

**HAM PERLİT AGREGASI KULLANILARAK
YÜKSEK DAYANIMLI HAFİF BETON
ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**İsmet ULUSU
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı
Prof. Dr. Rüstem GÜL
2007
Her Hakkı Saklıdır.**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**HAM PERLİT AGREGASI KULLANILARAK YÜKSEK
DAYANIMLI HAFİF BETON ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İsmet ULUSU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ERZURUM
2007**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

HAM PERLİT AGREGASI KULLANILARAK YÜKSEK DAYANIMLI HAFİF BETON ÜRETİLEBİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmet ULUSU

**Atatürk Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Rüstem GÜL

Maksimum agregata tane çapı 12,5 mm olan ve granülometrisi Fuller bağıntısına uyan, ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Bunun için; 0,3-0,4 ve 0,5 gibi üç farklı su-çimento oranında, beş farklı dozajda ve 23 farklı karışımdan beton numuneler hazırlanmıştır. Karışımların bağlayıcı miktarı (Çimento veya çimento+silis dumanı) 450 ile 650 kg/m³ arasında değişmiştir. Betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek için, bazı karışımlara karışım hacminin %5 kadar ağırlıkta lif katılmıştır. Ayrıca taze betonun işlenebilirliğini düzenlemek için bütün karışımlara bağlayıcı ağırlığının %1,5 kadar süper akışkanlaştırıcı katılmıştır.

Taze ve sertleşmiş betonun fiziksel ve mekanik özellikleri ASTM'nin ilgili standartlarına göre belirlenmiştir. Taze betonun çökme değerleri 120 ile 210 mm arasında değişmiştir. Karışıma çelik lifin katılması; karışımın viskozitesini artırarak betonda karışım, taşıma ve yerleştirme sırasında oluşabilecek segregasyon riskini ortadan kaldırmış ve betonun homojenliğini artırmıştır. Fakat betonun çökme değerinde bir azalma sağlamıştır.

Araştırma sonuçlarına göre; perlit agregası kullanarak birim ağırlığı 1830 ile 1915 kg/m³ arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretimi için mineral katkının zorunlu olmadığı, fakat süper akışkanlaştırıcının kullanımının zorunlu olduğu görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı olan 110 MPa'la 90 gün sonunda 660 kg/m³ 'lük bağlayıcı miktarıyla ulaşılmıştır. Araştırma sonucuna göre; betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde en etkili parametrelerden biri su-çimento oranı, diğeri ise bağlayıcı miktarıdır. Çelik lif; betonun basınç dayanımında bir artış sağlamazken, çekme dayanımlarında %70'e varan bir artış sağlamıştır. Lif aynı zamanda betonun daha sünek davranmasına neden olmuştur. Bu betonların elastiklik modülleri 17.5 ile 25,5 GPa arasında değişmiştir.

2007 , 128 sayfa

Anahtar Kelimeler: Ham perlit, yüksek dayanımlı hafif beton, çelik lif, silis dumanı, ısı iletkenliği, kuruma rötresi, birim ağırlık

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION TO PRODUCTION OF HIGH STRENGTH LIGHT WEIGHT CONCRETE WITH USING RAW PERLITE AGGREGATE

İsmet ULUSU

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

Supervisor: Prof. Dr. Rüstem GÜL

Raw perlite aggregate which have nominal maximum aggregate size 12,5 mm and gradation fit Fuller equation was used to produce high strength lightweight concrete has been studied. As a result series eleven concrete mixtures involving 23 batches were made at tree different water-cement ratio 0,3- 0,4 and 0,5 with using cement or cement and silica fume contents of the mixture ranged from 450 to 650 kg/m³. Steel fiber was adding to some mixtures for enhancing mechanical properties of the concrete with volume fractions of 5% . To regulate workability of the concrete superplasticed was added all mixtures by 1,5% weight of cement.

Some fresh and hardened properties of the concrete was evaluated according to ASTM standard testing procedures. Slump of the fresh concrete was founded between 120 and 210 mm. Such properties meet the modern concrete requirements for good workability, pumpability and high strength. Adding steel fiber to the concrete mixture greatly reduces the sedimentation of aggregate during mixing, transporting and placing and improves uniformity of mix but slump value was reduced.

From the result of this investigation, it is concluded that high strength concretes with densities between 1830 and 1915 kg/m³ can be made with or without use of mineral admixtures, but use of super plasticizer is mandatory. The highest compressive cube strength achieved was 110 MPa at 90 days for cementations content of 660 kg/m³. The results of the analysis indicate that water cement ratio was found to have significant effect on mechanical and physical properties of these concretes. Also cement content and cement type effect these properties. The steel fiber did not effect compressive strength, but did increase the tensile strengths about %70 and brittleness of these concretes. The elastic modulus of these concretes change between 17,25 and 25,5 GPa.

2007, 128 pages

Keywords: Raw perlite, high strength lightweight concrete, steel fiber, silica fume, heat conductivity, shrinkage, unit weight

TEŞEKKÜR

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında doktora tezi olarak hazırladığım bu çalışmada, bana bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan ve araştırmalarımı yönlendiren Sayın Prof. Dr. Rüstem GÜL'e, Sayın Prof. Dr. Recep BONCUKÇUOĞLU ve Sayın Doç. Dr. Ramazan DEMİRBOĞA'ya minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca çalışmamda bana her türlü kolaylık ve yardımı sağlayan Erzincan Üniversitesi Meslek Yüksekokulu Müdürü Sayın Prof. Dr. Şakir BAYINDIR'a, malzeme temininde yardımcı olan ERPER işletme sahibi Sayın Düzgün ÜRÜN beye ve deneyler sırasında yardımlarını esirgemeyen inşaat programı personeline teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana göstermiş oldukları sabır ve destekten dolayı ailem ve çocuklarım M.Abdülhakim, Rümeysa ve Esila Nur'a teşekkür ederim.

İsmet ULUSU

Mayıs 2007

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Hafif Betonun Tarihçesi.....	1
1.2.Hafif Agregalar.....	4
1.2.1.Doğal hafif agregalar.....	5
1.3.1.Hafif beton çeşitleri.....	8
1.3.1.Yüksek dayanımlı hafif beton.....	8
2.KAYNAK ÖZETLERİ.....	20
3.MATERYAL ve METOD.....	33
3.1.Materyal.....	33
3.1.1.Çimento.....	33
3.1.2.Silis dumanı.....	35
3.1.3.Çelik lif.....	36
3.1.4.Akışkanlaştırıcı.....	36
3.1.5.Su.....	37
3.1.6.Agrega.....	37
3.2.Metod.....	37
3.2.1.Yüksek dayanımlı hafif beton karışım hesabı.....	37
3.2.2.Karışımındaki agrega boyut ve oranları.....	38
3.2.3.Bağlayıcı miktarının belirlenmesi.....	39
3.2.4.Karışım suyu.....	40
3.2.5.Karışım oranları.....	40
3.3.Betonun Karıştırılması ve Kalıplanması.....	44

