiştir.

Çizelge 3.10. Genleştirilmiş Perlit Agregalı Betonların Karışım Oranları

Katkı Türü		Kontrol	GPA			
Katkı Miktarı (%)		0	25	50	75	100
w/c oranı		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Çimento (kg)		483,6	501,0	525,5	534,8	544,1
Silis Dumanı (kg)		36,4	37,8	39,6	40,3	40,9
Su (kg)		182	189	197,8	201,3	204,8
SAK (kg)		7,8	8,1	8,5	8,6	8,8
Doğal Agrega (kg)	0–2 mm	474,9	369,1	257,4	131,0	-
	2–4 mm	250,8	260,4	272,5	277,3	282,1
	4–8 mm	344,9	358,1	374,7	381,4	387,9
	8–16 mm	617,3	641,1	670,8	682,6	694,5
GPA (kg)		-	14,35	30,03	45,85	62,2
Pomza (kg)		-	-	-	-	-
HSK (kg)		-	-	-	-	-
Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)		2400	2370	2370	2300	2230

Çizelge 3.11. Pomza Agregalı Betonların Karışım Oranları

Katkı Türü		Kontrol	Pomza			
Katkı Miktarı (%)		0	25	50	75	100
w/c oranı		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Çimento (kg)		483,6	479,0	488,3	479,0	479,0
Silis Dumanı (kg)		36,4	36,1	36,8	36,1	36,1
Su (kg)		182	180,3	183,8	180,3	180,3
SAK (kg)		7,8	7,7	7,9	7,7	7,7
Doğal Agrega (kg)	0–2 mm	474,9	352,0	239,2	117,3	-
	2–4 mm	250,8	248,3	253,2	248,3	248,4
	4–8 mm	344,9	341,6	348,2	341,6	341,6
	8–16 mm	617,3	611,4	623,3	611,4	611,4
GPA (kg)		-	-	-	-	-
Pomza (kg)		-	52,8	107,6	158,4	211,2
HSK (kg)		-	-	-	-	-
Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)		2400	2340	2340	2250	2220

Çizelge 3.12. Polipropilen Lifli Betonların Karışım Oranları

Katkı Türü		Kontrol	Polipropilen Lif			
Lif Miktarı (%)		0	0,15	0,25	0,35	0,5
w/c oranı		0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Çimento (kg)		483,6	492,9	488,3	567,3	492,9
Silis Dumanı (kg)		36,4	37,1	36,8	42,7	37,1
Su (kg)		182	185,5	183,8	213,5	185,5
SAK (kg)		7,8	7,9	7,8	9,1	7,9
Doğal Agregası (kg)	0–2 mm	474,9	481,8	476,5	551,6	479,2
	2–4 mm	250,8	255,0	252,2	292,5	253,6
	4–8 mm	344,9	350,7	346,8	402,3	348,7
	8–16 mm	617,3	621,8	620,8	720,2	624,2
PP Lif		-	1,447	2,389	3,886	4,823
Pomza (kg)		-	-	-	-	-
HSK (kg)		-	-	-	-	-
Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)		2400	2440	2420	2390	2420

Çizelge 3.13. Hava Sürükleyici Katkılı Betonların Karışım Oranları

Katkı Türü		Kontrol	Hava Sürükleyici Katkı	
Hava Miktarı (%)		2	4	6
w/c oranı		0,35	0,35	0,35
Çimento (kg)		483,6	479,0	492,9
Silis Dumanı (kg)		36,4	36,1	37,1
Su (kg)		182	180,3	185,5
SAK (kg)		7,8	7,7	7,9
Doğal Agregası (kg)	0–2 mm	474,9	454,2	451,8
	2–4 mm	250,8	240,4	239,1
	4–8 mm	344,9	330,7	328,9
	8–16 mm	617,3	591,7	588,7
GPA (kg)		-	-	-
Pomza (kg)		-	-	-
HSK (kg)		-	0,386	0,795
Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)		2400	2320	2330

3.3.4. Beton üretimi, numunelerin yerine konması ve kürü

Beton karışımı için malzeme miktarları ağırlık olarak alınıp yeterli miktarda taze beton harcı hazırlanmıştır. Bunun için, karışımı oluşturan malzemelerin muhtemel malzeme zayıfları düşünülerek yaklaşık %10 daha büyük oranda üretim gerçekleştirilmiştir. Beton üretimi için yapılan çalışmada, karışım oranları belirlenen malzemeler 1 gr hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra betonyere konulmuştur. İlk etapta betonyere sırasıyla kırma taş, çakıl, kum ve karışım suyu ile ıslatılmış; karışım grubuna göre GPA ya da PA ya da HSK (karışım suyu içerisinde), SD ve çimento konarak yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Sonra SAK içeren su, ağır ağır ilave edilmiştir. Böylece toplam 3 dakika karıştırma işlemi yapılmıştır. Betonyere malzeme konmadan önce her seferinde iç yüzey ve kanatlar beton harcı kalıntılarında ve diğer yabancı maddelerden temizlenip ıslak bezle nemlendirilmiştir.

Karışımlar hazırlanırken laboratuvar tipi bir betonyer kullanılmıştır. Betonyere her seferde bir gruptaki malzeme konulmuş olup, karıştırma sonunda elde edilen karışım 10x20 cm'lik silindirik kalıplara dökülmüştür. Kalıpların içi daha önceden yağlanmış olup harcın yerine yerleştirilmesinin akabinde mala ile üst yüzeyler düzeltilerek etiketlenmiştir. Beton numuneler laboratuvar ortamında açık yüzeyleri naylon örtü ile kaplı olarak 24 saat bekletilmiştir. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler kalıpları söküldükten sonra; kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığı $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ olan kür havuzuna konulmuştur. Her grubun numuneleri 28 gün kürde kaldıktan sonra çıkarılarak laboratuvar şartlarında sertleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuştur.

3.3.5. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Taze beton deneylerinden kıvam deneyi yapılmıştır. Bu deneyin yapılmasında standartlarda belirtilen yöntemler ve standart çökme hunisi kullanılmıştır (Anonim 2002).

Taze beton huniye üç tabaka halinde ve her tabaka huninin yaklaşık üçte birini dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Her tabaka 16 mm çapında ve 60 cm uzunluğundaki şişleme çubuğu ile 25'er defa kenarlardan ortaya doğru dairesel olarak düşey bir şekilde şişlenmiştir. Daha sonra huni yavaşça düşey olarak yukarı doğru çekilerek yığının yanına konulmuştur. En sonunda huninin üst yüzeyi ile taze betonun üst yüzeyi arasındaki yükseklik farkı okunarak betonun çökme değeri bulunmuştur.

Doldurma işlemi üç tabaka halinde yapılmış olup, her tabakada şişleme çubuğuyla 25'er defa şişlenmiştir. Doldurma işlemi bittikten sonra kalıpların yüzeyleri mala ile düzeltilmiş ve taze betonda nem kaybını önlemek amacıyla kalıpların üst tarafı naylon bir örtü ile örtülerek sarsıntısız bir yerde sertleşmeye bırakılmıştır. Bu şekilde 24 saat boyunca kalıpta bekleyen numuneler 24 saatin sonunda kalıptan çıkarılmış ve daha önceden hazırlanmış, sıcaklığı $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ olan, kirece doymuş su ihtiva eden kür havuzunda su kürü uygulanmıştır. Su içindeki numuneler sertleşmiş beton deneyleri uygulamasından bir gün önce kür havuzundan çıkarılarak ve laboratuvar şartlarında 1 gün bekletildikten sonra deneylere hazır hale getirilmiştir.

3.3.6. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışmada üretilen 16 farklı karışımın 28 günlük basınç dayanımı, kuru birim ağırlık ve kılcal geçirimsizlik ölçümleri yapılmış ve yüksek sıcaklığın bu parametreler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

3.3.6.a. Birim ağırlık

Numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kuru birim ağırlık tayini için, hava dolaşımı etüvde 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de tutulduktan sonra çıkarılmış, laboratuvar sıcaklığına ininceye kadar bekletildikten sonra tartılmıştır. Boyutları bilinen numunenin bu ağırlığı hacmine bölünerek kuru birim ağırlığı bulunmuştur. Daha sonra bu değerler yangın

sonrası değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

3.3.6.b. Basınç dayanımı

Numunelerin donma-zlmeden önceki ve sonraki basınç dayanımları 300 ton kapasiteli presle belirlenmiştir. Numuneler silindir şeklinde olup 10x20 cm ebadındadır. Sonuçlar her grup için, üç numunenin aritmetik ortalaması alınarak Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

Hava kurusu durumuna getirilmiş numunelerin basınç dayanımı tayininde kullanılmak üzere boyutları 1 mm hassasiyetle llerek yükün etki edeceği alan hesaplanmıştır. Bu işlemden sonra numune yüzeylerinin pres tablasına tam yapışması dolayısıyla da yükün bütün alana üniform olarak yayılması için silindir numuneler başlıklınmıştır. Başlıklılama işleminde kükürt kullanılmıştır. Başlıklılama işlemi bittikten sonra numuneler en az iki saat sertleşmeye bırakılarak basınç dayanımı tayin deneyi yapılmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarının hesaplanmasında standartlardaki yöntemler göz önünde bulundurulmuştur (Anonim 2003).

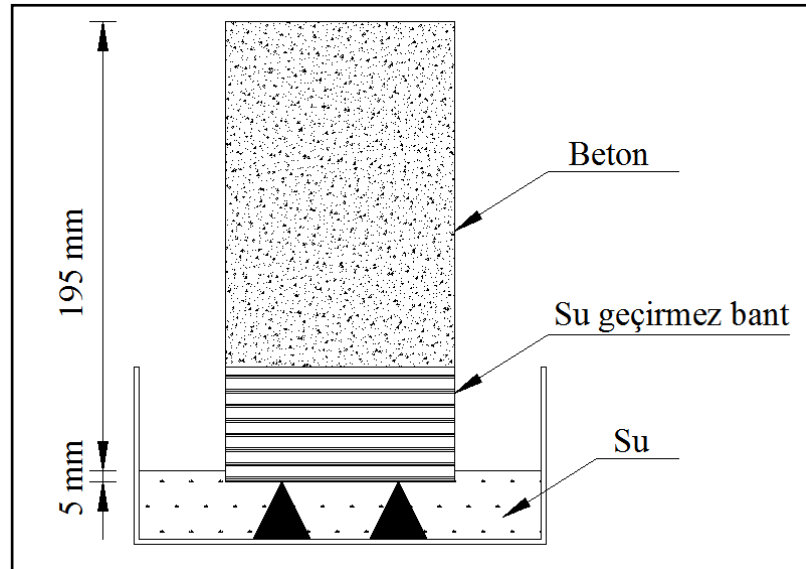
Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı, betonun basınç dayanımı üzerinde etkili bir parametredir (Baradan 1991). Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. Standartlarda belirtildiğine göre yükleme hızı 1,5–3,5 kg/cm²/s arasında olabilmektedir (Anonim 2003). 300 tonluk preste numunelerin üzerine gelen yükü üniform olarak yaklaşık 3,16 kg/cm²/s hızla devam edilmiş numune kırıldığı an presin elektronik göstergesinden kırılma yükü ve basınç dayanımı okunmuştur.

3.3.6.c. Kılcal geçirimsizlik deneyi

Yapı malzemelerinin yüzeyleri su ile temas ettiği vakit, suyun yüzey gerilimi dolayısı ile numunedeki boşluklar suyu kapiler olarak içeriye doğru çekerler. Bu deney kapiler su emme veya kılcal su emme deneyi diye adlandırılan deney tekniği ile yapılabilir. Kılcal su emme, betonun alt yüzeyinin su ile teması sonucu suyun betonun içerisinde yükselmesidir (Kocataşkın 2000; Uyan 1975). Su beton ile temasa geçtikten t süre sonunda, beton içerisindeki boşluklarda yükselmeye başlar. Belli bir h yüksekliğine ulaşır ve durur. Kılcallık katsayısının hesabında,

$$Q^2 = k \times t$$

eşitliğinden yararlanılmıştır. Burada; Q: birim alanda emilen su miktarı (cm^3/cm^2), k: kılcallık katsayısı (cm^2/sn), t: zaman (s) olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, süre 24 saat (86400 sn.) olarak alınmıştır.



Şekil 3.3. Kılcal geçirimsizlik deney düzeneği

ASTM standartları tarafından belirtilmiş bir yöntem yoktur (Erdoğan 2003). Türkiye’de ise TS EN 772–11 standardı bu konuya yakın olarak değinmiştir. Babu *et al.* (2004), CEB (1989)’a dayanarak permeabilite katsayısının (k), sayısal değerlerine göre betonun kılcal geçirimliliği hakkında bir yargıya varılabileceğini belirtmiştir.

Her grup kılcallık deneyi için üç numune alınmıştır. Numuneler 24 saat fırında $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ ’de kurutulmuştur. Daha sonra yan yüzeylerinden su almaması için suya dayanıklı ve su geçirmez Duck firmasına ait bir bantla numunenin kenarları sarılmıştır. Daha sonra numuneler 5 mm suya girecek şekilde alt yüzeyinden su ile temas ettirilmiştir. Numuneler 24 saat sonra çıkarılarak tartılmıştır. Numunenin 24 saat içinde birim alanda kılcal olarak emdiği su miktarından hareketle, kılcallık katsayısı yukarıda bahsedilen eşitlik yardımı ile hesaplanmıştır. Daha sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelere de tatbik edilerek yangın öncesi ve sonrası kılcal geçirimlilik katsayılarının nasıl değiştiği gözlenmiştir. Şekil 3.3’de kılcal geçirimlilik deney düzeneği verilmiştir.

3.3.7. Sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan yöntem

Çalışmada, GPA, PA, PPF, HSK ve kontrol numunelerinin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası kuru birim ağırlıklarının, basınç mukavemetlerinin, kılcallık katsayılarının nasıl değiştiği araştırılmıştır ve parametreler arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Her grup numune yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası kuru birim ağırlık, basınç mukavemeti ve kılcallık deneylerine tabi tutulmuşlardır. Böylece sonuçların değerlendirilmesinde karşılaştırma metodu kullanılmıştır.

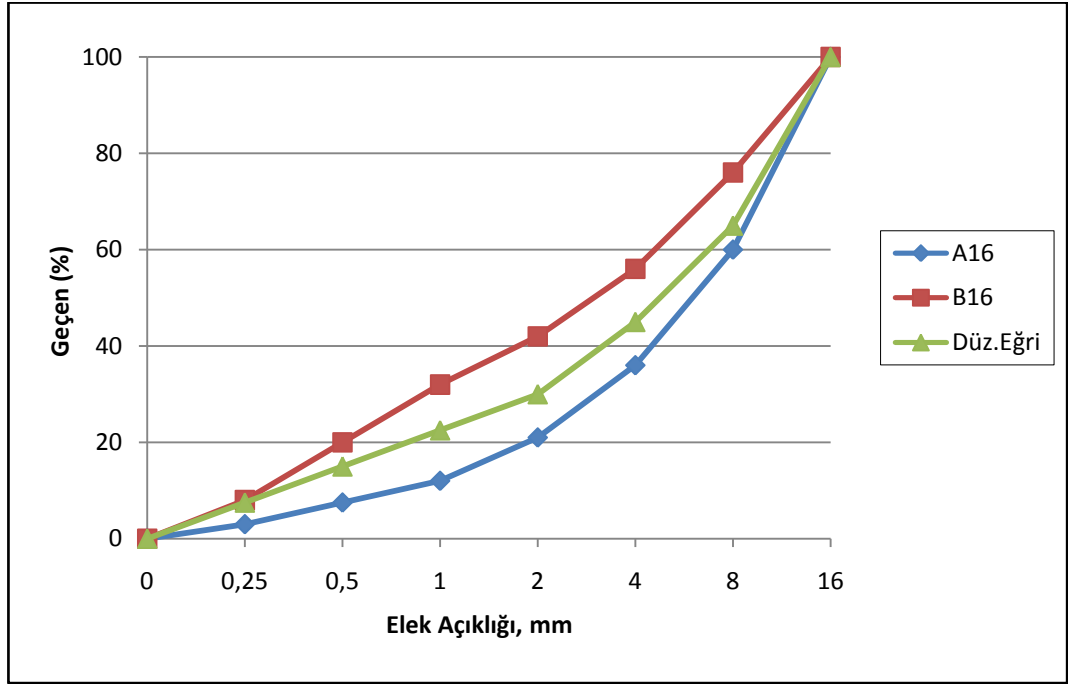
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde agrega ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar çizelge ve şekiller ile desteklenerek daha da anlaşılır hale getirilmiş, ilgili standartlardaki veriler de eklenerek kıyaslama imkânı sağlanmıştır.

4.1. Agregalar ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Granülometri eğrilerinin standart limitlerin dışına çıkmasının üretilen betonlarda istenmeyen sonuçları ortaya çıkarabileceği düşüncesiyle deneylerde dere agregası ve kırmataş agrega doğal haliyle kullanılmamış, bunun yerine standart limitler arasına düşürülen ayarlanmış tek tip granülometri eğrisi kullanılmıştır. Agregaya için elde edilen granülometri eğrisi TS 802 (1985)'de verilen standart eğrilerle birlikte Şekil 4.1'de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. 4 mm ile 16 mm tane sınırları arası iri, 4 mm'nin altındaki agrega ince olarak seçilmiştir. Bu çalışmaya konu olan betonlarda %55 iri, %45 ince agrega oranları kullanılmıştır. İri agreganın %35'i 8–16 mm, %20'si de 4–8 mm arasındaki agregalardan alınmıştır. İnce agreganın %15'i 2–4 mm, %30'u ise 0–2 mm arasında olacak şekilde granülometri düzeltilmiştir.



Şekil 4.1. Doğal agreganın düzeltilmiş granülometri eğrisi

Araştırmada üretilen betonların karışım hesaplarında, agregaların karışıma katıldığı andaki 10 dakikalık piknometre özgül ağırlıkları kullanılmıştır (Murlin and Wilson 1952). GPA'nın 10 dakikalık piknometre özgül ağırlık faktörü ise 0,28 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.1. Genleştirilmiş perlit agregasının özellikleri

Özellikler	Bulgular	Standart Limitler
Gevşek Birim Ağırlık (kg/m^3)	113	<200
Özgül Ağırlık	0,28	-
Su Emme (%)	146	-
Yıkanabilir İnce Madde Oranı (%)	-	
Organik Madde (Renk skalası ile belirlenmiştir.)	Renksiz	Renksiz olmalı
Sülfat Oranı (SO_3) (%)	0,15	1
Klorür Oranı (Cl) (%)	0,09	0,4

GPA'nın su emme kapasitesi %146 olarak bulunmuştur. Pomzanın su emme kapasitesi ise %42 olarak bulunmuştur. Agreganın su emmesi agregadaki boşluk oranı ile orantılı olduğundan hafif agreganın en belirgin özelliği boşluklu olmasıdır, bu nedenle su emme oranları yüksektir ve agrega için bu bir sakınca oluşturur. GPA'nın özellikleri Çizelge 4.1'de verilmektedir.

Beton agregalarında, kil ve silt gibi ince maddelerin fazla miktarda olması, agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki aderansın zayıflamasına ve çimentonun prizini geciktirmesine neden olduğundan istenmeyen bir durumdur (Postacıoğlu 1987). Dere agregası ve kırmataş agrega elendikten sonra ince ve iri kısımları için ayrı ayrı yapılan bu deneyde bulunan ortalama sonuçlar Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. İri agrega için ince madde oranı tayini

Deney numunesinin			
Agrega sınıfı	Deney öncesi kuru ağırlığı (W_1) (gr)	Deney sonrası kuru ağırlığı (W_2) (gr)	İnce madde oranı (%) $m=(w_1-w_2)/w_1.100$
4-8	2000	1996	0,2
8-16	5000	4995	0,1

Çizelge 4.3. İnce agrega için ince madde oranı tayini

Deney numunesinin				
Agrega sınıfı (mm)	Deney numunesinin kuru ağırlığı (W_1) (gr)	24 h sonunda çökelen malz yük. (h) (cm)	Ölçü silindiri kesit alanı (cm^2) (A)	İnce malzeme oranı (%) $m=(0,9.A.h/w).100$
0-2	1000	0,5	30,68	1,38
2-4	1000	0,01	30,68	0,02

Bu deneyde iri agrega için yıkama yöntemi, ince agrega için ise çökeltme yöntemi kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ilgili standartlar ile karşılaştırıldığında

kullanılan agregalarda betona zarar verecek oranda ince taneli malzeme bulunmadığı belirlenmiştir. Bu sebeple agregaların beton üretimi için kullanılabilir olduğuna karar verilmiştir.

Agregaların organik madde içeriği basit bir asit-baz reaksiyonu ile belirlenmiştir. Konsantrasyonu %3 olan NaOH eriği ile karıştırılan agrega, 24 saat bekletildikten sonra suyun rengi esas alınmıştır. Kullanılan agregalar üzerinde ayrı ayrı yapılan deneylerde, malzeme üzerinde kalan sıvılarda herhangi bir renk değişimi gözlenmemiştir.

TS 1744-1 (2000)'e göre sıvının renksiz veya açık sarı olması durumunda zararlı oranda organik madde bulunmadığına, koyu sarı, kahverengi veya kırmızımsı bir renk alması durumunda ise zararlı organik madde bulunduğuna karar verilir. Böylelikle çalışmada kullanılan agregaların beton üretimi için uygun olduğu gözlenmiştir.

Dere agregası ve kırmataş agrega için özgül ağırlık deneyi yapılmıştır. Yapılan bu deneyde kuru özgül ağırlık, doymun kuru yüzey özgül ağırlık, görünen özgül ağırlık ve 24 saatlik su emme oranları tayini iri ve ince agrega için ayrı ayrı yapılmıştır. TS EN 1097-6 'ya göre yapılan bu deneyde elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Agregaların özgül ağırlık ve su emme oranı tayini

Özellik	Normal agrega		Kırma taş	
	0/2	2/4	4/8	8/16
Kuru özgül ağırlık (γ_k)	2,37	2,54	2,57	2,59
Doymun kuru yüzey özgül ağırlık (γ_d)	2,41	2,57	2,62	2,68
Görünen özgül ağırlık (γ_g)	2,46	2,63	2,71	2,72
Su emme oranı (%)	1,44	1,44	2,03	1,80

Hafif agregalardaki yüksek su emme özelliği, karışma konulmadan önce bir ön ıslatmaya tabi tutulmalarını gerektirir. Aksi halde karışım suyunun bir kısmını emip hidrasyon ve işlenebilirliğe zarar verebilirler (Turgutalp 1978). Dolayısıyla yapılan deneylerde GPA, PA karışma katılmadan önce doygun duruma getirilmiştir. PP lif ise suda çözdürüldükten sonra karışma ilave edilmiştir.

4.2. Taze Beton ile İlgili Bulgular ve Tartışma

Üretilmiş taze beton numuneleri üzerinde yapılan çökme deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi karışimdaki GPA ve PA oranı arttıkça, buna bağlı olarak çökme değerlerinde de bir artış olmuştur. Fakat PP lif oranı arttıkça çökme miktarı azalmıştır. HSK'lı betonlarda eklenen küresel şekilli hava kabarcıkları işlenebilmeyi artırdığından çökme değeri artmıştır. Çökme deneyinin yapılışı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Karışım tiplerine göre çökme deneyi sonuçları ise Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

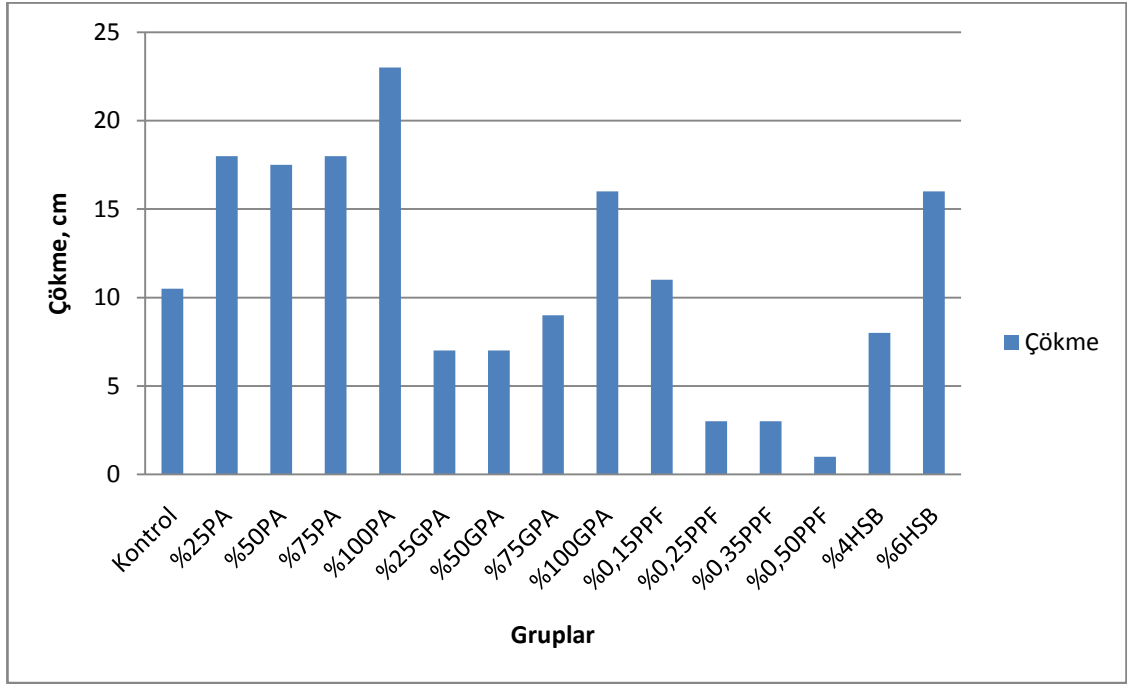


Şekil 4.2. Çökme deneyinin yapılışı

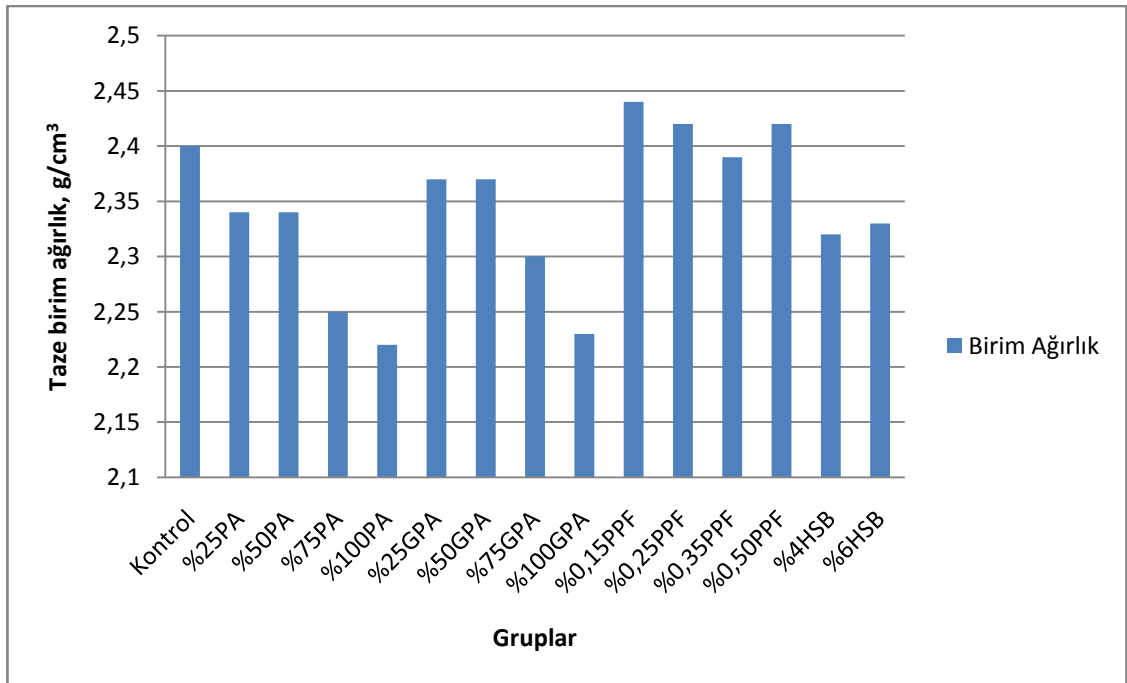
Üretilen taze beton numuneleri üzerinde yapılan taze birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi karışımdaki GPA, PP lif ve PA oranı arttıkça, birim ağırlık değerlerinde azalma meydana gelmiştir. GPA ve PA'lı betonların birim hacim ağırlıklarındaki azalma bu malzemelerin karışımda yerlerine kullanılan normal agreganın özgül ağırlıklarından daha düşük özgül ağırlığa sahip olmalarından kaynaklanır. H.S.K. betonların birim hacim ağırlığında ise dikkate değer bir değişim olmamıştır. Karışım tiplerine göre birim hacim ağırlık deneyi sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Tüm gruplar için çökme ve taze birim ağırlık deney sonuçları

Karışım tipi	Çökme (cm)	Birim ağırlık (g/cm³)
Kontrol	10,5	2,40
%25PA	18	2,34
%50PA	17,5	2,34
%75PA	18	2,25
%100PA	23	2,22
%25GPA	7	2,37
%50GPA	7	2,37
%75GPA	9	2,30
%100GPA	16	2,23
%0,15PPF	11	2,44
%0,25PPF	3	2,42
%0,35PPF	3	2,39
%0,50PPF	1	2,42
%4HSB	8	2,32
%6HSB	16	2,33



Şekil 4.3. Taze betonda karışım tiplerine göre çökme değerleri



Şekil 4.4. Taze betonda karışım tiplerine göre birim ağırlık değerleri

Şekil 4.5'te pomzalı, perlitli, lifli, hava sürükleyici katkılı ve kontrol gruplarından oluşan numuneler gösterilmektedir. Bu numuneler başlıklaşarak basınç mukavemeti deneyi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 4.5. Yüksek sıcaklıklardan sonra silindir numunelerin toplu görüntüsü



Şekil 4.6. Numunelerin etüvde kurutulması işlemi



Şekil 4.7. Numunelerin ısıldığı fırın ve koruma kılıflarının görüntüsü

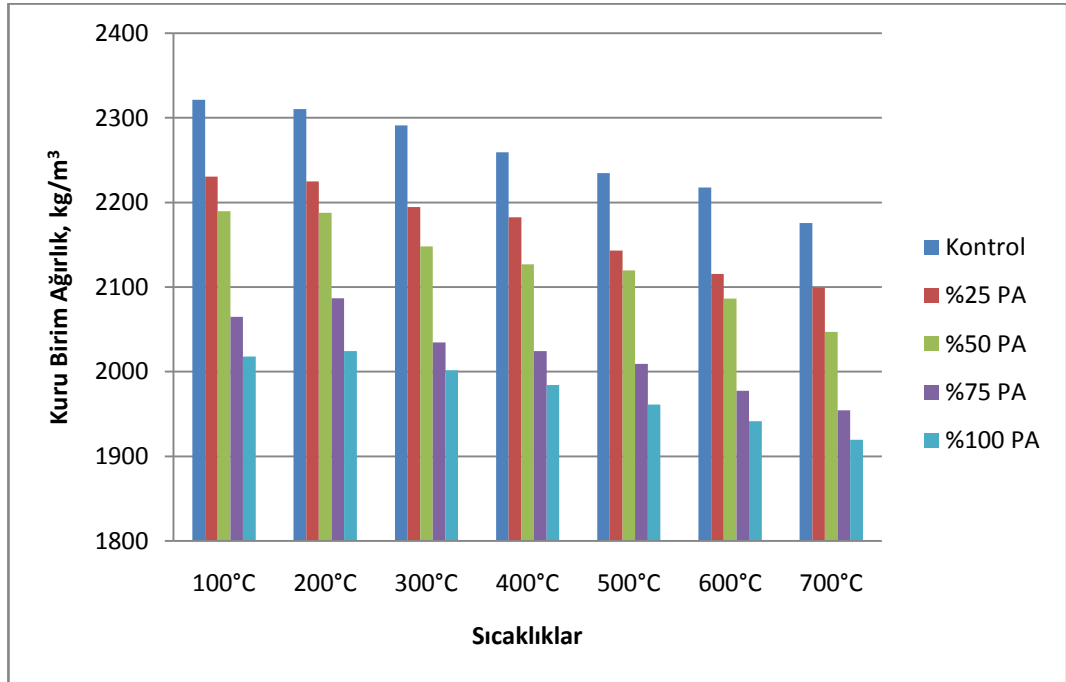
4.3. Sertleşmiş Beton ile İlgili Bulgular ve Tartışma