3.4.Betonun Bakımı.....	45
3.5.Betonun Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	46
3.6.Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel özelliklerinin Belirlenmesi.....	51
3.6.1.Taze betonun işlenebilme özelliğinin belirlenmesi.....	51
3.6.2.İşlenebilme özelliğinin kompaksiyon faktör testi ile belirlenmesi.....	51
3.6.3.Betonun kıvamının çökme testi ile belirlenmesi.....	52
3.6.4.Betonun kuruma rötresinin belirlenmesi.....	53
3.6.5.Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi.....	54
3.6.6.Sertleşmiş betonun birim ağırlık ve su emme oranının belirlenmesi.....	54
3.6.7.Betonun ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi.....	55
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	57
4.1.Perlit Agregasının Özellikleri.....	57
4.2.Taze Betonun Özellikleri.....	61
4.3.Sertleşmiş Betonun Fiziksel Özellikleri.....	66
4.3.1.Birim ağırlık.....	66
4.3.2.Su emme oranı.....	70
4.3.3.Kuruma rötresi.....	72
4.3.4.İsı iletkenlik katsayısı.....	75
4.3.5.Kür.....	79
4.4.Sertleşmiş Betonun Mekanik Özellikleri.....	80
4.4.1.Basınç dayanımı.....	80
4.4.2.Betonun gerilme deformasyon ilişkisi.....	94
4.4.3.Betonun elastiklik modülü.....	98
4.4.4.Çekme dayanımı.....	104
4.4.5.Yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonların ultrases değerleri.....	116
5.SONUÇ ve ÖNERİLER.....	121
5.1.Sonuç.....	121
5.2.Öneriler.....	122
KAYNAKLAR.....	124
ÖZGEÇMİŞ.....	129

SİMGELER DİZİNİ

D_{max}	Karışımında kullanılan maksimum agrega tane çapı
d_i	Anılan elek çapı
E_c	Betonun statik elastiklik modülü
E_d	Betonun dinamik elastiklik modülü
f_c	100x100x100 mm ³ 'lik küp numunenin basınç dayanımı
f_{cu}	150x150x150 mm ³ 'lik küp numunenin basınç dayanımı
f_y	Silindir numunenin basınç dayanımı
f_t	Betonun yarmada çekme dayanımı
f_{te}	Betonun eğilmede çekme dayanımı
P_i	Anılan elekten geçen %' de
V	Betonun ultrasonik ses geçiş hızı
w/c	su-çimento oranı
w	Betonun su emme oranı
W	Betonun birim ağırlığı
ϵ	Betonun birim deformasyonu
μ	Betonun poisson oranı
λ	Betonun ısı iletkenlik katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.5.1.	Betonun basınç dayanımının belirlenmesi	47
Şekil 3.5.2.	Betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesi	48
Şekil 3.5.3.	Betonun eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi.....	49
Şekil 3.5.4 .	Elastiklik modülü deneyinden genel bir görünüm.....	50
Şekil 3.6.3.1.	Beton kıvamının çökme deneyi ile belirlenmesi.....	52
Şekil 3.6.4.1.	Betonun kuruma rötresinin ölçülmesi.....	54
Şekil 3.6.7.1.	Sıcak tel yöntemiyle ısı iletkenliğinin belirlenmesi	56
Şekil 4.1.1.	İri perlit agregasının basınç dayanım testi sırasında kırılması.....	59
Şekil 4.2.1.	Katkısız betonun çökme biçimi.....	63
Şekil 4.2.2.	Lifli betonun çökme biçimi.....	64
Şekil 4.3.1.	Çimento miktarı ile birim ağırlık arasındaki ilişki.....	67
Şekil 4.3.2.1.	Birim ağırlık ile betonun su emme oranı arasındaki ilişki.....	71
Şekil 4.3.3.1.	Kuruma rötresinin zamana bağlı değişimi.....	73
Şekil 4.3.4.1.	Birim ağırlık ile ısı iletkenliği arasındaki ilişki	77
Şekil 4.3.4.2.	Isı iletkenliğinin ölçüldüğü beton yüzeyi.....	78
Şekil 4.4.1.1.	Basınç dayanımının zamana bağlı değişimi.....	84
Şekil 4.4.1.2.	Normal agregalı betonda (Kontrol betonu) basınç dayanım test sonrası görünüm	85
Şekil 4.4.1.3.	Normal agregalı betonda (Kontrol betonu) eğilmede çekme dayanım test sonrası kırılma yüzeyi.....	86
Şekil 4.4.1.4.	Basınç dayanım test sonrası perlit agregalı hafif betonda görünüm.....	86
Şekil 4.4.1.5.	Lif katkılı betonların basınç yükü altında kırılma şekilleri	90
Şekil 4.4.1.6.	Birim ağırlık basınç dayanımı arasındaki ilişki	91
Şekil 4.4.1.7.	Basınç dayanımı ve çimento miktarı arasındaki ilişki.....	93
Şekil 4.4.2.1.	Katkılı ve w/c oranı 0,3 olan betonların gerilme deformasyon eğrileri .	94
Şekil 4.4.2.2.	Katkılı ve w/c oranı 0,4 olan betonların gerilme deformasyon eğrisi...	96
Şekil 4.4.2.3.	Katkılı ve w/c oranı 0,5 olan betonların gerilme deformasyon eğrisi...	97
Şekil 4.4.3.1	Basınç dayanımı ile statik elastiklik modülü arasındaki ilişki	102

Şekil 4.4.3.2. Ultrasonik ses geçiş hızı ile dinamik elastiklik modülü arasındaki ilişki	104
Şekil 4.4.4.1. Basınç ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	109
Şekil 4.4.4.2. Basınç ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki	111
Şekil 4.4.4.3. Eğilme ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki	112
Şekil 4.4.4.4. Lifsiz betonda eğilmede çekme dayanım deneyi sonrası görünüm.....	114
Şekil 4.4.4.5. Lifli betonda eğilmede çekme dayanım deneyi sonrası görünüm	115
Şekil 4.4.5.1. Ultrasonik ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki	117
Şekil 4.4.5.2. Ultrasonik ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki bağıntı.....	118
Şekil 4.4.5.3. Ultrasonik ses geçiş hızı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki.....	120

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1.1.1.	PC 42,5 R'nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri	34
Çizelge 3.1.2.1.	Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	35
Çizelge 3.1.4.1	Akışkanlaştırıcının özellikleri.....	36
Çizelge 3.2.1.	0.3 w/c oranı için beton karışım oranları.....	41
Çizelge 3.2.2.	0.4 w/c oranı için beton karışım oranları.....	42
Çizelge 3.2.3.	0.5 w/c oranı için beton karışım oranları	43
Çizelge 3.2.4.	Katkılı beton karışım oranları.....	44
Çizelge 4.1.1.	Perlit agregasının kimyasal bileşenleri	57
Çizelge 4.1.2.	Erzincan Mollaköy perlit agregasının fiziksel özellikleri.....	61
Çizelge 4.2.1.	Üretilen betonların taze birim ağırlıkları	65
Çizelge 4.3.1.	Yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlık ve su emme oranları.....	66
Çizelge 4.3.2.	Malzemenin yapısal verimi.....	69
Çizelge 4.4.1.1.	0,3 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları	81
Çizelge 4.4.1.2.	0,4 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları.....	82
Çizelge 4.4.1.3.	0,5 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları	82
Çizelge 4.4.1.4.	Silis dumanı ve lif katkılı karışımların basınç dayanım sonuçları	87
Çizelge 4.4.3.1.	Perlit agregalı yüksek dayanımlı betonların elastiklik modülleri	99
Çizelge 4.4.4.1.	W/C oranı 0,3 olan karışımın çekme dayanım sonuçları.....	105
Çizelge 4.4.4.2.	W/C oranı 0,4 olan karışımın çekme dayanım sonuçları	106
Çizelge 4.4.4.3.	W/C oranı 0,5 olan karışımın çekme dayanım sonuçları	106
Çizelge 4.4.4.4.	Lif ve silis dumanı katkılı karışımların çekme dayanım sonuçları ...	113
Çizelge 4.4.5.1.	Üretilen betonların ultrasonik ses geçiş hızı.....	119

1. GİRİŞ

1.1. Hafif Betonun Tarihçesi

Hafif betonun kullanımı milattan 3000 yıl öncesine dayanmaktadır. Avrupada ise 2000 yıl öncesinde Romalılar tabnak ve heykellerini hafif beton kullanarak inşa etmişler. Enterasan olan ise; volkanik kayalardan olan pomza, perlit, scoria ve benzeri hafif agregaların bugün, dünyanın çeşitli yerlerinde agrega olarak kullanılmasıdır (Aitcin 1999). Üçüncü yüz yılda Iraktaki Babül sarayları, dördüncü yüz yılda Sümerler tarafından yapılan şu andaki Ayasofya cami ve 624 ile 987 yılları arasında Meksikada yapılan piramitlerin inşasında hafif beton kullanılmıştır.

İlk yıllarda hafif agrega olarak, doğal hafif agregalardan olan pomza, scoria, tuf, perlit ve benzeri volkanik orijinli kayalar kullanılmıştır. Bu hafif agregalar hem iri hem ince agrega yerine kullanılmıştır. İnce olarak kullanılan hafif agregaların büyük çoğunluğu puzolanik aktiviteye sahiptir (Chandra and Berntsson 2003). Erdoğan (2003) Efes ve Milas'daki tarihi eserlerin bozulmadan günümüze kadar ulaşmasının, buradaki yapılarda kullanılan kayaç ve bağlayıcıların puzolanik aktiviteye sahip olmaları ile mümkün olacağını belirtmektedir. Puzolanik aktiviteye sahip olan hafif agregalar, özellikle çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği olan kalsiyum silikat hidrati oluşturarak, çimento matrisinin dayanım ve yoğunluğunu artırıp, boşluk yapısını düzenleyerek, üretilen betonların mekanik, bazı fiziksel özellikleri ve durabiliteleri üzerinde önemli derecede olumlu katkı sağlamaktadır (Short and Kinniburg 1978; Chandra and Berntsson 2003; Anwar Hossain 2004).

Hafif agregaların sağlamış olduğu avantajlar, dünya genelinde bu agregaların kullanımını yaygınlaştırmıştır (Chandra and Berntsson 2003). Bu agregaların her yerde mevcut olmaması, bazı ülkeleri fabrikalarda hafif agrega üretimine yöneltmiştir. Fabrikalarda hafif agrega üretimi için genelde kil, uçucu kül, shale, slate ve yüksek fırın

cürüfü gibi doğal malzemeler kullanılmıştır. Üretilen agregaların özellikleri, kullanılan hammaddeye ve üretim yöntemine bağlı olarak değişmektedir (Short and Kinniburgh 1978; Chandra and Berntsson 2003). Fabrikalarda birim ağırlığı 50 kg/m^3 'ten 1000 kg/m^3 'kadar değişen aralıkta hafif agregalar üretilmiştir. Neville (1995), Chandra and Berntsson (2003), Kayali *et al.* (2003) ve Aitcin (1998) gibi bir çok araştırmacı bu agregalar ile yüksek oranda bağlayıcı ve akışkanlaştırıcı kullanılarak küp basınç dayanımı 80 MPa olan, yüksek dayanımlı hafif beton üretiminin mümkün olduğunu söylemiştir. Hafif betonların sağlamış olduğu avantajlar bu betonların kullanımını popülerleştirerek zorunlu hale getirmiştir. Bu betonların hafif , ısı iletimlerinin normal betonlara göre düşük olması ve puzolanik aktivite ile durabilitelerinin zamanla artması, bu betonların bazı yapılarda kullanımını zorunlu kılmaktadır. Yirminci yüzyılın başında İngilterede bir çok yapı hafif beton kullanılarak inşa edilmiştir. Bu yapılardan bir tanesi'de British museum'dir. 1918 yılında J. Hayde ilk hafif agrega üretim yöntemini geliştirmiş ve patentli olarak fabrikalarda üretilmeye başlanılmıştır. Üretilen bu agregaların bir çoğunun hertürlü betonarme yapılarda kullanılabilinecek özelliğe sahip olduğu belirtilmektedir. Hafif agregaların kullanım alanları o kadar artmışki, 1917'de Birinci Dünya savaşı sonrasında hafif beton kullanılarak gemi üretilmiştir (Chandra and Berntsson 2003; Short and Kinniburgh 1978). Hafif betonların hafif ve yüksek durabiliteye sahip olmaları, bu betonların liman inşaatlarında kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu betona olan talebin artması, bu betonların dayanımlarının artırılması yönünde araştırma ve çalışmaların artmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmalar, yüksek dayanımlı hafif betonların doğmasına neden olmuştur. İlk yüksek dayanımlı hafif beton Norveç'te üretilmiştir (Aitcin 1998). Aitcin (1998), Neville (1995) ve Kayali (2005) hafif agregaların normal agregalara göre oldukça düşük dayanıma sahip olduğunu belirttikeler. Hafif agregalardaki bu dayanım düşüklüğünün, yüksek dayanımlı bağlayıcı kullanımı ile giderilmesinin mümkün olduğunda söylemişlerdir. Bağlayıcı matrisin yüksek dayanıma sahip olması, ancak matrisin yoğun bir yapıya sahip olmasıyla mümkündür (Aitcin 1998). Bu yoğun yapı, bu betonların ısı iletimini, normal hafif betona göre artırmakta ve aynı zamanda bu betonların yangın dayanımlarını da düşürmektedir (Aitcin 1998; Neville 1994). Bu olumsuzluklar yüksek dayanımlı hafif betonlar için bir dezavantaj görünse de, bu durum

polimer, polimer lif ve boşluk oluşturucu kimyasal katkıların kullanımıyla giderilmektedir (Chandra and Berntsson 2003).

Hafif agregaların bir çoğunun fabrikalarda atık malzemelerin kullanımıyla üretilmesi bir çevre tahribinide önlemektedir. Hafif agregaların, normal agregaya göre pahalı olması, doğal olarak bu agregalar ile üretilen betonların daha pahalı olacağı kanısını da oluşturmaktadır. Fakat hafif betonların üretim, taşıma ve yerleştirme esnasında sağladığı enerji tasarrufu ve beton olarak sağladığı önemli avantajlar sayesinde, bu durum tam tersine dönmektedir.