4.3.1. Birim ağırlık ile ilgili bulgular

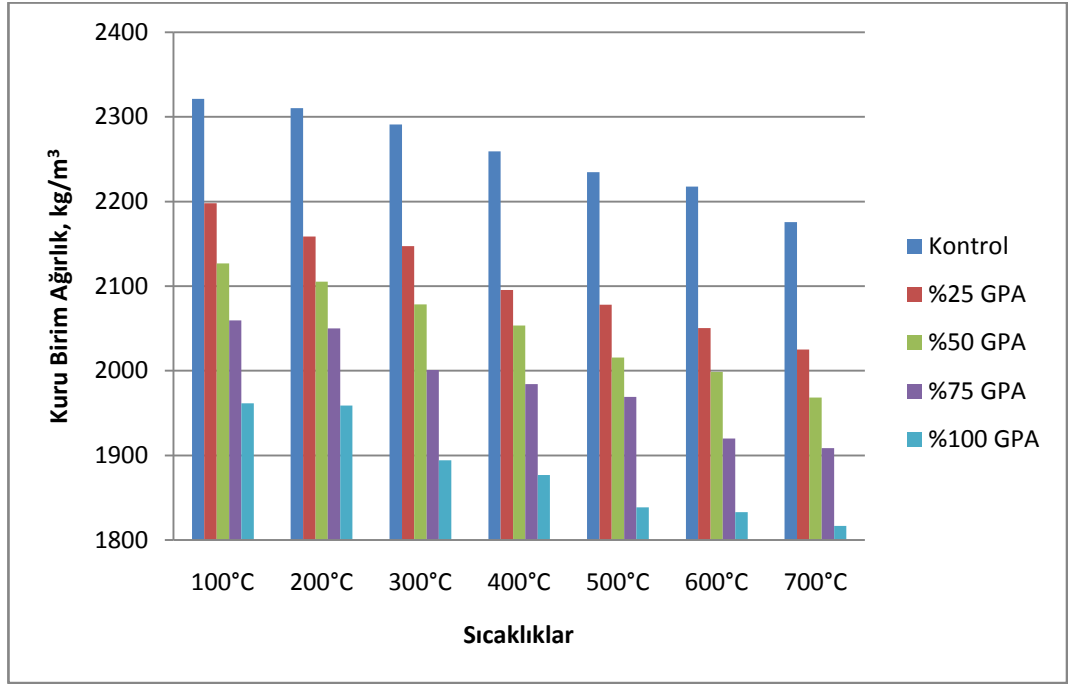
Deney sonuçlarına göre, birim ağırlık, önemli bir değişiklik olmamasına karşın tüm gruplarda sıcaklık arttıkça azalmıştır. Belirgin azalmalar özellikle 400°C'den sonra gözlenmiştir. Çizelge 4.6'da verildiği ve Şekil 4.8'de gösterildiği gibi ince agrega yerine 0%, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında PA kullanıldığında 100°C de kuru birim ağırlıklar 2321, 2231, 2190, 2065 ve 2018 kg/m³ olarak değişmiştir. Şekil 4.9 ve Çizelge 4.6'dan görüldüğü gibi 0%, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA kullanıldığında kuru birim ağırlıklar sırasıyla 2321, 2198, 2127, 2059, 1961 kg/m³ olarak elde edilmiştir. PA ve GPA'nın farklı oranlarda kullanılması ile birim ağırlıkta meydana gelen azalmanın, bu malzemelerin düşük özgül ağırlığa ve yüksek poroziteye sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Türkmen ve Kantarcı (2007) ve Demirboğa *et al.* (2001) yaptıkları çalışmada birim ağırlık için benzer bir durumu ifade etmişlerdir. PPF kullanıldığında kuru birim ağırlıklar bir miktar artmıştır. Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi PPF kullanıldığında malzemenin kuru birim ağırlıklarında sıcaklığa bağlı olarak başlangıçta önemli bir değişiklik olmamıştır. Şekil 4.11'den görüldüğü gibi hava sürükleyici katkı (HSK) kullanıldığında kuru birim ağırlıklar azalmıştır. Sıcaklığın etkisi ile serbest ve kimyasal bağlı suyun buharlaşması, malzemenin genişerek hacminin artması birim ağırlığın azalmasına sebep olmaktadır (Aköz vd 1995; Mahsanlar 2006).

Çizelge 4.6. Beton örneklerin birim ağırlıklarının sıcaklıkla değişimi

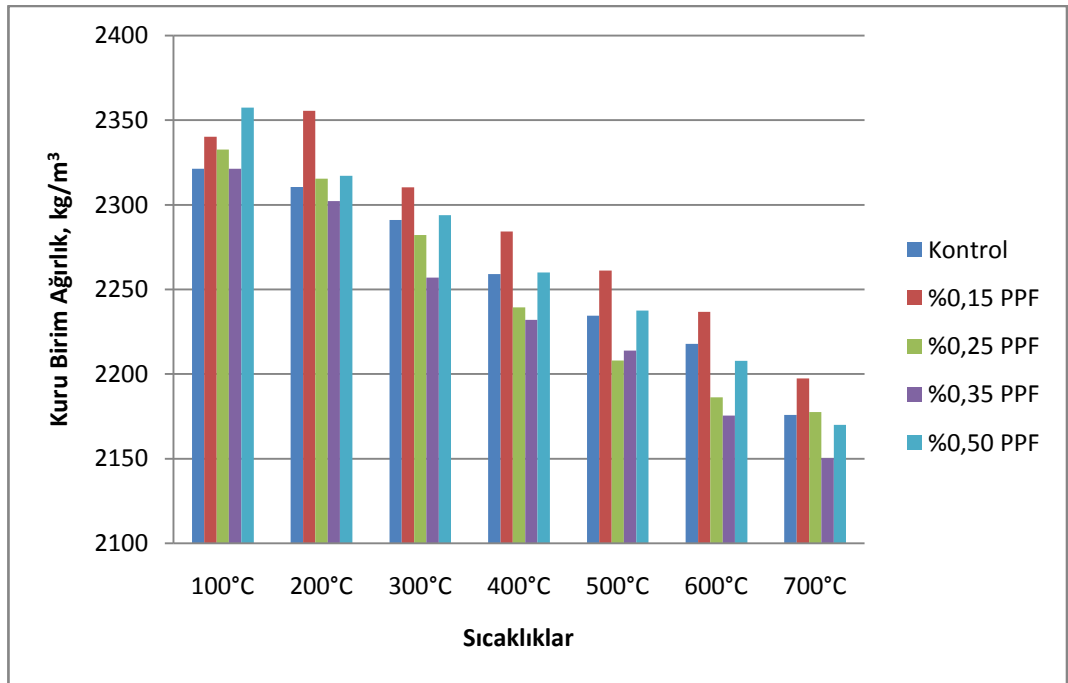
Karışım Tipi	Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)						
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C
Kontrol	2321	2311	2291	2259	2235	2218	2176
%25 PA	2231	2225	2195	2183	2143	2115	2099
%50 PA	2190	2188	2148	2127	2120	2086	2047
%75 PA	2065	2087	2035	2024	2009	1978	1954
%100 PA	2018	2024	2002	1984	1961	1941	1920
%4 HSB	2240	2221	2218	2202	2190	2146	2126
%6 HSB	2205	2209	2192	2202	2164	2140	2083
%25 GPA	2198	2159	2147	2096	2078	2050	2025
%50 GPA	2127	2105	2078	2053	2016	1999	1968
%75 GPA	2059	2050	2001	1984	1969	1920	1909
%100 GPA	1961	1959	1894	1877	1839	1833	1817
%0,15 PPF	2340	2356	2310	2284	2261	2237	2197
%0,25 PPF	2333	2315	2282	2239	2208	2186	2177
%0,35 PPF	2321	2302	2257	2232	2214	2176	2150
%0,50 PPF	2357	2317	2294	2260	2238	2208	2170



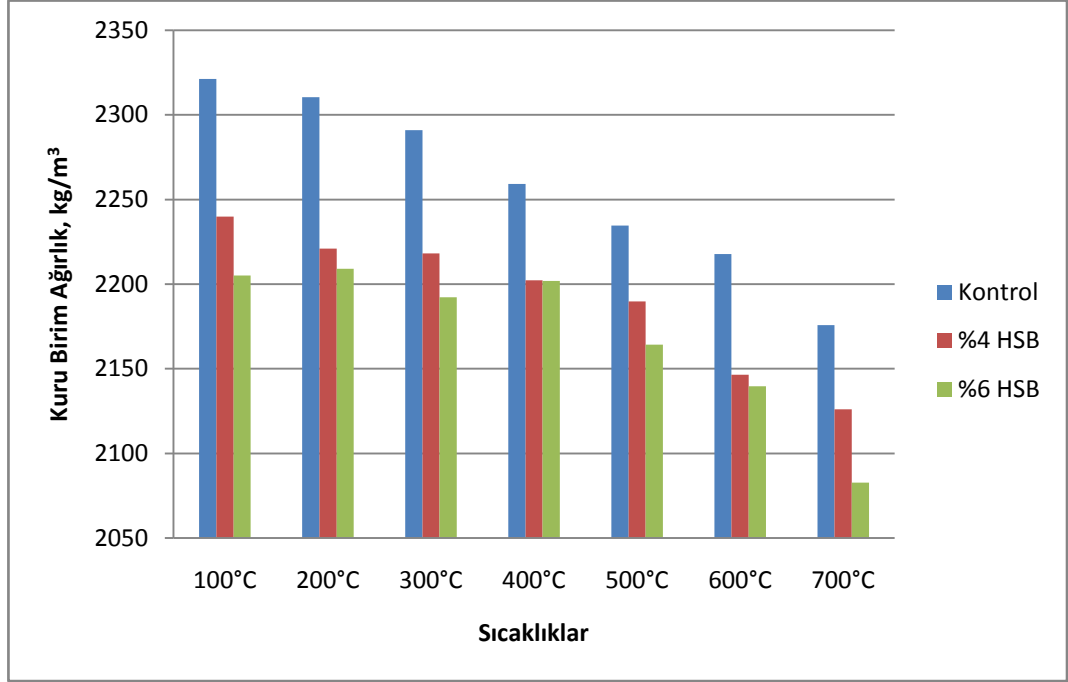
Şekil 4.8. Pomza oranına göre birim ağırlık-sıcaklık değişimleri



Şekil 4.9. Perlit oranına göre birim ağırlık-sıcaklık değişimleri



Şekil 4.10. Polipropilen lif oranına göre birim ağırlık sıcaklık değişimleri



Şekil 4.11. Hava sürükleyici katkı oranına göre birim ağırlık sıcaklık değişimleri

4.3.2. Basınç dayanımı ile ilgili bulgular

Çizelge 4.7’de bütün beton örneklerin karışım tipi, basınç dayanımı ve bu değerlerin 23, 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklık etkilerinde nasıl değiştiği verilmiştir. Bu verilere ait değerlendirmeler aşağıda ayrı ayrı yapılmıştır.

Çizelge 4.7. Beton örneklerin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi

Karışım Tipi	Basınç Dayanımı (MPa)							
	23°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C
Kontrol	65,30	57,93	47,04	42,41	31,58	25,63	14,63	8,57
Kontrol (S.S.)	65,30	53,71	43,59	40,83	31,16	23,24	12,30	7,36
%25 PA	56,03	52,34	41,75	39,46	29,95	22,45	12,89	8,65
%50 PA	52,67	51,01	39,92	37,35	27,71	20,48	11,82	8,53
%75 PA	48,98	46,65	38,94	34,27	26,21	19,13	10,82	7,72
%100 PA	43,18	40,90	34,81	32,35	23,48	17,62	9,90	7,35
%4 HSB	62,10	56,02	45,41	42,91	31,97	23,74	13,42	8,81
%6 HSB	56,75	49,20	39,85	36,89	25,94	21,23	11,13	7,52
%25 GPA	58,16	53,40	42,69	40,45	31,40	23,77	13,31	8,60
%50 GPA	52,86	48,09	41,32	38,64	28,84	20,99	12,35	8,40
%75 GPA	49,02	45,91	39,06	35,74	26,30	19,06	11,48	7,79
%100 GPA	42,00	39,63	33,70	31,09	23,75	17,50	10,51	6,89
%0.15 PPF	68,65	66,29	63,55	51,57	38,05	28,04	14,63	10,53
%0.25 PPF	77,43	72,89	66,18	56,42	38,26	28,39	14,58	9,76
%0.35 PPF	75,73	69,48	64,98	57,14	37,84	27,27	15,22	10,20
%0.50 PPF	67,82	63,08	55,11	48,02	33,51	25,12	14,33	9,30

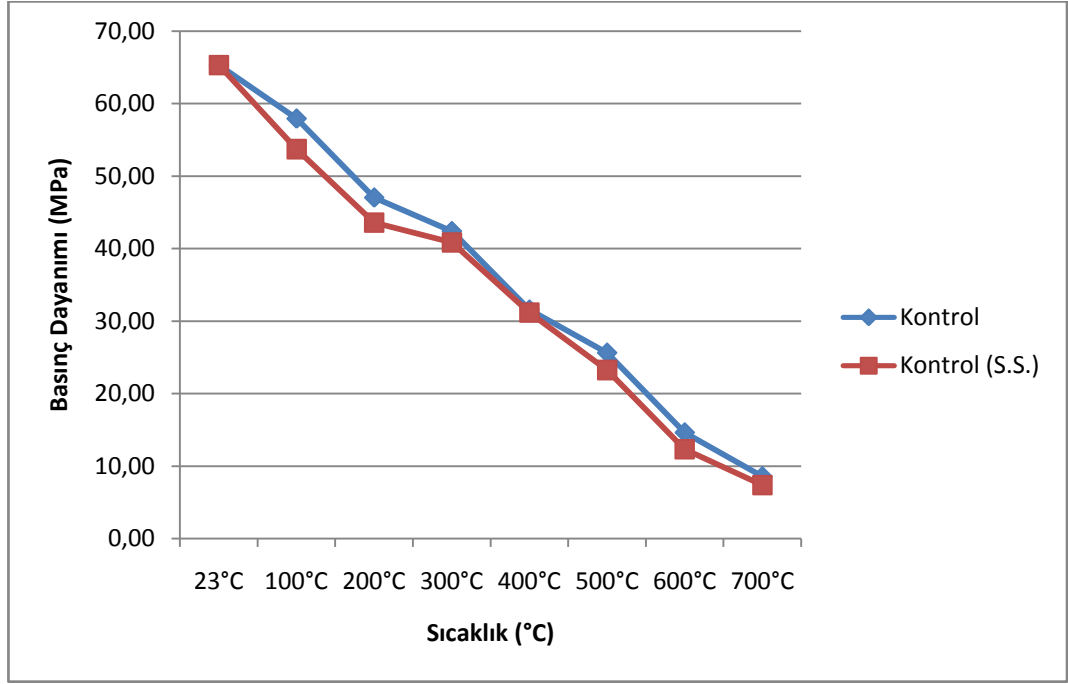
4.3.2.a. Soğutma şeklinin basınç dayanımına etkisi

Soğutma şeklinin basınç dayanımı üzerindeki etkisini hesap edebilmek için kontrol numuneleri iki grup şeklinde üretilmiştir. Bir grup kontrol numunesi yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra havada kendi kendine, diğer grup numuneler de fırından çıkarılıp su içerisine bırakılarak hızlıca soğutulmuştur. Suda ve havada soğutulan beton numunelerine ait basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.7’de verilmiş olup Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Deney sonuçlarından da görülebileceği gibi yükselen sıcaklıkla birlikte bütün gruplardaki dayanım değerlerinde azalmalar elde edilmiştir. Suda soğutulan numunelerin basınç dayanımında meydana gelen azalmalar, havada soğutulan numunelerden daha yüksek çıkmıştır. 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklıklarda havada soğutulan numunelerde sırasıyla %11, %28, %35, %52, %61, %78 ve %87 oranlarında azalmalar meydana gelirken suda soğutulan numunelerde bu oranlar %18, %33, %37, %52, %64, %81 ve %89 olarak elde

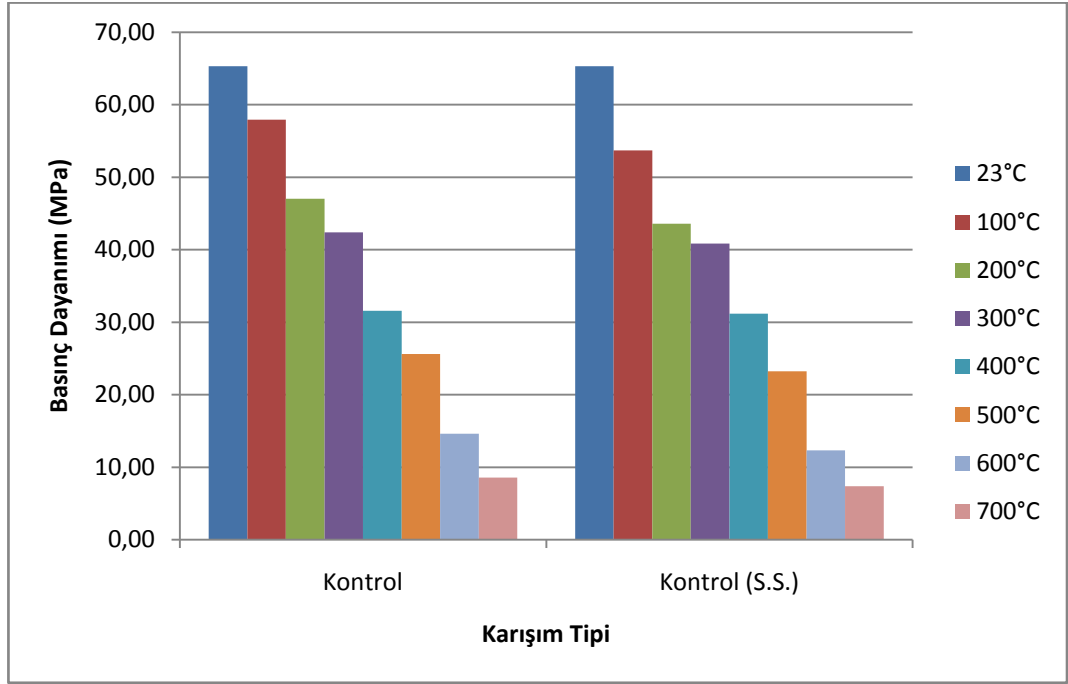
edilmiştir. Kontrol betonlarına kıyasla suda soğutulan numunelerde 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklıklarda %7, %7, %14, %1, %9, %16 ve %14 oranlarda daha fazla azalma meydana gelmiştir. Bu da yüksek sıcaklığa maruz kalan bir beton elamanın su ile soğutma yönteminin tercih edilmemesi gerektiğini göstermektedir. Suda soğutulan numunelerde havada soğutulan numunelere göre meydana gelen bu azalma şu şekilde açıklanabilir. Çimento hamuru, %70–80 tabakalı C-S-H jeli, %20 Ca(OH)₂ ve diğer kimyasal bileşenlerden oluşur (Zhang vd 2002). Ca(OH)₂, 530°C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde %33'e varan bir büzülme oluşur. Yangın sırasında sıkılan su ile CaO tekrar Ca(OH)₂'ye dönüşür, bu olay %44 mertebesinde bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür (Akman, 2000). Neville (2000); Yüzer vd (2004) yaptıkları çalışmada, soğutma türünün yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkisi olduğunu, su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmanın havada soğutulan numunelere nazaran daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bingöl and Gül (2008) de yaptıkları çalışmada suda soğutulan numunelerin daha fazla dayanım kaybettiğini belirtmektedir. Shoaib vd (2001) tarafından agrega olarak ayrı ayrı kum ve iki farklı cüruf kullanılarak üretilen farklı su/çimento oranlarına sahip 7,5x15 cm boyutlu silindir numuneler 600°C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numunelerde havada soğutulan grupların basınç dayanımındaki azalmanın suda ve fırında soğutulanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atmosferik ortama maruz kalan betonda CaO'nun CaCO₃'e dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır. Chan *et al.* (2000) ise yüksek maksimum sıcaklıklara maruz kalan betonlarda soğutma hızı etkisinin daha az olduğunu gözlemlemiştir.

Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi 500°C'ye kadar örnekler her ne kadar önemli derecede dayanım kaybetse de taşıyıcı beton özelliklerini kaybetmemişlerdir. Husem (2006)'e göre de suda soğutulan numunelerin dayanımında meydana gelen azalma havada soğutulan numunelere göre daha fazladır. Luccioni *et al.* (2003) ise hızlı soğutulan numunelerdeki dayanım kayıplarının, yavaş soğutulanlara kıyasla daha büyük çıktığını belirtmişlerdir. Bu etkinin nedenini ise, yüksek sıcaklıkların neden olduğu bozulmaya

ek olarak numunelerin hızlı bir şekilde soğutulmasının suyla temas eden çimento hamurunun yeniden hidratasyonu tarafından karşılanamayacak termal şoklara yol açması şeklinde ifade etmişlerdir.



Şekil 4.12. Havada ve suda soğutulan beton numunelerinin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 4.13. Havada ve suda soğutulan örneklerin sıcaklıklara bağlı basınç dayanımlarının değişimi

4.3.2.b. Pomza agregası oranının basınç dayanımına etkisi

0–2 mm tane çaplı ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası (PA) katılmasıyla elde edilen 4 farklı beton grubu yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmıştır. 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C’de üç saat bekletilen numunelerin basınç dayanımı değişimleri Çizelge 4.7’de verilmiş olup Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de de gösterilmiştir. Çizelge 4.7’de verildiği gibi 0–2 mm tane sınıflı ince agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında PA kullanıldığında basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. Bu azalmalar 23±1°C’de kür edilen betonlarda sırasıyla %14, %19, %25 ve %34 olarak elde edilmiştir. 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C’ de kontrol örneklerinde %11, %28, %35, %52, %61, %78 ve %87 oranlarında azalmalar meydana gelirken, %100 PA içeren örneklerde bu azalmalar %5, %19, %25, %46, %59, %77 ve %83 olarak elde edilmiştir. PA kullanıldığında yüksek sıcaklık etkisinde basınç dayanımında meydana gelen azalmalar PA’nın bütün oranları için azalmıştır. Bu durum

PA'nın yüksek sıcaklık etkilerinde daha rahat kullanılabileceğini göstermektedir. PA'nın yüksek sıcaklığa karşı daha dayanıklı olması onun gözenekli yapısından ve ısı iletkenlik katsayısının normal agregaya göre daha düşük olmasından kaynaklanır. Zoldners ve Wilson (1973) yaptıkları çalışmada farklı sıcaklık etkilerinde hafif betonların yarı hafif betonlara göre yüksek sıcaklık etkilerine karşı daha iyi dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir. Bingöl and Gül (2004) de hafif agrega kullanımının betonun yangın dayanıklılığını olumlu etkilediğini belirtmektedir.

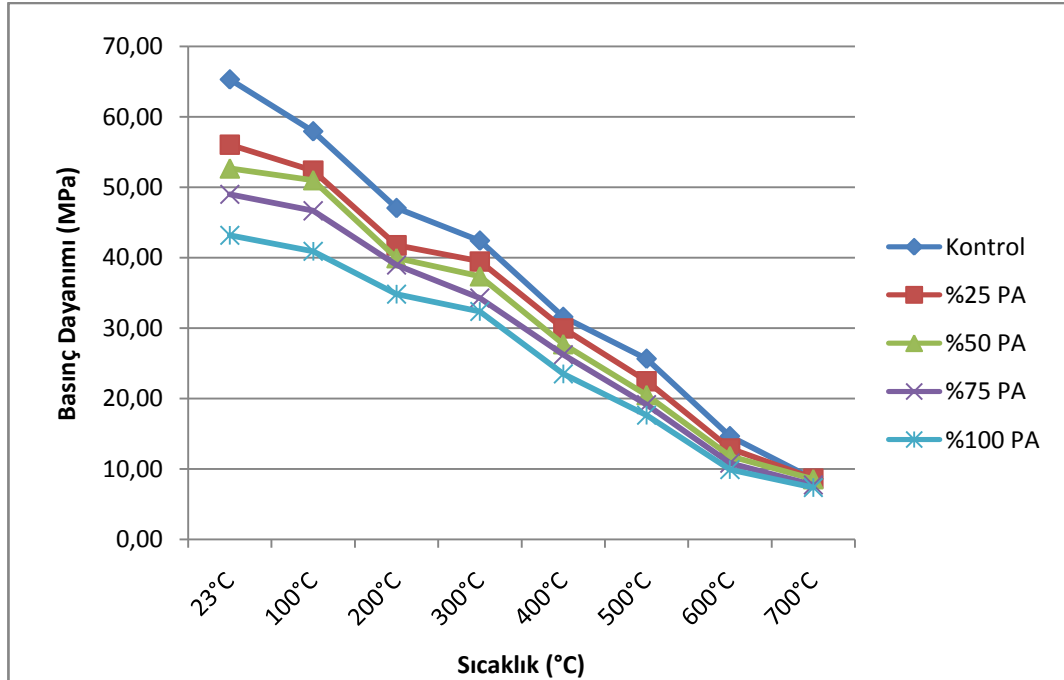
700°C'ye kadar ısıtılan numunelerde %100 PA grubu numuneleri başlangıç dayanımlarının %83'ünü kaybederek PA'lı betonlar ve kontrol numuneleri arasında en az dayanım kaybı gösteren grup olmuştur. %75 PA kullanılarak üretilen betonlarda ise bu kayıp %84, %50 PA'lı betonlardaki kayıp %84, %25 PA'lı betonlardaki dayanım kaybı ise %85 olarak birbirine çok yakın çıkmışlardır. Diğer sıcaklık değerlerinde de PA'lı betonlarda benzer davranışlar elde edilmiştir. Phan ve Peacock (1999) çalışmaları sonucunda daha YDB'ların normal betona göre yüksek sıcaklıklarda daha hızlı dayanım kayıplarına uğradığını göstermiştir.

Sıcaklık 400°C'ye ulaştığında kontrol (%0 PA) betonlarının dayanımlarında çok belirgin bir kayıp görülmüş ve bu numuneler başlangıç basınç dayanımlarının %52'sini kaybetmişlerdir. Aynı sıcaklıkta dayanım kayıpları %25, %50, %75 ve %100 PA içeren betonlar için sırasıyla %47, %47, %46 ve %46 seviyesindedir. Görüldüğü gibi sıcaklığın artmasıyla beraber PA'lı beton örneklerinde dayanım kaybı olmasına karşın hafif agreganın kullanılmasıyla bu kayıp oranı azalmıştır.

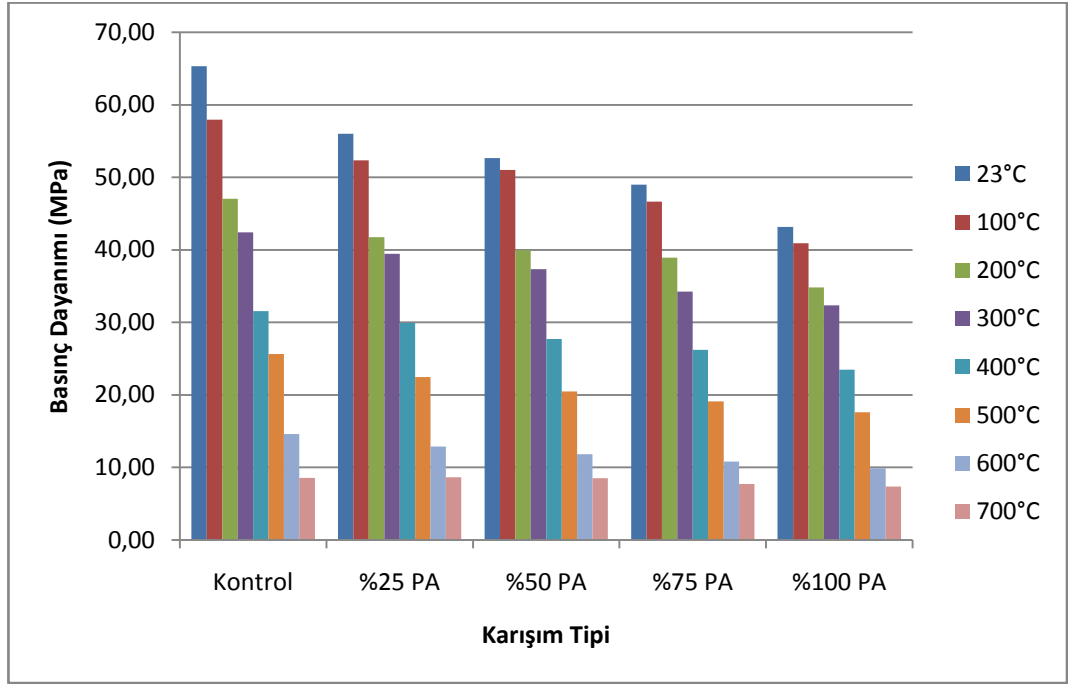
Dikkat çeken diğer bir önemli nokta ise tüm karışım oranlarındaki numunelerin 700°C'de başlangıç dayanımlarının çok büyük bir kısmını kaybetmeleridir. Bununla beraber, bu sıcaklık değerinde en az dayanım kaybı yine %100 PA'lı beton karışımlarında gözlenmiştir. Bu sıcaklık değerinde tamamen normal agregaya ile üretilen betonlar başlangıç dayanımlarının %87'sini kaybederken bu kayıp oranı %100 PA ile üretilen betonlarda %83 civarındadır. Fakat buna rağmen 700°C'de karışım oranları ne

olursa olsun hiç bir grup taşıyıcılık özelliğini koruyamamıştır. Phan ve Carino (1998) yaptıkları çalışmada yüksek mukavemetli betonların (YMB) malzeme özellikleri sıcaklıkla beraber normal dayanımlı betonlarından farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu farklılıklar 25°C ile 400°C arasında daha belirgin çıkmıştır. Bu aralıkta YMB'lar normal dayanımlı betonlara göre daha hızlı bir dayanım kaybı göstermiştir. 400°C'nin üzerinde farklılıklar azalmıştır.

400°C ve daha yüksek sıcaklıklar beton dayanımının önemli bir kısmının kaybedildiği değerler olarak göze çarpmaktadır. Bu dayanım kaybına 300–500°C arasında harç-agrega bağlarının zayıflayıp ara yüzey çatlaklarının oluşmasının (Lin *et al.* 1996), 300°C'den sonra kristal suyunun kaybedilmesinin ve 400°C civarında Ca(OH)₂'nin CaO'ye dönüşerek hacimce %30 büzülmesinin (Baradan 1991) sebep olduğu düşünülebilir.



Şekil 4.14. Pomza agregası içeren numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi



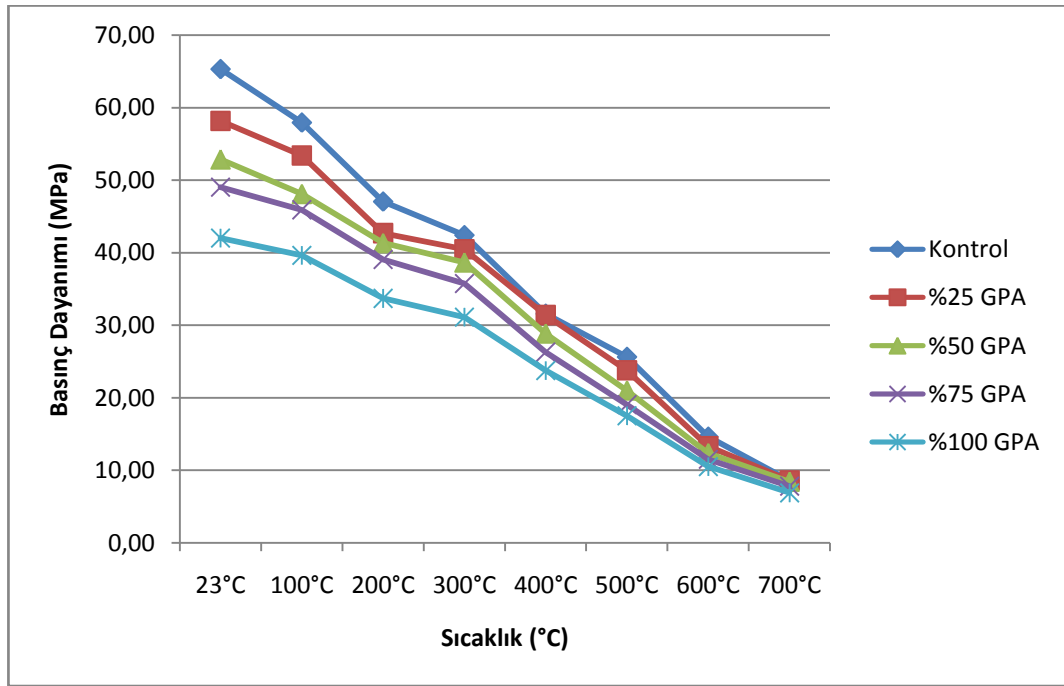
Şekil 4.15. Pomza agregası içeren numunelerin basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişimi

4.3.2.c. Genleştirilmiş perlit agregası oranının basınç dayanımına etkisi

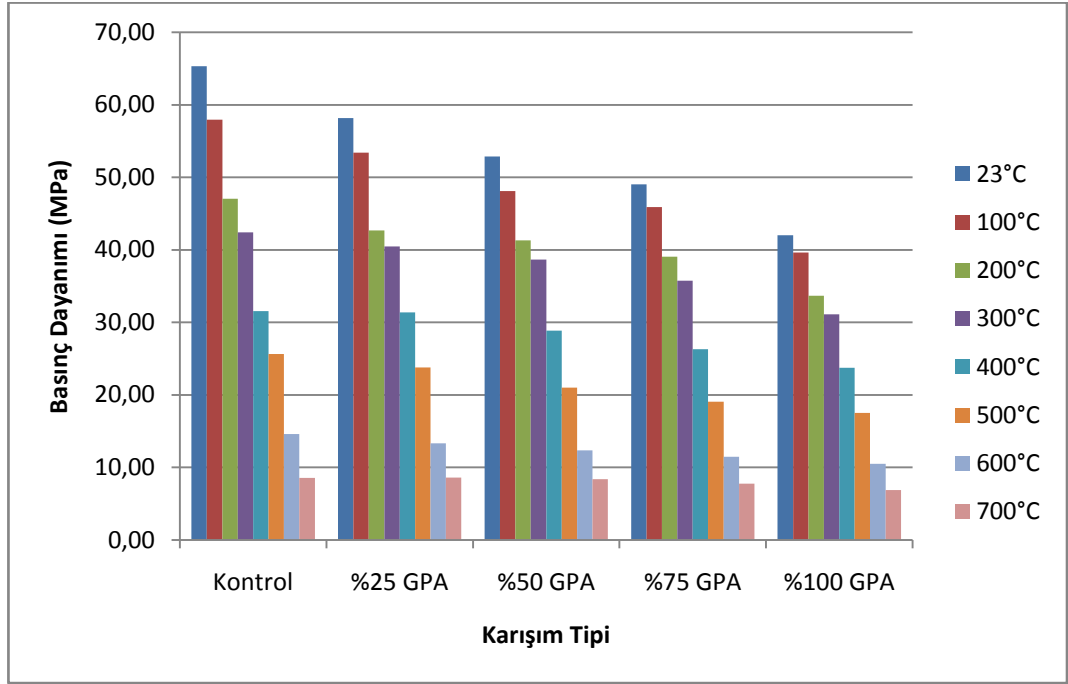
0–2 mm tane çaplı ince agreganın yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA kullanılması ile elde edilen 4 farklı GPA'lı numune grubu üç saat süreyle yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmış ve her bir grubun değişik sıcaklıklardaki dayanımları Çizelge 4.7'de verilmiş olup Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak GPA'lı betonların basınç dayanımları başlangıç değerlerine kıyasla azalmıştır. $23\pm 1^\circ\text{C}$ 'de kür edilen betonların basınç dayanımları, kontrol örnekleri ve %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA içeren numuneler için sırasıyla 65,50, 58,16, 52,86, 49,02, 42,00 MPa olarak elde edilmişlerdir.