Agrega ile matris arasındaki bağ, hafif agregalı betonlarda normal agregalı betonlara göre daha kuvvetlidir. Çimento hamuru, hafif agreganın boşluklu yapısından agregaya içerisine enjekte olarak agregaya ile matris arasında kuvvetli bir bağın oluşumuna neden olmaktadır. Böylece agregaya ile matris arasında zayıf bir nokta oluşumu engellenerek ileride durabilitesi yüksek bir betonun oluşumu sağlanmaktadır (Anwar Hossain 2005). Son zamanlarda hafif beton kullanımı ve bu betonlar üzerinde yapılan araştırmalar artarak, hızla yüksek performanslı beton üretimine doğru gidilmektedir. Beton; genelde gri renkli, iyi mekanik özelliklere sahip fakat ağır ve yalıtımsız bir malzeme olarak bilinmektedir. Son yıllarda betonun istenen renk, birim ağırlık ve dayanımda üretilebileceği görülmüştür. Doğal ve yapay hafif agregaların düşük birim ağırlığa sahip olmaları, yalıtımda ve ağırlıkta büyük kazançlar sağlamaktadır. Betonun birim ağırlığı 300 ile 3000 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu betonların ısı yalıtımları 0,1 ile 3 W/mk arasında değişirken, basınç dayanımları ise 1 ile 100 MPa arasında değişmektedir (Chandra and Berntsson 2003). Hafif beton, birim ağırlığı normal betonlardan belirli oranda küçük olan beton olarak tarif edilmiştir. Postacıoğlu, birim hacim ağırlıkları 1800 kg/m³ den küçük olan betonların hafif beton sınıfına girebileceğini belirtmiştir. ASTM, ACI, TSE ve Avrupa Beton Standartları hafif betonu, kuru birim ağırlığı 1200 ile 2000 kg/m³ arasında değişen beton olarak tarif etmektedirler. Bu betonların birim ağırlıkları kullanım amacına göre değişmektedir. Isı yalıtım amacı için kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 300 ile 800 kg/m³ arasında değişirken, taşıyıcı olarak kullanılan hafif betonların birim ağırlıkları 2000 kg/m³ kadar yükselebilmektedir. Bu

betonların birim ağırlıkları ve ısı yalıtımları normal betonlara kıyasla daha düşük olduğundan, kullanıldıkları yapılarda ısı kayıplarında ve ölü yüklerinde önemli derecede bir düşme sağlarlar. Normal ağırlıklı betonların birim ağırlıkları ve ısı iletkenliklerinin yüksek olması, araştırmacıları birim hacim ağırlıkları ve ısı iletkenliği düşük, basınç mukavemeti ve durabiliteleri iyi olan beton üretimine yöneltmiştir. Agregalar beton hacminin %70 ile %80'ini oluşturduğundan daha hafif beton üretmenin yolu birim ağırlığı daha düşük agrega kullanmaktan geçmektedir. Short and Kinniburgh (1978) İngiliz araştırmacı Hayde tarafından 1917 yılında hafif beton üretiminde kullanılabilecek birim ağırlık ve mukavemete sahip genişletilmiş şist ve kil agregaları üretecek döner fırın sisteminin dizayn edildiğini belirtmektedirler. Aynı yıllarda Straub bitümsü sinterize edilmiş kömür kurumlarını hafif beton üretiminde kullanmıştır (Short and Kinniburgh 1978). İlk zamanlarda hafif betonlar yalıtım amaçlı kullanılmıştır. Yalıtım amaçlı kullanılan bu hafif betonların birim ağırlıkları 300 ile 800 kg/m³ arasında değişmiştir. Daha sonraki çalışmalarda bazı hafif betonların taşıyıcı beton olarak kullanılabileceği görülmüştür. Fakat taşıyıcı hafif betonların birim ağırlıkları ve ısı iletimleri, yalıtım amaçlı kullanılan hafif betonlara göre oldukça fazladır (Neville 1988). Bu değerlerde normal ağırlıklı betonların değerleriyle kıyaslandığında %25-30 daha düşük olduğu görülmektedir. İlk betonarme hafif betonu (Taşıyıcı hafif beton) II. Dünya savaşı sırasında tortulu şist agregası kullanılarak elde edilmiştir. Bu betonun birim ağırlığı 1760 kg/m³ ve basınç mukavemeti 34.47MPa (Short and Kinniburgh 1978).

1.2. Hafif Agregalar

Hafif agregalar, doğadan doğal olarak veya doğal veya atık malzemelerin çeşitli termal işlemlere tabi tutulması sonucu elde edilirler (Chandra and Berntsson 200). Doğal agregaların kaynağını volkanik orijinli kayalar oluşturmaktadır. Volkan sırasında yüzeye çıkarak soğuyan lav, sinterize boşluklu ve gözenekli bir malzeme oluşturmaktadır. Mağma eriğinin, kristal yapı oluşturmadan ani soğuması sonucu amorf yapılı camsı bir malzeme oluşmaktadır. Eğer mağma eriği yavaş soğursa kristal yapılı bir malzeme oluşur. Lav kaynayan bir sıvı olduğu için içerisinde hava ve gaz

bulunmaktadır. Lavın soğuması sonucu gazın ve havanın etkisiyle boşluklu ve süngerimsi bir yapı oluşmaktadır. Başka bir deyişle lavın soğuması sonucu boşluklu, hafif ve reaktiv yapıda bir malzeme oluşmaktadır. Bu tür malzemeler, volkanik agregası veya pomza, scoria ve perlit agregası gibi isimler almaktadır (Chandra and Berntsson 2003). Termal işlemler sonucu oluşan agregalara, sentetik agregası denilmekte ve bunlar üç gruba ayrılmaktadır.

1-Perlit, vermiculite, kil, şhale ve slate gibi malzemelerin termal işleme tabi tutulması sonucu elde edilen doğal sentetik agregalar.

2-Cam gibi endüstriyel ürünler.

3-Ucucu kül ve yüksek fırın cürüfu gibi atık malzemelerin termal işleme tabi tutulması sonucu elde edilen yapay sentetik agregalar.

Kilin genişletilmesi ile oluşan agregalar Leca ve Liapor, uçucu külün sinterleştirilmesiyle oluşan agregası Laytag ismini almaktadır.

1.2.1. Doğal hafif agregalar

Doğal agregaların büyük çoğunluğu volkanik orijinli olduğu için bu agregalar sadece dünyanın belirli bölgelerinde bulunurlar. Pomza scoria ve perlit bilinen en eski hafif agregalardandır. Romalılar bu agregaları yapılarında yaygın olarak kullanmışlardır. Bu agregalar hafif ve doğal haliyle beton üretiminde kullanılacak kadar kuvvetlidirler. Fakat bu agregaların mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri oldukça fazla değişkenlik gösterirler (Chandra and Berntsson 2003; Neville 1994; Aitcin 1998). Pomza ve perlit eriyik halindeki silisin (SiO_2) soğuması sonucu oluşmuştur. Çabuk soğuma sonucu, malzeme kristalleşmeden, amorf yapıda kalmıştır. Bu malzemelerin hafif olmalarının nedeni, eriyik sırasında bünyesinde bulunan gaz ve suyu dışarı bırakmadan katılması sonucu gözenekli ve boşluklu bir yapıda olmasıdır. Boşluklar küçük ve bir birleriyle bağlantıları yoktur (Anwar Hossain 2004; Chandra and Berntsson 2003). Scoria ve pomza benzer agregalardır. Scoria biraz daha koyu renklidir.

Perlit, doğal olarak oluşan silis esaslı volkanik kayalara verilen bir isimdir. Perlitin tanımı; mağmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup gözle ve mikroskopla görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana getirdiği kütle bünyesinde su damlacıkları bulunan volkanik bir cam türünü ifade eder. Bazı perlit türleri kırıldığı zaman inci parlaklığında küçük küreler elde edildiğinden, perlit ismi inci anlamına gelen "perle" kelimesinden gelmektedir. Ticari kullanımda ise perlit elverişli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında genişleyen ve gözenekli bir hale gelen volkanik orijinli ve doğal olarak oluşan bir camdır. Perlit belirli bir tane iriliğinde özel formlarda 900-1100C⁰ arasında ısıtıldığında hacmini yaklaşık 7 ile 20 katı kadar genişletmekte ve mısır gibi patlayarak yoğunluğu çok hafif bir malzeme haline gelmektedir. Perlit camsı volkanik bir malzemedir. Bünyesinde %2 ile %6 arasında su bulundurmaktadır. Tanelenmiş perlit agregası ani olarak 870C⁰ derecede ısıtıldığında, genişleşerek birim ağırlığı 30 ile 240 kg/m³ arasında değişen bir malzeme elde edilmektedir.

Gözeneklilik, perlit taneciklerindeki boşluk hacmini toplam tanecik hacmine oranının ortalaması olarak tanımlanır. Gözeneklilik perlite emicilik ve yüzeyde soğuma özellikleri kazandırmakta ve bu nedenle bu özelliğin gerekli olduğu uygulama alanlarında önem taşımaktadır. Isı yalıtımı aranan durumlarda su emicilik istenmemektedir. Bunun nedeni gözeneklere dolan suyun ısı iletkenliğini arttırması olmaktadır. Bu durumda silikon veya bir maddeyle gözenekler pasifleştirilerek perlit "hidrofobize" edilmektedir.

Japonyada perlit agregasından yeni bir hafif agrega elde edilmiş olup, ASL denilen bu agreganın doğalından farkı, düşük su emmeye ve yüksek dayanıma sahip olmasıdır. Doğal perlit agregası silikon-karbit (SiC) denilen köpüklü bir sıvı ve bentonit denilen bir bağlayıcı ile karıştırılması sonucu bu yeni malzeme oluşmaktadır. Bu işlem sonucu elde edilen yeni agreganın birim ağırlığı 600 ile 1500 kg/m³ arasında değişmiştir. 24 saat sonrası su emme oranı %5 veya daha az, özgül ağırlığı ise 1.21 gr/cm³ olmuştur. Perlit agregası kullanarak birim ağırlığı 1700 ile 2000 kg/m³ ve basınç dayanımı ortadan yükseğe değişen hafif beton üretimi mümkündür (Chandra and Berntsson 2003).

Vermiculite laminer oluşumdaki bir malzemedir. Görünüm olarak mikaya benzer, mikanın tersine ısıtıldığında genişir ve birim ağırlığı azalır. Doğal birim ağırlığı 600 ile 1100 kg /m³ arasında değişirken, 1150 ile 1250C^o ısıtıldığında birim ağırlığı 60 ile 190 kg/m³ kadar düşer.

Genleştirilmiş kil (Leca); önce saf kil su ile kil karıştırılarak hamur oluşturulur. Bu hamur özel bir düzenekle döner fırına verilirken taneli bir yapıya dönüştürülür. Fırının altına doğru 1100 ile 1200C^o de sinterleşen bu malzemeler camsı bir yapı kazanırlar. Bu agregaların birim ağırlıkları 350 ile 950 kg/m³ arasında değişmektedir. Kuzey Amerikada 1920'de kurulan fabrikalarda genleştirilmiş shale agregaları üretilmeye başlanmıştır. 1952'de genleştirilmiş shale, kil ve slate agregalarını incelemek için enstitüler kurulmuştur. Bu yıllarda genleştirilmiş kil agregaları oldukça popüler olmuştur. Üretilen bu agregaların birim ağırlıkları 500 ile 700 kg/m³ arasında değişmiştir. Bu düşük birim ağırlık bu agregaların kullanımını sınırlamıştır (Chandra and Berntsson 2003). Almanyada 1935 ile 1939 yılları arasında Hayde'sın patenti ile ilk kil agregası üretilmiş ve atık malzemeleri kullanarak hafif agrega üretimi üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Sonuç pek başarılı olmamış ve daha fazla araştırmanın yapılmasını önermişler (Short and Kinniburgh 1978). İngilterede 1970 yılların sonuna doğru hafif beton üretimi için hafif agrega seçimi yapılmıştır. Chandra and Bertsson (2003) İngilterede fabrikalarda leca, aglite ve slate agregaları üretildiğini ve bu agregalardan leca'nın birim ağırlığı düşük olduğu için, bu agrega ile düşük dayanımlı beton üretildiğini belirtmiştir. Aglite ve slate yüksek birim ağırlığa sahip olduklarından bu agregalar ile basınç dayanımı 60 MPa olan beton üretimi mümkündür (Short and Kinniburgh 1978). Hoff (1990), Kayali and Zhu (2004) ve Kayali (2005) gibi araştırmacılar lytag ve solite gibi hafif agregalar kullanılarak orta dayanımdan, yüksek dayanıma kadar değişen aralıkta beton üretiminin mümkün olduğunu belirtmişler.

1.3.1. Hafif Beton Çeşitleri

Hafif betonları, elde ediliş ve kullanım amaçlarına göre çeşitli sınıflara ayırmak mümkündür. Neville (1988) hafif betonları elde edilişlerine göre üç gruba ayırmıştır.

1-Beton veya harç plastik kıvamda iken içerisinde çeşitli metotlar ile çok miktarda boşlukların oluşturulması ile elde edilen boşluklu, gaz veya köpüklü beton gibi adlar alan betonlardır. Bu betonlar içerisinde bir biri ile bağlantısı olmayan gözle görülebilir büyüklükte küresel boşluklar bulunur. Bu boşlukların işgal ettiği toplam hacim, betonun görünen hacminin %60'ı veya daha fazlası kadar olmalıdır (Short and Kinniburgh 1978).

2-Karışımında iri agregası, su ve çimento kullanılarak elde edilen ince agregasız betonlar. Bu tip betonların karışımında genelde 20mm ile 10mm arasındaki agregalar kullanılmaktadır (Gambhir 1986; Aitcin 1998; Short and Kinniburgh 1978).

3-Beton üretiminde kum, çakıl ve kırmataş gibi normal agregalar yerine doğal veya yapay hafif agregaların kullanılması sonucu elde edilen hafif agregalı betonlar.

1.3.2. Yüksek dayanımlı hafif beton

ASTM, ACI, TSE ve benzeri standartlar yüksek dayanımlı hafif betonu; birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 veya daha düşük ve basınç dayanımı 50MPa veya daha yukarı olan beton olarak tanımlar. Aitcin (1998), Kayali (2005) ve Anwar Hossain (2005) gibi bazı araştırmacılar ise birim hacim ağırlıklarına kıyasla yüksek dayanıma sahip olan betonların da yüksek dayanımlı hafif beton olarak kabul edilebilir olduğunu söylemişler.