Karışımlardaki GPA miktarı arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlenmiştir. Bu azalma miktarlarının, kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, $23\pm 1^\circ\text{C}$ 'de kür edilen kontrol numunelerinde %25, %50, %75 ve %100 GPA oranları için, sırasıyla %11,

%19, %25 ve %36 olduğu, 100°C’de ısıtılan numunelerde %18, %26, %30 ve %39 olduğu, 700°C’de ısıtılan numunelerde %87, %87, %88 ve %89 olduğu belirlenmiştir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere GPA oranı arttıkça basınç dayanımı bütün sıcaklık ortamlarında azalmıştır. GPA için 700°C’de ortalama %84 oranında düşüş olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda GPA ile üretilen numunelerde düşük sıcaklıklarda kontrol numunelerine göre daha az dayanım kaybının gözlemlendiği, 500°C ve üstündeki sıcaklıklarda dayanım kayıplarının kontrol numunelerinden az olmakla beraber farkın azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.16. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi



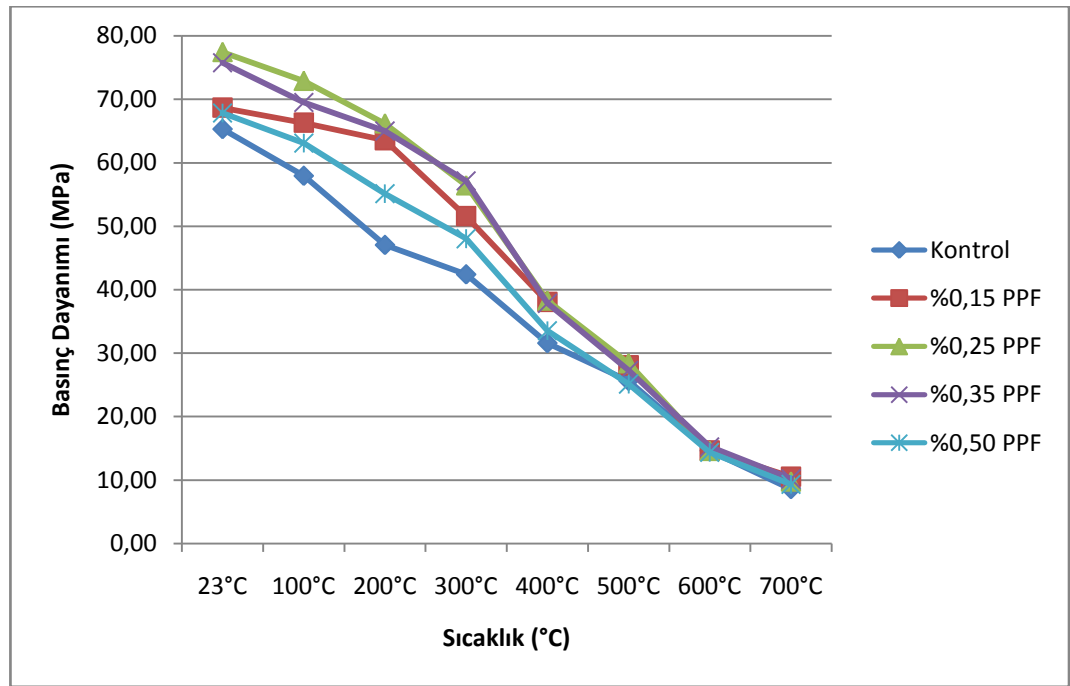
Şekil 4.17. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi

Başlangıç dayanımlarına oranla en fazla dayanım kaybeden gruplar GPA kullanılmamış olan %100 normal agregalı karışımlar ve ince agrega yerine %25 GPA kullanılan karışımlardır. Bunun yanı sıra GPA oranının artmasıyla birlikte numuneler başlangıç dayanımlarının bir kısmını kaybetmekte ancak bu kayıp normal agregalı karışımlardaki kadar fazla olmamaktadır.

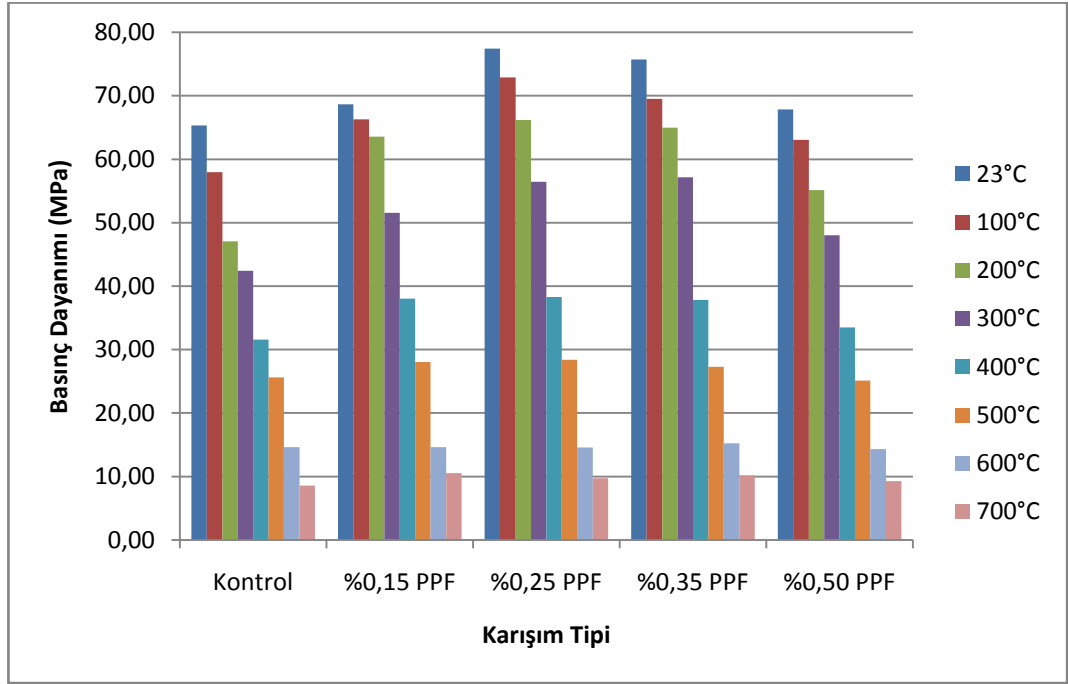
4.3.2.d. Polipropilen lif oranının basınç dayanımına etkisi

Toplam beton hacminin %0,15, %0,25, %0,35 ve %0,50 oranlarında polipropilen lif (PPF) ilave edilerek elde edilen 4 farklı PPF'li numune grubu maksimum sıcaklıkta üç saat süreyle bekletilmiş ve her bir grubun değişik sıcaklıklardaki dayanımları Çizelge 4.7'de verilmiş olup Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da gösterilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak her grubun basınç dayanımları başlangıç değerlerine kıyasla azalmıştır. PPF'in kullanıldığı numunelerde basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'de kür

edilen ve PPF içermeyen kontrol betonların basınç dayanımı 65,30 MPa iken %0,15, %0,25, %0,35 ve %0,50 oranlarında PPF kullanıldığında basınç dayanımları sırasıyla 68,65, 77,43, 75,73 ve 67,82 MPa olarak elde edilmiştir. PPF'in kullanılması ile basınç dayanımı %5, %19, %16, %4 oranlarında artmıştır. Basınç dayanımında maksimum artış %19 olarak %0,25 oranında PPF içeren betonlarda elde edilmiştir.



Şekil 4.18. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi



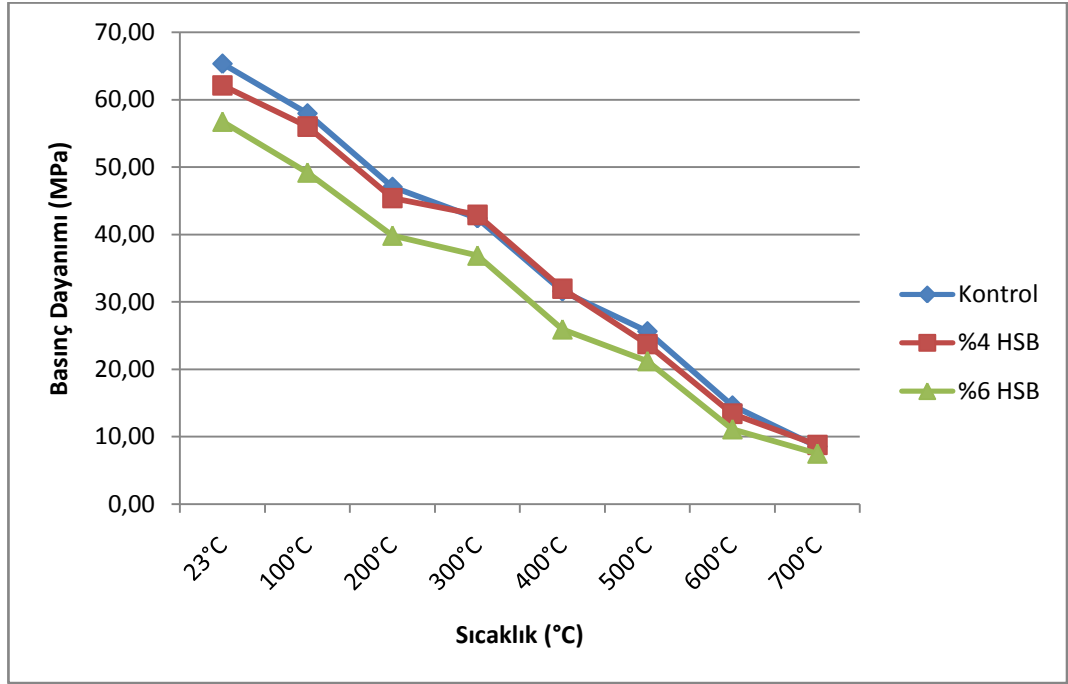
Şekil 4.19. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi

100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklık etkilerine maruz bırakıldığında tüm beton örneklerin basınç dayanımı azalmıştır. 400°C'den sonra basınç dayanımlarında daha belirgin azalmalar meydana gelmiştir. 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C'de kontrol örneklerinde %11, %28, %35, %52, %61, %78 ve %87 oranlarında azalmalar meydana gelirken, %0,15 PPF içeren örneklerde bu azalmalar %3, %7, %25, %45, %59, %79 ve %85 oranlarında meydana gelmiştir. 300°C sıcaklıkta PPF'li betonların YDB olma özelliklerini koruduğu 500°C'ye kadar taşıyıcı beton olarak kullanılacaklarını göstermektedir. PPF kullanıldığında basınç dayanımında meydana gelen bu artışı, PPF'lerin 170°C'de eriyerek çimento matrisi tarafından adsorbe edilmeleri ve gaz için kaçış yolları oluşturarak betondaki gözenek basıncını azaltması sayesinde hasar oluşumunu engellemesi ve dayanımı koruması şeklinde açıklamak mümkündür. Kalifa *et al.* (2001) da PPF'li betonlar için benzer bir durumu ifade etmişlerdir. Tenchev ve Purnell (2005) yaptıkları çalışmada, PPF içeriği arttıkça, basınç dayanımının biraz arttığını ifade etmişlerdir. Çünkü PPF miktarının artmasıyla betonun çatlak önleme kabiliyeti artmakta ve böylece betonun tokluğu ve dayanımı yükselmektedir. Bu

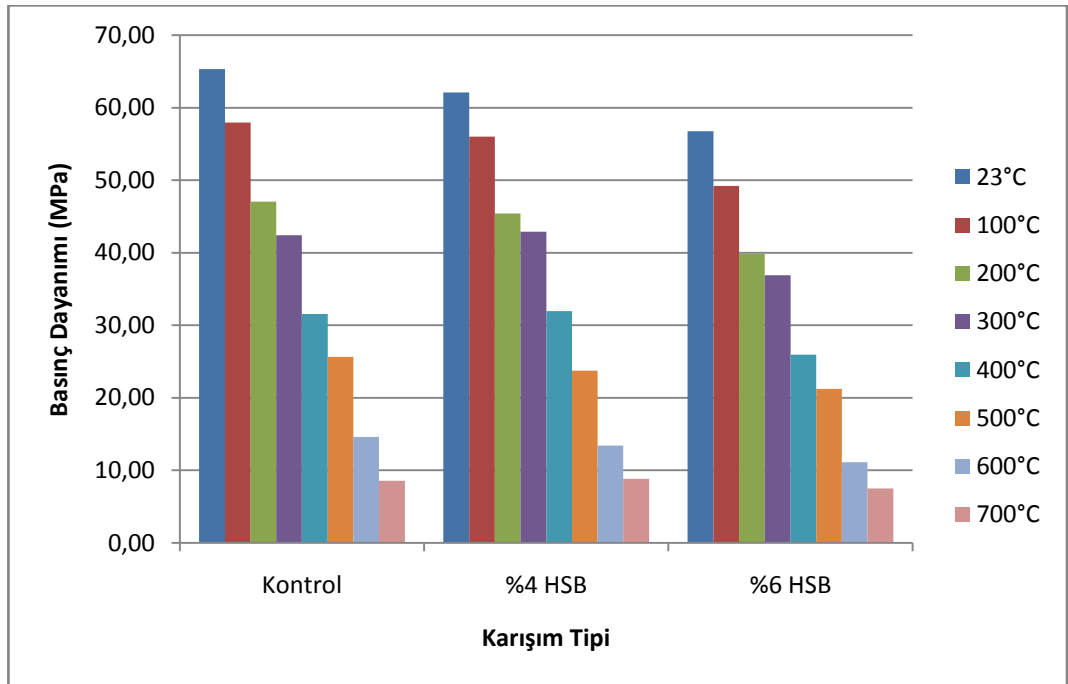
çalışmada da benzer olarak PPF'nin betonda kullanılması ile basınç dayanımında artma meydana gelmiştir. Baradan vd (2002) beton içerisindeki su buharının meydana getirdiği serbest basıncı ortadan kaldırmak için beton üretiminde PPF kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Bu lifler düşük sıcaklıklarda çatlak gelişimini yavaşlatmaları yanında, yüksek sıcaklıkta da eriyerek beton içinde boşluklar meydana getirmekte ve böylece yüksek basınçlı su buharının betona zarar vermeden iletimini de sağlamaktadırlar. Bu çözümün, yüksek performanslı betonların yangın riskini büyük ölçüde azaltan bir önlem olarak kabul edilebileceğini belirtmişlerdir. Ancak 500°C ve üzerindeki sıcaklıklarda ve 3 saatlik bir sürede bekletilen numunelerin hemen hepsinin kontrol numunelerine yakın dayanım kayıpları göstermeleri ile bu katkıların daha düşük sıcaklıklarda etkili olduğu ve üstündeki sıcaklıklarda çok önemli etkilerinin olmadığı bu çalışma ile ortaya konulmuştur. 500°C ve üzeri sıcaklıklarda meydana gelen hasarların bu sıcaklıklarda hidrate yapının büyük ölçüde tahrip olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür.

4.3.2.e. Hava sürükleyici katkı oranının basınç dayanımına etkisi

HSK kullanımı ile betonda meydana gelen sürüklenmiş hava boşlukları neticesinde, basınç dayanımını azalttığı fakat yüksek sıcaklık sonrası dayanımı normal kontrol betonuna göre iyileştirdiği gözlenmiştir. %4 ve %6 hava sürüklenmiş beton (HSB) oluşturmak için çimento miktarının ağırlıkça %0,075 ve %0,15 oranında hava sürükleyici katkı kullanılarak üretilen 2 farklı sürüklenmiş hava boşluklu numune grubu yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmış ve her bir grubun değişik sıcaklıklardaki dayanım değişimleri Çizelge 4.7'de verilmiş olup Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak her grubun basınç dayanımları başlangıç değerlerine kıyasla azalmıştır.