Yüksek dayanımlı beton kelimesi ilk kez 1970 li yıllarda John Albinger tarafından telafuz edilmiştir (Aitcin 1998). Yüksek dayanımlı betonda en önemli faktör iri agreganın dayanımıdır. Hafif agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi bir sürpriz olarak kabul edilir. Çünkü hafif agregalar boşluklu, çok dayanımlı değil ve kolayca kırılabilir (Aitcin 1998). Buna rağmen birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 civarında olan ve basınç dayanımı 50 ile 60 MPa arasında değişen hafif betonu üretmek

mümkündür (Hoff 1990). Malhotra (1990) ise basınç dayanımı 50-60 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretiminin mümkün olduğunu ve bu betonlarda basınç dayanımında üst limitin 100 Mpa ile sınırlı olduğunu belirtmiştir. Berra and Ferrara (1990)'da benzer görüşleri savunmuş ve birim hacim ağırlığı 1700 kg/m^3 ve 150 mm lik küp basınç dayanımını 60MPa olan hafif beton üretiminin mümkün olduğunu söylemiştir. Wasserman and Bentur (1996) ise diğerlerinden farklı olarak Yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde mutlaka uygun hafif agreganın kullanımının zorunlu olduğunu ve her hafif agreganın ile yüksek dayanımlı hafif beton üretiminin mümkün olmadığını belirtmiştir.

Hafif betonun antik roman çağından beri yaygın olarak başarılı bir şekilde kullanıldığı ve günümüzde ise düşük birim hacim ağırlığa, yüksek durabilite ve süper bir ısı yalıtımına sahip olduğundan dolayı popülerleştiği görülmektedir (Chandra and Berntsson 2003). Yüksek katlı yapıların inşasının yaygınlaşması, büyük kesitli ve uzun açıklıklı yapılarda yüksek dayanımlı, hafif, yüksek enerji yutma kapasitesi ve durabiliteye sahip betonlara ihtiyaç zorunlu hale getirmiştir. Aynı zamanda yapıların ölü yüklerinde önemli oranda bir düşme sağladığı için yapıya gelecek deprem yüklerinde önemli derecede bir azalmaya ve elastiklik modüllerindeki düşüklükten dolayı daha fazla deformasyon yapma özelliğine sahip olduğundan dolayı, yapıların iyi bir deprem davranışı göstermelerine neden olmaktadır (Kayali 2004). Bu belirtilen sebeplerden dolayı son zamanlarda yüksek dayanımlı hafif betonlar üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalardan çok iyi sonuçlar alınmasına rağmen, bu konuda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmuştur. Çünkü normal agregaların tersine, farklı hafif agregalar çok farklı davranışlar sergilemektedir (Chandra and Berntsson 2003).

Yüksek dayanımlı hafif betonların mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen faktörlerden en önemlisi, hafif agreganın tanelerinin su emme kapasiteleridir (Zhang and Gjorv 1991). Agreganın, düşük birim hacim ağırlığı ve istenilen mukavemeti sağlayacak özelliklerde olsa da, su emme özellikleri direkt betonun çökme ve işlenebilirliğini etkilediği için, bu özelliği betonun karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi için yeterli

zamanı sağlamalıdır. Bunu sağlamadığı zaman, sadece laboratuvar ortamında üretilebilen ve sektörde kullanılmayan bir beton elde edilir (Aitcin 1998). Bu durumda agreganın beton üretiminde tamamen kuru, tamamen suya doymun veya belirli bir nem oranındamı kullanılmalı sorusu ortaya çıkmaktadır. Aitcin (1998) bazı araştırmacıların, agregayı tamamen kuru kullanmayı ve karıştırma, taşıma ve yerleştirme sũresince agregalar tarafından emilecek miktardaki suyun karışım suyuna eklenmesini önerdiklerini belirtmiştir. Nowkshchenov ve Whitcomb (1990) bu durumun, su emme kapasitesi dũřũk olan agregalar iãin uygun olmadığını belirtmiştirler. Malhatra, Hoff ve Elimov gibi bazı araştırmacılar ise agregayı karışımdan önce n bir ıslatmaya tabi tutarak agreganın; karıştırma, taşıma ve yerleştirme sırasında betonun soyunu emmesinin önlenmesini önermişlerdir.

W/C oranının belirli değerin altında olması durumunda, autogenous rötrenin oluşumuna neden olan kendiliğinden kkelmenin oluşumu ihtimali yũksektir (Aitcin 1998; Neville 1994). Bu durum özellikle dũřũk w/c oranında elde edilen yũksek dayanımlı betonlarda grũlmektedir. Kuruma rtresinden dolayı iã yapıda oluşan gerilmeler, imento matrisinin o andaki çekme gerilmesini geãmesi durumunda, matris iãerisinde kılcal çatlaklar oluşmaktadır. Bu da bu betonların durabilitesini dũřũrmektedir (Paillere *etal.* 2004). Bir çok araştırmacı yũksek dayanımlı hafif betonda oluşma ihtimali yũksek olan autogenous rötrenin önlenmesi iãin üretimde kullanılacak hafif agreganın suya doymun olmasını önermişler. Yũksek performanslı hafif agrega elde edilmesinde farklı grũřler ortaya çıkmıştır. Novoskchenov and Whitcomb (1990) doğal kumun, Nilsen and Aitcin (1992), Hoff and Elimov (1995) doğal hafif kumun, Berra and Ferrara (1990), Malhatra (1990), Novoskchenov and Whitcomb (1990) doğal ve hafif kum karıştırılmasını önermişlerdir. Doğal veya hafif kumun kullanımı direkt olarak üretilecek betonun dayanımına, birim hacim ağırlık ve işlenebilirliğine etki etmektedir. Hafif kum ile üretilen betonların işlenebilirliği, yũzey dokuları ve pũrũzlũlũklerinden dolayı, diğer kumlar ile üretilen betonların işlenebilirliğinden daha dũřũktür (Aitcin 1998). İnce veya iri hafif agreganın bir kısmının veya tamamının yerine doğal normal agreganın kullanımı ile birim hacim ağırlığı 2000 kg/m^3 veya daha dũřũk beton üretimi oldukãa gũçleřmektedir (Aitcin 1998).