Şekil 4.20. Hava sürükleyici katkılı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi



Şekil 4.21. Hava sürükleyici katkılı numunelerin farklı sıcaklıklarda basınç dayanımlarının değişimi

23±1°C’de kür edilen ve HSK içermeyen kontrol betonların basınç dayanımı 65,30 MPa iken %4 ve %6 hava boşluklu betonların basınç dayanımları 62,10 ve 56,75 MPa olarak elde edilmiştir. HSK kullanımı basınç dayanımında azalmaya sebep olmuştur. Baradan vd (2002) de betonda HSK kullanımının beton dayanımında azalmaya sebep olacağını belirtmişlerdir. Çimento yerine %0,075 oranında HSK katılmasıyla elde edilen %4 hava sürüklenmiş beton (HSB) örneklerinin 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C’deki basınç dayanımı değişimleri, kontrol betonlarına kıyasla, sırasıyla %5, %14, %30, %34, %51, %64, %79 ve %87 oranlarında azalmıştır. %4 ve %6 hava boşluklu betonlarda yüksek sıcaklık etkilerinde kontrol betonlarına kıyasla meydana gelen azalmalar düşmüştür. Bu durum HSK’nın yüksek sıcaklığa dayanıklılık açısından da kullanılabilirliğini göstermektedir. Bu iyileştirme etkisinin, betonun kontrol betonlarına kıyasla daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

4.3.3. Kılcal geçirimsizlik katsayısı ile ilgili bulgular

Çizelge 4.8’de bütün beton örneklerin karışım tipi, kılcal geçirimsizlik katsayısı ve bu değerlerin 23, 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklık etkilerinde nasıl değiştiği verilmiştir. Bu verilere ait değerlendirmeler aşağıda ayrı ayrı yapılmıştır.

4.3.3.a. Pomza agregası oranının kılcal geçirimsizlik katsayısına etkisi

0–2 mm tane çaplı ince agregaya yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza agregası (PA) katılmasıyla elde edilen 4 farklı beton grubu yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmıştır. 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C’de üç saat bekletilen numunelerin kılcal geçirimsizlik değişimleri Çizelge 4.8’de verilmiş olup Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Tüm sıcaklık seviyelerindeki PA’lı gruplarda kılcal geçirimsizlik katsayısı kontrol numunesine oranla daha fazla artış göstermiştir. 100°C’de deneye tabi tutulmuş PA’lı numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayısındaki artış kontrol numunesiyle kıyaslandığında sırasıyla %12, %31, %102, %155 olarak belirlenmiştir. Aynı eğilim 200°C’deki numuneler için de gözlenmiştir. 300°C’deki numunelerin değişimi

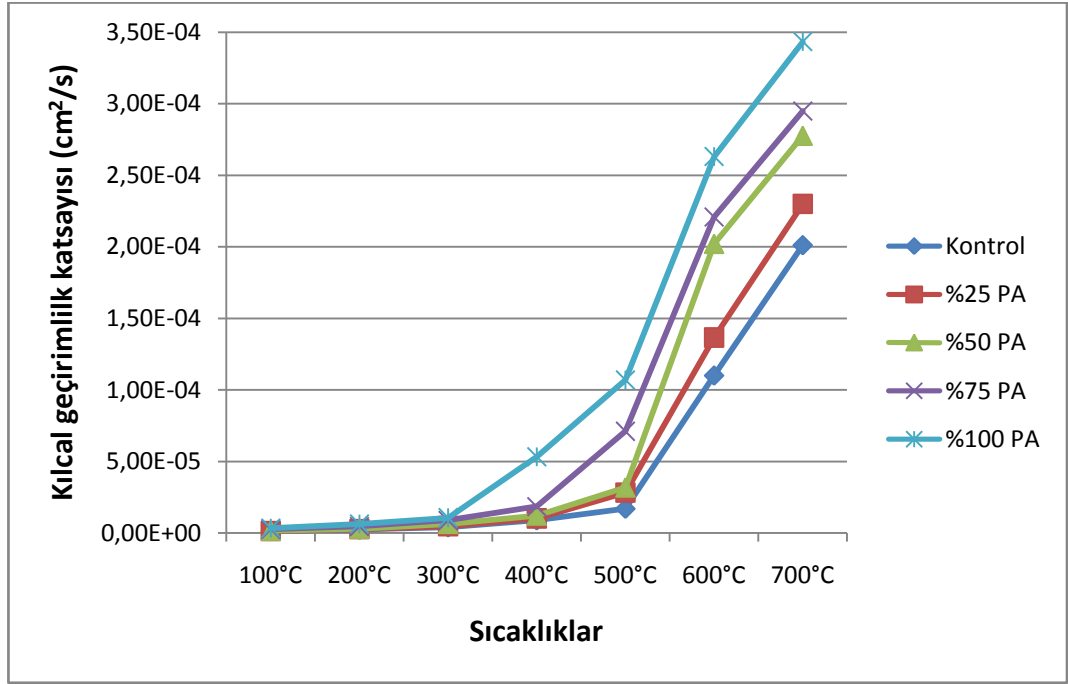
incelendiğinde ise 300°C'deki kontrol numunesine göre artışın 100 ve 200°C'deki kontrol numunesine göre olan artıştan daha fazla olduğu gözlemlenebilir. Aynı sıcaklıktaki kontrol numunesiyle yapılan kıyaslamalarda elde edilen en yüksek artış yüzdesi sırasıyla 400 ve 500°C'de %495 ve %527 olarak %100PA grubu için elde edilmiştir. 500°C'den yüksek sıcaklıklarda artış yüzdesi sert bir düşüş göstererek 600 ve 700°C'de sırasıyla %139 ve %71 olarak elde edilmiştir. PA'lı gruplar için elde edilen en yüksek kılcal geçirimlilik katsayısı değeri 700°C'de %100 PA için $343 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak elde edilmiş olup, en düşük değer ise 100°C'de %25PA için $1,48 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak belirlenmiştir.

Çizelge 4.8. Beton örneklerin kılcal geçirimlilik katsayılarının sıcaklıkla değişimi

Karışım Tipi	Kılcal geçirimlilik katsayısı ($\times 10^{-6}$) (cm^2/s)						
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C	700°C
Kontrol	1,32	2,41	4,03	8,94	17,1	110	201
%25 PA	1,48	2,74	4,92	10,22	28,3	137	230
%50 PA	1,73	3,15	6,48	12,30	31,9	202	278
%75 PA	2,66	4,69	8,88	18,50	71,1	221	295
%100 PA	3,35	6,18	10,60	53,20	107,0	263	343
%4 HSB	1,36	2,00	3,53	7,16	15,0	66,8	189
%6 HSB	1,26	2,11	3,33	8,14	14,5	86,1	188
%25 GPA	1,54	1,77	4,13	7,47	29,5	143	232
%50 GPA	1,99	2,83	6,05	9,11	48,5	194	265
%75 GPA	2,64	3,12	8,72	12,2	52,6	234	296
%100 GPA	5,11	6,97	18,30	24,3	77,1	314	388
%0.15 PPF	1,80	2,16	3,77	6,26	17,1	143	213
%0.25 PPF	1,06	2,31	2,96	5,63	14,6	150	216
%0.35 PPF	1,33	3,14	4,23	6,55	22,3	156	222
%0.50 PPF	1,45	4,41	6,72	7,57	25,7	183	242

Janotka and Nurnbergerova (2005)'ya göre 100–200°C arasında meydana gelen C–S–H yapısındaki belirgin su kaybı, boşluk yapısının büyümesiyle ilgilidir. 200°C'de C–S–H yeterince su kaybetmiştir fakat boşluk yapısının büyümesi çimento hamurunun 200°C'den 20°C'ye soğuması nedeniyle devam etmektedir. Bunun sebebinin PA'nın

daha yüksek kapiler poroziteye sahip olması da muhtemeldir. Bu nedenle PA miktarının artırılması, normal agregalarınkinden daha yüksek kılcal su emmeye sahip numunelerin kılcal su emmelerinin daha da artmasına neden olur. Poon *et al.* (2001) de yaptıkları çalışmada sıcaklığın artmasıyla birlikte porozitede ve ortalama boşluk çapında bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Çimento hamurunun boşluk yapısının artışında bu etkiden bahsedilebilir ve bu etki sızdırmazlık kaybının da sorumlusudur. PA'lı numunelerdeki en yüksek artışın 400–500°C aralığında görülmesi Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ye dönüşmesiyle açıklanabilir. Bu olgu nedeniyle çimento hamurunda %33 civarında bir hacim büzülmesi meydana gelir ve çatlaklar oluşur. Böylece agregayı saran çimento hamurunun su emme kapasitesi artar. Su kolayca agregaya ulaşır. Daha önce de bahsedildiği gibi PA'nın su emme kapasitesi normal agregadan yüksektir. O halde karışımlardaki PA yüzdesini artırmak kılcal geçirimsizlik katsayısının daha fazla artmasına sebep olabilir. 600 ve 700°C sıcaklık seviyelerindeki PA'ya bağlı meydana gelen artış miktarları azalma göstermiştir. Ama yine de 600°C'deki artış, 700°C'deki artışın iki katıdır. Handoo *et al.* (2002) yüksek sıcaklıklara maruz beton numuneler üzerinde yaptıkları SEM gözlemleriyle, 500°C sıcaklığa kadarki sıcaklık artışlarının porozite, kristal yapısı bozulmuş Ca(OH)_2 ve C–S–H jeli yapısının artışına bağlı olarak meydana gelen boşluklarla karışan mikro çatlakların baskın gelmesine sebep olduğunu ifade etmişlerdir. 600 ve 800°C'ye maruz kalan beton numuneleriyle yapılan SEM incelemeleri, betonun porozitesini, bozulan Ca(OH)_2 kristallerini ve dağılan C–S–H faz sınırlarını artıran mikro çatlakların, boşlukların baskın gelmesinden dolayı etkilenen betonun morfolojisindeki büyük değişimleri ortaya koymaktadır. Bu yüzden artan sıcaklıklarla meydana gelen kapilarite artışı, bağ suyu kaybı, artan porozite ile ilgili olabilir ve bu da geçirimsizliği artırır.



Şekil 4.22. Pomza agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimlilik katsayılarının değişimi



Şekil 4.23. 200°C ve 700°C sıcaklıklara ısıtılmış numunelerin geçirimlilik deneyi



Şekil 4.24. 600°C sonrası pomzalı numunelerdeki çatlakların görüntüsü



Şekil 4.25. 700°C sonrası pomzalı numunelerdeki çatlakların görüntüsü

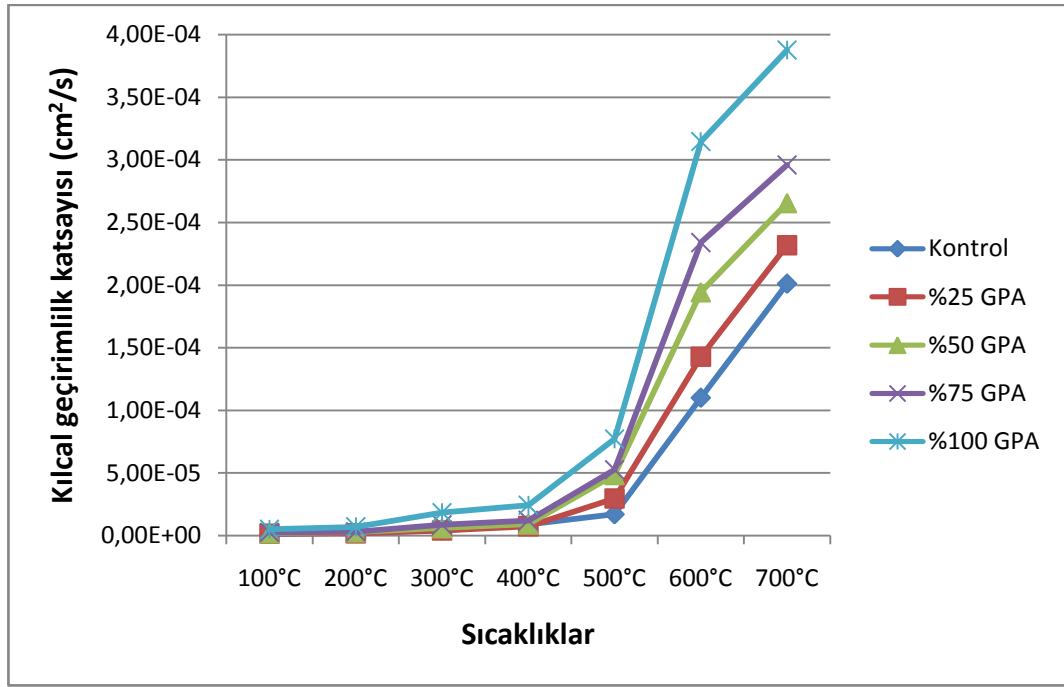
Şekil 4.23 - Şekil 4.25’de farklı oranlarda pomza kullanılarak üretilen betonların kılcal geçirimsizlik deneyi esnasında ve sonrasında görüntüleri sunulmuştur. Bu fotoğraflardan da görüleceği üzere numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça numunelerin su emme miktarları da artmaktadır. 100–300°C aralığında numunelerin emdiği su miktarı gözle görülemezken 600–700°C’lerde kılcal boşluklardaki suyun numunenin bütün uzunluğu boyunca yükseldiği fark edilmektedir.

4.3.3.b. Genleştirilmiş perlit agregası oranının kılcal geçirimsizlik katsayısına etkisi

0–2 mm tane çaplı ince agreganın yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GPA kullanılması ile elde edilen 4 farklı GPA’lı numune grubu üç saat süreyle yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmış ve her bir grubun değişik sıcaklıklardaki kılcal geçirimsizlik katsayıları Çizelge 4.8’de verilmiş ve Şekil 4.26’da gösterilmiştir. GPA bütün sıcaklık ve karışım grubu seviyelerinde kılcal geçirimsizliğin artmasına sebep olmuştur. 100°C’de deneye tabi tutulmuş %25, %50, %75 ve %100 GPA karışım gruplarındaki kontrol numunelerine kıyasla meydana gelen kılcal geçirimsizlik katsayısı artışı, sırasıyla, %17, %51, %100 ve %288’dir. 200°C’de deneye tabi tutulan %25GPA numunelerinin kılcal geçirimsizlik katsayılarında kontrol numunelerine kıyasla %27’lik bir iyileşme görülürken, %50, %75 ve %100 GPA gruplarında ise sırasıyla %17, %29 ve %189’luk artışlar meydana gelmiştir. Yine de, 200°C’de meydana gelen artış yüzdeleri, 100°C’de meydana gelen artışlardan daha düşüktür. Bütün sıcaklık seviyelerindeki GPA grupları ile kıyaslandığında %25 GPA grubunun kılcal geçirimsizlik katsayısının artışını azalttığı görülmektedir. GPA ile PA karşılaştırıldığında, GPA ile PA’ya bağlı meydana gelen artışların düşük karışım oranı seviyeleri için dalgalı bir seyir izlediği, fakat %100’lük karışım gruplarında ise daha yüksek artışların çoğunlukla GPA gruplarında meydana geldiği görülmektedir. En yüksek kılcal geçirimsizlik katsayısı değeri 700°C sıcaklığa maruz %100 GPA grubu için $388 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak kaydedilmiştir.

Chan *et al.* (2000)’a göre, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, hem normal betonun hem de yüksek performanslı betonun porozitesinde büyük artışlar meydana gelmektedir.

Boşluk çapları 0,01 μm 'den 1000 μm 'ye kadar artmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere, betonun kılcal geçirimliliğini etkileyen tek parametre porozite değildir. Örneğin, boşluk çapı dağılımı, mikro çatlaklar, agrega-çimento hamuru arayüzü gibi faktörler de bağlayıcı maddelerin fiziksel özelliklerini etkileyen parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.26. Genleştirilmiş perlit agregalı numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimlilik katsayılarının değişimi

Hafif agrega olarak perlit kullanılarak üretilen beton numunelerinde de pomza ile üretilen gruplara benzer davranışlar görülmüştür. Perlit gruplarında da sıcaklığın artması ile beraber numuneler de çatlak miktarları artmıştır. Buna paralel olarak betonlar daha boşluklu bir yapıya ulaşmış ve kapiler boşluklar ile numunelerin geçirimliliği artmıştır. Şekil 4.27'de 400°C ve 700°C sıcaklıklara ısıtılmış numunelerin geçirimlilik deneyi esnasındaki görüntüleri sunulmuştur. Fotoğraflardan da açıkça görülebileceği gibi sıcaklıkların artması sonucunda beton geçirimlilikleri de artmıştır. Geçirimlilik deneyinde 600°C ve 700°C sıcaklıklarda, su yükseklik seviyesi numunelerin tüm

uzunluğu boyunca yükselirken daha düşük sıcaklıklarda su seviye düşük miktarlarda kalmıştır.