Portlant çimentosu çok miktarda (%63 ile %70) kalsiyum oksit içermesinden dolayı bir çok dezavantaj oluşturmaktadır. Çimentonun hidratasyonu sonucu kalsiyum silikat hidratı (CSH) yanı sıra, fiziksel ve kimyasal olarak aktif olan kalsiyum alüminat, kalsiyum sülfat (Etringate), kalsiyum alümino ferrit ve kalsiyum alüminat hidratları gibi bir çok doğada bulunmayan mineraller oluşmaktadır. Bu mineraller çevre ile devamlı reaksiyon halindedir. Bu reaksiyonlar sonucunda, çeşitli fiziksel ve kimyasal değişimler oluşmaktadır (Neville 1994; Aitcin 1998; Chandra and Berntsson 2003). Çimentonun bu dezavantajlarından dolayı, yüksek performanslı beton üretiminde, çimentonun tek başına kullanımı engellenmiştir. Son yıllarda teknoloji ile birlikte çevre kirliliği de artmış ve beton üzerine de olumsuz olarak etkimiştir. Teknolojik değişim ile birlikte betonun durabilitesi, dayanımının önüne geçmiştir. Çevredeki olumsuzluklar yeni bir bağlayıcı türünün kullanımını zorunlu kılmıştır. Puzolanik malzemeler, çimento matrisinin mikro yapısını modifiye ederek, matrisin durabilite ve dayanımını artırmaktadır (Zhang 1989). Bu durum volkanik orijinli hafif agregalı betonlar için geçerli değildir. Çünkü bu hafif agregalar puzolanik aktiviteye sahip oldukları için, çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest veya reaktif olan maddelerle reaksiyona girerek hem dayanım, hemde durabilitenin artmasına neden olmaktadır (Neville 1994; Aitcin 1998; Chandra and Berntsson 2003; Anwar Hossain 2005). Yüksek dayanımlı hafif beton üretebilmek için yüksek miktarda bağlayıcı kullanılması zorunludur (Weber and Reinhardt 1997). Yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde çok farklı bağlayıcı karışımları kullanılmıştır. Bu betonlarda bağlayıcı olarak, yüksek dayanımlı çimento veya yüksek dayanımlı çimento ile yüksek puzolanik aktivite gösteren mineral katkının karışımından elde edilen bağlayıcılar kullanılmıştır. Puzolanik madde olarak en çok önerilen silis dumanı ve uçucu küldür (Aitcin 1998). Aitcin (1998), Chandra and Berntsson (2003), Kayali (2005), Wilson and Malhotra (1998) ve bir çok araştırmacı silis dumanını toplam bağlayıcının %7 ile %10 arasında kullanılmasını önermişlerdir. Silis dumanının kullanımı, yüksek dayanımlı hafif betonun basınç dayanımı ve kohezivliğini artırmakta ve geçirgenliğini ise azaltmaktadır (Wilson and Malhotra 1998). Yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde 400 ile 600 kg/m³ arasında değişen miktarlarda bağlayıcı kullanılması önerilmiştir. Araştırmacılar bağlayıcı miktarının üst limitini, basınç dayanımında artık önemli bir artış yapmayan miktar olarak alınmasını önermişlerdir. Çimento miktarının belli bir değerinden sonra,

çimento miktarının artması, betonun basınç dayanımında artık artışa neden olmaz ve bu noktadan sonra dayanım üzerinde etkin faktör iri hafif agreganın dayanımı olur (Faust and König 1998). Çimento maksimum miktarı, hafif agrega tipine bağlı olarak değişmekte ve bu limit değer, deneme karışımları yapılarak belirlenmelidir (Aitcin 1998).

Hafif agregaların önemli özelliklerinden biri de; çimento içersinde bulunan serbest kireçlerle reaksiyona girerek dayanım artışına bir katkı sağlaması ve betonların daha uzun ömürlü olmalarına neden olmasıdır (Bremner and Holm 1995). Puzolanik aktivitenin 1850 yıl önce bilindiği ve malzeme seçiminde buna dikkat edildiği, bu tür bağlayıcıların ve malzemelerin kullanıldığı yapıların ayakta kalmasıyla açıklanmaktadır (Bremner and Holm 1995).

Yüksek dayanımlı hafif betonların basınç dayanımları, beton üretiminde kullanılan hafif agregaların performanslarına ve birim hacim ağırlıklarına bağlıdır. Hafif agregaların birim hacim ağırlıklarının artmasıyla betonun basınç mukavemetinde artış görülür (Zhang and Gjorv 1991). Berra and Ferrara ürettikleri hafif betonların, direkt çekme (Pull-off) mukavemetlerinin 1,9 ile 2,4 MPa arasında değiştiğini belirlemiştir. Malhotra (1990) ise yüksek dayanımlı hafif betonların eğilmede çekme dayanımlarının 3,5 ile 5,2 MPa arasında değiştiğini belirtmiştir. Novoskchenov and Whitcomb (1990) yapmış oldukları çalışmada, yüksek dayanımlı hafif betonların eğilmede çekme dayanımlarını 6,7 ile 7,6 MPa arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Gao *et al.* (1997) hafif betonların çekme dayanımlarının, normal ağırlıklı betonların çekme dayanımlarından daha düşük olduğunu söylemektedir. Bunun nedeni; hafif agregaların daha düşük dayanıma sahip olmaları olarak açıklamaktadır. Yüksek dayanımlı hafif betonlarda, kırılma iri agreganın kesilmesi ile oluştuğundan bu betonlarda kırılmalar oldukça gevrek olmaktadır. Bu betonların basınç dayanım ve sünekliğini artırmak için lif katılmalıdır (Gao *et al.* 1997; Chen and Liu 2004). Berra and Ferrara (1990), Tamasawa *et al.* (1990) ve Faust (1998) gibi bir çok araştırmacı, hafif agregaların normal agregalara göre daha düşük rijitliğe sahip olduğunu ve aynı dayanıma sahip hafif betonların elastiklik modüllerinin, normal ağırlıklı betonlarınkinden oldukça düşük olduğunu

belirtmişlerdir. Berra and Ferrara (1990) $20C^0$ sıcaklık ve %95 nemde küre tabi tutulan hafif betonların elastiklik modüllerinin 17 ile 30 GPa arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Novoskchenov and Whitcomb (1990) $20 C^0$ sıcaklık ve %50 bağıl nem oranında küre tabi tutulan betonların elastiklik modüllerinin 13 ile 18 MPa arasında değiştiğini söylemiştir. Berra and Ferrara (1990), Tamasawa *et al.* (1990) ve Faust (1998) gibi araştırmacılar, çelik lif kullanılarak hafif betonların elastiklik modüllerinin, artırılmasının mümkün olduğunu gözlemlemişlerdir. Hafif agregaların elastiklik modüllerinin, çimento matrisinin elastiklik modülüne yakın olmasından dolayı, agrega çimento matrisi birleşim yerinde gerilme yığılımı azalmaktadır. Bunun sonucu olarak beton içerisinde gerilme dağılımı daha homojen olmaktadır (Aitcin 1998).

Agrega, çimento ve su gibi temel bileşenler ile üretilmiş kompozit bir malzeme olan beton içerisine karışım sırasında çeşitli yöntemler ile değişik miktarlarda liflerin katılmasıyla elde edilen malzemeye lifli beton denilmektedir (Demiröz vd. 1994). Lifli beton ilk görünüşte normal beton karışımlarına benzemesine rağmen değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı bir özellik gösterir. Liflerin beton içerisinde gelişi güzel dağılımına rağmen lifli beton yük altında homojen bir malzeme olarak davranır (Berra and Ferrara 1990). Beton içerisinde bulunan gerilmeler, malzeme içerisindeki mikro çatlaklar nedeniyle düzensizdirler. Beton içerisine katılan lifler, çimento matrisini güçlendirerek, üzerinden gerilmelerin geçtiği küçük köprüler olarak rol oynarlar. Beton içerisine dağılmış olan bu liflerin çatlak sonlarına bitişik olmasından dolayı lifler, matrisdeki çatlağın büyüme ve yayılmasına neden olan gerilmeleri kendi üzerlerine ve çatlamamış bölgelere naklederler (Demiröz vd. 1994). İletilen bu gerilmeler çatlağın diğer yanına daha düşük gerilme olarak nakledilir. Lifleri tanımlayan en önemli öge lifin sahip olduğu mekanik özellikler ile lifin sayısal bir parametre gibi ifade edilmesini sağlayan biçimsel özelliklerdir (Gao *et al.* 1997, Chen and Liu 2004). Kullanılan liflerin çapları 0.13 ile 1 mm arasında olup uzunluk çap oranı 30 ile 150 arasında değişmektedir. Lif boyları ise 13 mm ile 70 mm arasında değişmektedir. Özellikle çekme ve kesme kuvvetlerine çalışan liflerin beton ile aderansı, lifli betonun işlevini olumlu ya da olumsuz yönde etkiler. Dalgalandırılmış ve uçları bükülmüş liflerin çekme kuvveti etkisi ile matrisden