şekil 4.27. 400°C ve 700°C sıcaklıklara ısıtılmış numunelerin geğirimsilik deneyi

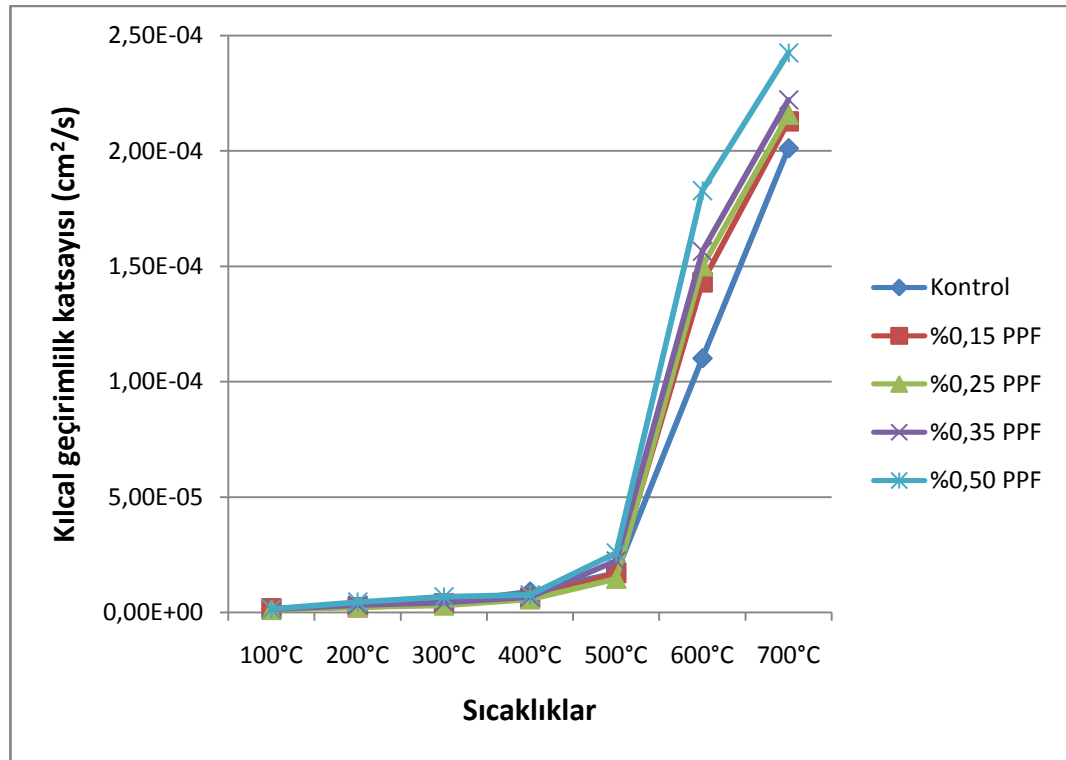


Şekil 4.28. 700°C sonrası perlitli numunelerdeki çatlakların görüntüsü

4.3.3.c. Polipropilen lif oranının kılcal geçirimsizlik katsayısına etkisi

Toplam beton hacminin %0,15, %0,25, %0,35 ve %0,50 oranlarında polipropilen lif (PPF) ilave edilerek elde edilen 4 farklı PPF'li numune grubu maksimum sıcaklıkta üç saat süreyle bekletilmiş ve her bir grubun değişik sıcaklıklardaki kılcal geçirimsizlik katsayıları Çizelge 4.8'de verilmiş ve Şekil 4.29'da gösterilmiştir. 100°C'de %0,25PPF grubu harici tüm grupların kılcal geçirimsizlik katsayısında artış meydana gelmiştir. 200, 300 ve 400°C'de %0,15 ve %0,25PPF grupları kontrol gruplarına göre bir iyileşme sağlarken, %0,35 ve %0,50PPF grupları kılcal geçirimsizlik katsayılarında bir artış meydana getirmiştir. Üstelik PPF 600 ve 700°C'de bütün karışım gruplarında artışa sebep olmuştur. Bütün PPF grupları içinde en yüksek kılcal geçirimsizlik katsayısı $242 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sn}$ ile 700°C'ye maruz kalan %0,50PPF grubunda kaydedilmiştir. 100°C ile 400°C aralığında, polipropilen life bağlı kılcal geçirimsizlik sayısındaki artışlar düzensiz, GPA ve PA gruplarıyla kıyaslandığında da daha düşüktür. Yüksek sıcaklığa bağlı meydana gelen azalmalar, çimento hamur fazında eriyerek boşluklar oluşturan

PPF ile ilişkilendirilebilir (Chan *et al.* 2000). Jianzhuang and Falkner (2006) tarafından çimento hamuru üzerine yapılan araştırmaya göre, PPF kullanımını daha ince artık kapiler boşluk yapısı meydana getirmektedir. Kalifa *et al.* (2001) de kullandığı iki grup (katkısız grup ile %2 PPF katılmış grup) beton numunesiyle yaptığı çalışmada benzer sonuçlar bildirmektedir. Chan *et al.* (2000) yaptığı çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, hem normal betonun hem de hacimce %0,2 PPF donatılı betonun boşluk çaplarının önemli ölçüde arttığını (0,01 μm –1000 μm) ortaya koymaktadır. Diğer taraftan, kontrol numuneleri ile PPF donatılı numunelerin her ikisinin de boşluk çeşitleri oldukça benzerdir. Bir noktaya kadar, boşluk yapısının çeşitliliği yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun bozulmasını yansıtmaktadır.



Şekil 4.29. Polipropilen lifli numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi

Lif katkıli betonlarda çatlak gelişimi diğer gruplara göre daha yüksek sıcaklıklarda tespit edilmiştir. Aynı sıcaklık değerleri için lifli betonlarda daha ince çatlaklar

belirlenmiştir. Bu grupta da sıcaklığın artmasıyla beraber çatlak miktarları ve genişlikleri de artmıştır. 500°C'ye kadar lifli betonlarda çatlaklar mikro seviye de kalmıştır. 600°C'de makro seviyeli çatlaklar görülmüş, 700°C'de ise çatlaklar iyice belirginleşerek ciddi çatlak hasarları tespit edilmiştir. Çatlakların belirginleştiği 600°C sonrası lifli numuneler Şekil 4.30'da önemli boyutta çatlak hasarlarının olduğu 700°C sonrası lifli numuneler ise Şekil 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.30. 600°C sonrası lifli numunelerdeki çatlakların görüntüsü

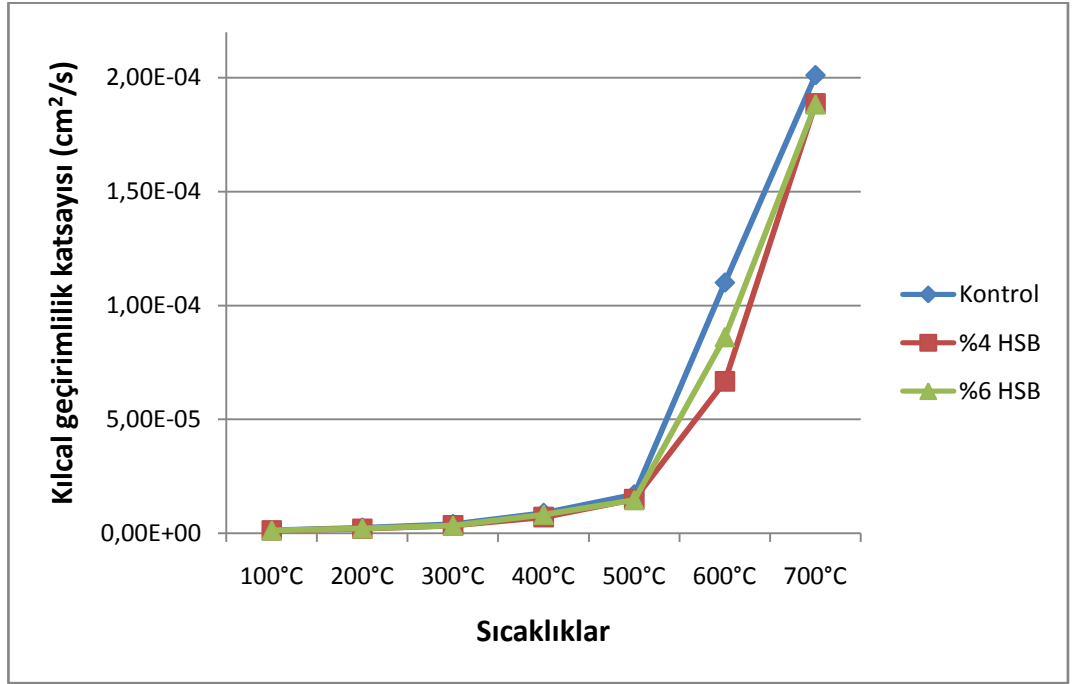


Şekil 4.31. 700°C sonrası lifli numunelerdeki çatlakların görüntüsü

4.3.3.d. Hava sürükleyici katkı oranının kılcal geçirimsizlik katsayısına etkisi

%4 ve %6 hava sürüklenmiş beton (HSB) oluşturmak için çimento miktarının ağırlıkça %0,075 ve %0,15 oranında hava sürükleyici katkı kullanılarak üretilen 2 farklı sürüklenmiş hava boşluklu numune grubu yüksek sıcaklık etkilerine bırakılmıştır. Her bir grubun değişik sıcaklıklardaki kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimleri Çizelge 4.8'de verilmiş ve Şekil 4.32'de gösterilmiştir. 100°C'de %4HSB grubu, kılcal geçirimsizlik katsayısında kontrol numunesine oranla %3'lük bir artışa neden olurken, %6HSB grubunda %4'lük iyileşme gözlenmiştir. %4HSB grubu için aynı sıcaklıktaki kontrol numuneleriyle kıyaslandığında 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C sıcaklık seviyelerinde, sırasıyla, %17, %12, %20, %12, %39 ve %6'luk iyileşmeler gözlemlenmiştir. Aynı eğilim %6HSB grubu için de geçerlidir. Bu etki, hava sürükleyici katkının çimento hamuru içinde meydana getirdiği boşluklarla ilişkilendirilebilir. Sürüklenmiş hava kabarcıkları çimento hamuru içine girdiğinde ve

kabarcıklar arası ortalama mesafe çok fazla olmadığına, bu hava boşlukları, kapiler boşluklara akmaya meyilli olan su için kapiler boşluklarla rekabete girer ve bu suyun kapiler boşluklar yerine hava boşluklarına yönelmesini sağlar. Böylece numunelerin kapiler su emmeleri de azalmış olur (Yaşar *et al.* 2008).



Şekil 4.32. Hava sürükleyici katkıli numunelerin farklı sıcaklıklarda kılcal geçirimsizlik katsayılarının değişimi

Polat (2007) yapmış olduğu çalışmada, %0,1 oranında hava sürükleyici katkı maddeli beton numuneleri kontrol numuneleriyle kıyasladığında kılcal geçirimsizlik katsayısında %12 azalma gözlemiştir. Bu durum beton içerisine sürüklenmiş hava miktarının oluşturduğu boşlukların aralarında bağlantı olmadığı yani birbirinden bağımsız boşluklar olarak ihtiva ettiği ve kılcal çatlaklar; sürüklenmiş hava kabarcıkları tarafından kesildiği ve süreklilik ihtiva edemedikleri için kontrol numunelerine göre HSK'lı betonlarda kılcal geçirimsizlik katsayısı daha küçük olmaktadır.

Hava sürükleyici katkıları kullanılarak üretilen beton gruplarında da diğer numunelere benzer olarak gözle görülebilir makro seviyeli çatlaklar 600°C ve 700°C’de ortaya çıkmıştır. Bu sıcaklık değerlerinden sonra hava sürükleyici katkılı numuneler Şekil 4.33’te gösterilmiştir. Oluşan çatlakların miktar ve genişliğine bağlı olarak, kılcal geçirimsizlik değerleri de artmış ve diğer gruplarda olduğu gibi daha yüksek sıcaklıklarda numunelerde suyun yükselme miktarları artmıştır.



Şekil 4.33. 700°C sonrası hava sürükleyici katkılı numunelerdeki çatlakların görüntüsü

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yüksek sıcaklık etkisinde kalan PA, GPA, HSK ve PPF'li betonların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimin araştırıldığı bu çalışma kapsamında, üretilen beton numuneler 100, 200, 300, 400, 500, 600 ve 700°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonda kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçları daha iyi analiz edebilmek için yüzey fotoğrafları çekilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir.

- a) Hafif agrega oranı arttıkça betonun çökme değerleri ve işlenebilirlik artmaktadır. HSK maddesi betonun işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Ayrıca karışımda bulunan hafif agrega oranı arttıkça, beklendiği gibi, taze birim hacim ağırlık değerleri azalmıştır.
- b) Yüksek sıcaklık etkisinden sonra suda soğutmanın zararlı etkisi tüm gruplarda havada soğutmaya nazaran daha fazla olmuştur. Diğer soğutma şekillerinin etkisi ayrıca incelenmelidir.
- c) Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların birim ağırlıklarında sıcaklık artışı ile birlikte 200°C'deki bazı gruplar hariç bütün karışım tipleri için azalmalar meydana gelmiştir.
- d) Çimento hamurunda boşlukları arttıran ve daha gözenekli mikro boşluk oluşmasını sağlayan PA, GPA ve HSK ile basınç dayanımı ve birim ağırlığındaki azalmaların yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonlarda kontrol betonlarına göre daha az olduğu gözlenmiştir. Ancak 400°C ve üzerindeki sıcaklıklarda bu farkların kontrol numunelerine yakın değerler aldığı ve ihmal edilebilir değerlere ulaştığı gözlenmiştir.
- e) Sıcaklık arttıkça basınç dayanımı her grupta azalırken suda soğutulan grupların dayanımları genel olarak havada soğutulan örneklere göre sıcaklık artışıyla daha da düşmüştür. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan hafif agregalı, hava sürükleyici katkı

ve polimer lifli numunelerin dayanım kaybında, kontrol numunelerine göre yüksek sıcaklık etkilerine karşı daha iyi performans gözlenmiştir.

- f) Sıcaklık yükseldikçe özellikle 500°C’de hidrate yapının bozulduğu CSH kristal yapısının azaldığı görülmektedir. 700°C’de ise hidrate yapının tamamen bozularak mikro yapının çatladığına rastlanmaktadır.
- g) Hafif agrega olarak perlitin kullanıldığı beton numunelerinde de pomza ile üretilen gruplara benzer davranışlar görülmüştür. Perlit gruplarında da sıcaklığın artması ile beraber numuneler de yüzeysel çatlak miktarları artmıştır. Buna paralel olarak betonlar daha boşluklu bir yapıya ulaşmıştır. Bu çalışmada da literatüre benzer olarak sıcaklığın artmasıyla beraber numunelerdeki çatlak miktarının ve çatlak genişliklerinin arttığı görülmüştür. 600°C ve 700°C sıcaklıklardan sonra çatlakların en belirgin olduğu ve kolaylıkla gözle görülebilir boyuta geldiği beton grubu pomza agregalı betonlardır.
- h) Lif katkılı betonlarda çatlak gelişimi diğer gruplara göre daha yüksek sıcaklıklarda tespit edilmiştir. Aynı sıcaklık değerleri için lifli betonlarda daha ince çatlaklar belirlenmiştir. Bu grupta da sıcaklığın artmasıyla beraber çatlak miktarları ve genişlikleri de artmıştır. 500°C’ye kadar lifli betonlarda çatlaklar mikro seviye de kalmıştır. 600°C’de makro seviyeli çatlaklar görülmüş, 700°C’de ise çatlaklar iyice belirginleşerek ciddi çatlak hasarları tespit edilmiştir. Düşük sıcaklık değerinde çatlaklar çok incedir ve gözlemsel olarak belirgin değildir. Çatlakların belirginleştiği 600°C sonrasında lifli numunelerde önemli boyutta çatlak hasarlarının oluştuğu belirlenmiştir.
- i) Hava sürükleyici katkıları kullanılarak üretilen beton gruplarında da diğer numunelere benzer olarak gözle görülebilir makro seviyeli çatlaklar 600°C ve 700°C’de ortaya çıkmıştır. Bu sıcaklık değerlerinden sonra hava sürükleyici katkılı numunelerde oluşan çatlakların miktar ve genişliğine bağlı olarak, basınç dayanımları değerleri azalmış ve diğer gruplarda olduğu gibi daha yüksek sıcaklıklarda numunelerde suyun yükselme miktarları artmıştır.
- j) Artan sıcaklıklarla birlikte kuru birim ağırlıklarda azalma meydana gelmiştir. PA ve GPA’ya bağlı en yüksek kayıplar %100 karışım gruplarında görülmektedir. PA ve GPA’nın bütün karışım gruplarında ve bütün sıcaklık seviyeleri arasında elde edilen

en yüksek kılcal geçirimlilik katsayısı değeri 700°C sıcaklığa maruz %100GPA grubu için $388 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sn}$ olarak kaydedilmiştir. Numunelerin kılcal geçirimlilik katsayısı maruz kalınan sıcaklık paralelinde artmıştır. Hava sürükleyici katkı, betonun kılcal geçirimliliğine bütün sıcaklık seviyelerinde olumlu etkide bulunmuştur. PPF'li gruplarda ise dalgalı bir seyir göstermiştir.

Sonuç olarak; polipropilen lifli, pomza agregalı, perlit agregalı ve hava sürükleyici katkılı yüksek dayanımlı betonların normal betonlara göre yüksek sıcaklık etkilerine daha dayanıklı olduğu söylenebilir. 0–2 mm ince agregaya yerine %100 oranında PA ve GPA agregası kullanılarak yüksek sıcaklık etkilerine daha dayanıklı ve daha hafif yüksek performanslı betonlar üretilebilir. Polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklar etkisinde betonda meydana gelen buhar basıncının çıkışına olanak sağladığı düşünülmektedir. Hafif agregaya ve hava sürükleyici katkıların betonda meydana getirdiği boşluklar sayesinde sıcaklık etkisi ile oluşan buhar basıncı gerilmelerin adsorbe edilerek azaltılmasına olanak sağladığı söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Akman M.S., (2000), “Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri” TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Aköz F., Yüzer N. ve Koral S., (1995), “Portland Çimentolu ve Silis Dumanı Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkileri”, MO Teknik Dergi, sayı 1, İstanbul.
- Akyüz, S., 1991. Boşluk oranı ve geometrisinin betonun basınç dayanımına etkisi. yüksek dayanımlı betonda boşluk yapısı. 2. Ulusal Beton Kongresi, 53-66, İstanbul.
- Alpaslan, O.K., “ Bir Sanayi Yapısının Yangın Dayanımının Artırılması ve Maliyete Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994.
- Anonim 1980. TS 3526, Beton agregalarında özgül ağırlık ve su emme oranı tayini. TSE, Ankara.
- Anonim 1985. Türkiye Perlit envanteri. MTA Genel Müdürlüğü Yayınları, 38, Ankara.
- Anonim 2002. TS EN 12350-2, Beton- taze beton deneyleri- bölüm 2: çökme (slamp) deneyi. TSE, Ankara.
- Anonim 2003. TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini. TSE, Ankara.
- Ataman, R., “Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 1991.
- Atay, Z. Ulviye, “Konya Bölgesindeki Mevcut Tabi Agregata ve Kırmataş ile YDB İmali”, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1992.
- Auskern, A. ,Horn,W., ‘ Capillary Porosity in Hardened Cement Paste’, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA,Vol.1,No.1, January 1973, p. 74-79.
- Aydın, U., “Yapı Elemanlarının Yangına Dayanıklılık Testleri”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994.
- Babu, K.G and Babu D. S., 2004. performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates.Cement and concrete composites, 26, 605-611.
- Balendran, R. V. ve Martin-Baudes, W. H., “The influence of high temperature curing on the compressive, tensile and flexural strength of pulverized fuel ash concrete”, Building and Environment, 35 (2000) 415-423.
- Baradan B., 1991, Yapı Malzemesi 2, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını, İzmir
- Baradan B., Yazıcı H., Ün H., 2002, Betonarme yapılarda kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını, İzmir
- Bektas, F., Turanlı L., Monteiro P.J.M., 2005. Use of perlite powder to suppress the alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research 35, 2014- 2017
- Bilodeau, A., Chevrier, R., Malhotra, V.M., Hoff, G.C., In: Malhotra VM, editor. Mechanical Properties, Durability and Performance in Hydrocarbon Fire of

- High-Strength, Semi-lightweight Concrete. ACI Special Publication SP 170, vol. II, 1997, p. 1157–95.
- Bilodeau, A., Malhotra, V.M., Hoff, G.C., Hydrocarbon fire resistance of high-strength normal-weight and lightweight concretes incorporating polypropylene fibers. International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Canada. August 1998, p. 271–96.
- Bilodeau, A., Kodur, V.K.R., Hoff, G.C., Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 163–174
- Bingöl A.F., “Pomza ile üretilen hafif betonların yangına karşı dayanımı” Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2002.
- Bingöl A.F., Gül R., “Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures” *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 11 (2004) 68-72.
- Bingöl A.F., Gül R., “Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete” *Fire and materials*, 2008, DOI:10.1002/fam.987.
- Boybay, M., “Çeşitli Çimentolardan Elde Edilen Betonların Dehidratasyon ve Dehidratasyonları ile Dayanımları Arasındaki Bağlılıklar”, İstanbul Mühendislik ve Mimarlık Akademisi, Temel Bilimler Fakültesi, 1979.
- Chan, Y. N. et al., “Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 21 (1999) 23-27.
- Chan, S. Y. et al., “Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, 14 (2000) 261-266.
- Chan, Y. N. et al., “Compressive strength and pore structure of high-performance concrete after exposure to high temperature up to 800 °C”, *Journal of Cement and Concrete Research*, 30 (2001) 247-251.
- Chandrasekhar, S., Pramada, P.N., Sintering behaviour of calcium exchanged low silica zeolites synthesized from kaolin, *Ceram. Int.* 27 (1) (2001) 105–114.
- Chang, Y.F. et al., “Residual Stress-Strain Relationship For Concrete After Exposure to High Temperatures”, *Journal of Cement and Concrete Research*, (2006).
- Cheeseman, C.R., Virdi, G.S., “Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash”, *Resources, Conservation and Recycling*, 45 (2005) 18–30
- Chen, B. ve Liu, J., “Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 34 (2004) 1065-1069.
- Dağsöz, A. K., 1991. “Isı Geçişi Transferi”, İTÜ Makine Mühendisliği Fakültesi, Isı Transferi ve Ekonomisi, İstanbul.
- Demirboğa R, Örüng I, Gül R. Effects of expanded perlite aggregate and mineral admixtures on the compressive strength of low-density concretes. *Cement and Concrete Research* 2001;31:1627–32.
- Demirboğa, R., 2003. Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, *Energy and Buildings*, 35, 189-192.

- Demirboğa, R., and Gül, R., 2003. The effects of expanded perlite aggregate, silica fume, and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 33 (5), 723-727.
- Dondi, M., Cappelletti, P., Cerri, G., Gennaro, M., Gennaro, R., Langella, A., Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates, *Appl. Clay Sci.* 25 (2004) 71–81.
- Duvarcı O.C, Akdeniz, Y. Ozmihci, F. Ulku, S., Balkose, D., Ciftcioglu, M., Thermal behavior of a zeolitic tuff, *Ceramics International* 33 (2007) 795–801.
- Erdoğan T. Y., 1995. Betonun oluşturan malzemeler, agregalar. ODTÜ, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara.
- Erdoğan T.Y., Beton, METU Press, 2003.
- Gündoğdu, İ., 1998. Çeşitli çimentolardan üretilen betonların değişik kür koşulları altında basınç dayanım özellikleri. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Handoo, S.K., Agarwal, S., Agarwal, S.K., 2002. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 32, 1009–1018.
- Hanzic, L., Ilic, R., Relationship between liquid sorptivity and capillarity in concrete, *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1385–1388,
- Hassan K. E., Cabrera J. G. and Maliehe R. S., 2000. The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 22, 267-271.
- Husem, M., “The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete”, *Fire Safety Journal*, 41 (2006) 155-163.
- Jianzhuang X., Falkner, H., On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures, *Fire Safety Journal* 41 (2006) 115–121
- Kalifa, P. et al., “High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure”, *Journal of Cement and Concrete Research*, 31 (2001) 1487-1499.
- Kalifa, P. et al., “Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures”, *Journal of Cement and Concrete Research*, 30 (2000) 1915-1927.
- Kantar, E., 1998. İzmir ve yöresinde üretilen hazır betonların sınıf dayanımlarına göre istatistiksel incelenmesi ile kür şartlarının beton dayanımlarına olan etkileri. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Katz, A. ve Berman, N., “Modeling the effect of high temperature on the bond of FRP reinforcing bars to concrete”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 22 (2000), 433-443.
- Kim, J.-K. et al., “Effect of temperature and aging on the mechanical properties of Concrete Part I. Experimental results”, *Journal of Cement and Concrete Research*, 32 (2002), 1087-1094.
- Kocataşkın, F., 2000. Yapı Malzemesi Bilimi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Kömürcü M. Çetin, 1993. Effect of the type of aggregate on the mechanical properties of the high strength concrete. Master Thesis, Master of Science in Civil Engineering Middle East Technical University, Ankara.

- Kucharska L., 1994. Frost resistance of HPC and rule of the microstructures durability of high performance concrete. Vienna, February, 14-15, pp.97-99.
- Lau, A. ve Anson, M., "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete", *Journal of Cement and Concrete Research*, (2006).
- Lennon, T. ve Clayton, N., "Fire Tests on High Grade Concrete with Polypropylene Fibers", 5th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway, 1999, 20-24.
- Li, M. et al., "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", *Journal of Cement and Concrete Composites*, 34 (2004) 1001-1005.
- Lin W.M., Lin T.D., Powers-Couche L.J., 1996, Microstructures of Fire Damaged Concrete, *ACI Materials Journal*, V:93, No:3
- Luccioni, B. M. et al., "Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures", *Engineering Structures*, 25 (2003) 729-742.
- Luo, X. et al., "Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete", *Journal of Cement and Concrete Research*, 30 (2001) 379-383.
- Mahsanlar N., "Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışı" Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- Marill,L., "La Capillarite des Betons Manufactures", *Revue des Mateiaux de Costruction*, no.485, Fevrier 1956, p. 31-40.
- Morabito P., Measurement of the thermal properties of different concretes, *High Tem. High Press.* 21 (1989) pp 51 - 59
- Murlin, J.A., Willson, C.,1952. Field Practice in Light-weight Concrete. *ACI Journal*, *Proceedings*, 49(1), 21-36.
- Neville A.M., (2000), "Properties of Concrete", Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA.
- Orchard D.F. and B.Sc., Ph. D., 1962. The deterioration of concrete and its resistance to chemical attack. *Concrete Technolog*, Vol.1, *Properties of Materials*, pp. 315-347.
- Öztürk, A., 1996. Betonun hızlandırılmış rötresinin iç yapıyla ilişkisi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Phan L.T., Carino N.J.,1998, Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*
- Phan L.T., Peacock R.D., 1999, Experimental Plan for Testing the Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperatures, Building and Fire Research Laboratory, NIST, Maryland, USA
- Polat R., "Genleştirilmiş perlit ve pomza ile hava sürükleyici katkının betonda kılcal geçirimsizlik ve don hasarına etkisi" Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- Poon, C. S. et al., Comparison of the strength and durability performance of normal and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research* 31 (2001) 1291–1300
- Poon, C. S. et al., "Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures", *Journal of Cement and Concrete Composites*, 34 (2004) 2215-2222.

- Postacıoğlu, B., 1987. Beton bağlayıcı maddeler, agregalar, beton. Cilt 2, İTÜ, İnşaat Fakültesi, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Sakr, K. ve El-Hakim, E., “Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties”, *Journal of Cement and Concrete Research*, 35 (2005) 590-596.
- Savva, A. et al., “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”, *Journal of Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 239-248.
- Schnider, U., 1982. Behavior of Concrete at High Temperatures, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 337, Berlin.
- Shoab M.M., Ahmed S.A. ve Balaha M.M., (2001), “Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars”, *Cement and Concrete Research*, sayı 31, sayfa 1533-1538.
- Short, A., Kinniburgh, W., 1978. *Lightweight Concrete*, Galliard Printers Ltd., Great Yormouth, Great Britain.
- Süvari, Y., 1995. Hızlandırılmış rötre ile hidrolik rötre arasındaki ilişkinin incelenmesi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Steiger, R.W., Hurd, M.K., 1978. Lightweight insulating concrete for floors and roof decks, *Concrete Construction* 23 (7), 411-422.
- Taşdemir, Canan, 1998. Mineral katkıların ve kür koşullarının betonun kılcal geçirimsizliğine etkileri. Beton Çimento ve Boya Semineri, DSİ-TAKK Dairesinin Kuruluşunun 40. Yılı Anısına 24-26 Haziran, Ankara.
- Tasdemir C., Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. *Cement and Concrete Research* 2003; 33:1637-42.
- Terro, M. J., “Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures”, *Journal of Building and Environment*, 41 (2006) 633-639.
- Tanchev, R. ve Purnell, P., “An application of a damage constitutive model to concrete at high temperature and prediction of spalling”, *International Journal of Solids and Structures*, 42 (2005) 6550-6565.
- Topçu, İ. B., “Beton Teknolojisi”, Osman Gazi Üniv., Eskişehir 2006
- Tulyaganov, D.U., Tukhtaev, M.E., Escalante, J.I., Ribeiro, M.J., Labrincha, J.A., Processing of cordierite based ceramics from alkaline-earth-aluminosilicate glass, kaolin, alumina and magnesite, *J. Eur. Ceram. Soc.* 22 (2002) 1775-1782.
- Turgutalp, Ü., 1978. Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasıyla üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerine bir araştırma. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doçentlik Tezi, Erzurum.
- Türker P., Erdoğan K., Erdoğan B., Farklı tiplerde agregalar içeren yangına maruz kalmış harçların incelenmesi, *Çimento ve Beton Dünyası*, Vol.6, TÇMB, Mayıs Haziran 2001.
- Türkmen, İ., 2002. Korozif Etkiler Altında Yüksek Fırın Cürufu Ve Silis Dumanı Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Özellikleri Ve Dayanırlılığı, Atatürk üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Türkmen, I., Kantarcı A., Effects of expanded perlite aggregate and different curing conditions on the physical and mechanical properties of self-compacting concrete, *Building and Environment* 42 (2007) 2378-2383

- Uyan, M., 1975. Beton ve harçlarda kılcallık olayı. İTÜ, İnşaat Fakültesi, Doktora Tezi, İstanbul.
- Uyan, M., Özcan M. ve Yıldırım H., 1998. Tunçbilek ve seyitömer uçucu küllerinin betonun kılcallık ve su emme özelliklerine etkisi. Beton Çimento ve Boya Semineri, DSİ-TAKK Dairesinin Kuruluşunun 40. Yılı Anısına 24-26 Haziran, Ankara.
- Üzümeri, M., Özden, Ş., 1991. Yüksek mukavemetli betonun inşaatı kullanımı konusunda standartlar ve yönetmeliklerdeki gelişmeler. 2. Ulusal Beton Kongresi, Yüksek Dayanımlı Beton, İstanbul.
- Xiao, J. ve König, G., “Study on concrete at high temperature in China—an overview”, Fire Safety Journal, 39 (2004) 89-103.
- Yaşar, S., Türkmen, İ., Bingöl, A.F., Demirboğa, R., “The Influence of Expanded Perlite and Pumice Aggregate with Air Entraining Agent and Polypropylene Fiber on the Capillary Absorption of Concrete Exposed to High Temperature”, 8th International Congress on Advances in Civil Engineering, Famagusta, North Cyprus, 2008, 107-120.
- Yazıcı, H. et al., “High Temperature Resistance of Pumice Mortar”, Cement ve Concrete Technology in the 2005, Second International Symposium, İstanbul, 2 (2000), 457-464.
- Yüncü, H. ve Kakaç S., “Temel Isı Transferi”, Bilim Kitabevi, Ankara, 1999.
- Yüzer N., Aköz F. ve Öztürk L.D., (2004), “Compressive Strength–Color Change Relation in Mortars at High Temperature”, Cement and Concrete Research, sayı 34, sayfa 1803-1807.
- Zhang B., Bicanic N., Pearce C.J. ve Philips D.V., (2002), “Relations between brittleness and moisture loss of concrete exposed to high temperatures”, Cement and Concrete Research, sayı 32, sayfa 363-371.
- Zoldners N.G., Wilson H.S., Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete, Behavior of concrete under temperature extremes ACI publication SP 39, 1973

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum’da doğdu. 1997 yılında İstanbul Bağcılar Arif Nihat Asya İlköğretim Okulu’nu, 2001 yılında Erzurum Atatürk Lisesi’ni bitirdi. 2001 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi. Bu bölümden 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans yapmaya hak kazandı.

Yüksek lisans süresi boyunca proje yürütücülüğünü İbrahim TÜRKMEN’in üstlendiği “Lifli, Hava Sürükleyici Katkılı ve Yöresel Hafif Agregalarla Üretilen Yüksek Dayanımlı Betonların Yangın Dayanıklılıklarının İyileştirilmesi ve Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi” adlı TÜBİTAK araştırma projesinde görev yaptı. Evli ve bir çocuk babasıdır.