ayrılması düz liflere göre daha zordur. Çelik liflerin yüksek çekme mukavemetleri sayesinde kırılıp kopmaları çok zordur. Fakat bu liflerin yükün belli bir gerilme değerinden sonra matristen sıyrılması, lifli betonun performansını olumsuz yönde etkileyen en önemli ögedir. Lifler, taşıma ve kullanımda kolaylık açısından 10 yada 30 adedi suda eriyebilen ya da karışım sırasındaki mekanik etkilerle kopabilen bir tutkal ile bir birine yapıştırılmıştır. Lifli beton kompozitlerinde matrisin fonksiyonu, lifleri bir arada tutmak, lifleri korumak ve liflerle veya liflere gelen gerilme transferini sağlamaktır. Lifli betonların mekanik özellikleri, kullanılan lifin mekanik özellikleri kadar beton matrisinin özellikleri de etkili olmaktadır. Bu sebepten dolayı lifli betonlarda maksimum w/c oranını 0.55 den daha küçük, minimum bağlayıcı miktarının da 300 kg/m³ den daha fazla olması önerilmiştir. Lifler betonun,

- Yüksek elastik mukavemet ve çatlama karşı yüksek dayanım,
- Çok yüksek enerji tutma kapasitesi (Toughness) ve darbe dayanımı,
- Yorulma ve kesme kuvvetlerine karşı yüksek dayanım,
- Yüksek plastik deformasyon derecelerinde yük taşıma kapasitesine sahip olmasını sağlar (Demiröz vd 1994).

Yüksek dayanımlı hafif betonların ısıl genleşme katsayısı, ısı iletimi ve ısı yayınımları gibi temel özelliklerin, benzer karışıma sahip olan normal ağırlıklı betonların bu özelliklerinden %50 daha azdır (Neville 1988, Berra and Ferrara 1990). Yüksek dayanımlı hafif betonların iyi bir termal özelliğe sahip olmaları ve elastiklik modüllerindeki düşüklük bu betonları, diğer betonlara göre ısıl gerilme bakımından daha üstün tutmaktadır. Betonda ısı iletimi basınç dayanımının artmasıyla artmaktadır (Novoskchenov and Whitcomb 1990).

Çimento bileşimli malzemelerde nem azalması ve transferi ile malzeme hacim azalması oluşmaktadır. Bu olay sonucunda beton içerisinde çeşitli büyüklükte gerilmeler oluşmaktadır. Bu olaya kuruma rötresi denilmektedir. En büyük rötre ilk zamanlarda oluşmaktadır (Li *et al.* 2006). Bu tür kuruma rötrelerinin oluşturduğu gerilmeler oldukça önemli problemler oluşturmaktadır. Kuruma rötrelerinin oluşturduğu gerilmeden dolayı beton içerisinde kılcal çatlaklar oluşabilmektedir. Bu kılcal çatlaklar

betonun durabilitesini azaltmaktadır (Aitcin 1998; Anwar Hossain 2005) . Zararlı olan çözeltiler ve asitli sular bu çatlaklardan kolayca beton içerisine nüfuz ederek çimentonun yapısını bozmakta ve donatıların korozyonuna neden olmaktadır. Beton elemanlarda rötre çatlağının oluşumunu engellemek veya belirli boyutta kalmasını sağlamak için genelde fiber lifler kullanılmaktadır (Li *et al.* 2006). Çünkü bu liflerin elastisite modülleri düşük olduğu için hacimsel küçülme sırasında çelik lifler gibi ekstra gerilmeler oluşturmamaktadır (Li *et al.* 2006). Kuruma rötresi, agreganın elastisite modülü ile çimento matrisinin elastisite modülü arasındaki farkın azalması ile azalmakta, artması ile artmaktadır. Buradan anlaşıldığı gibi rötrenin oluşumunda önemli bir etkende agreganın fiziksel özellikleridir. Yüksek dayanımlı hafif betonlar, normal betonlara göre daha az rötre göstermektedir (Gao *et al.* 1997; Aitcin 1998; Chen and Liu 2004). Bunun nedeni; hafif agrega içerisinde nemin bulunması ve hafif agregaların elastisite modüllerinin, normal ağırlıklı agregalara göre daha düşük olmasıdır (Berra and Ferrara 1990).

Hafif betonların dizaynı normal betonların dizaynından oldukça farklılık gösterir (Short and Kinniburgh 1978; Neville 1988; Aitcan 1998). Çoğu zaman hafif betonların dizaynlarında, fonksiyonel zorunluluklardan olan, dayanım ile işlenebilirlik arasında tam bir ilişki gözlemlenmemektedir. Oysa Normal betonların dizaynında, bu iki özellik arasında oldukça sıkı bir ilişki bulunmakta ve dizaynlar bu iki özelliği sağlayacak şekilde yapılır. Bu nedenle, farklı hafif beton dizaynlarında farklı yöntemlerin kullanılması önerilmektedir. Normal betonların özelliklerini etkileyecek faktörler üzerinde, oldukça fazla çalışma yapılmış ve gerekli bilgiler elde edilmiştir. Hafif betonların özelliklerini etkileyecek faktörler üzerinde henüz yeterli çalışmalar yapılmamış ve yeterli bilgi elde edilememiştir (Short and Kinniburgh 1978; Chandra and Bertsson 2003). Son zamanlarda dünya genelinde hafif beton kullanım ihtiyacının artmasıyla birlikte bu konu üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Buradaki dezavantajlardan biri farklı hafif agregaların çok farklı özelliğe sahip olmaları ve her bir agrega için farklı dizayn yöntemine ihtiyaç duyulmasıdır. Araştırma enstitüleri farklı bazı hafif agregalar kullanılarak elde ettikleri betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini

belirleyerek arşiv oluşturmuşlardır. Fakat bu bilgiler henüz yeterli aşamaya ulaşmamıştır.

Üretilcek betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde en etkili faktörlerden biri de agrega tane boyutu ve granülometrisidir. ASTM ve BS gibi bazı standartlar, taşıyıcı hafif beton üretimi için bazı granülometri önermektedirler. Bu standartlar ve araştırmacılar, taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılacak agrega maksimum tane boyutunu 14 mm ile 10mm arasında alınmasını önermektedirler.

Hafif betonların dizaynında temel ilkelerden biri, üretilcek betonun istenilen işlenebilirliğe sahip olmasıdır. Hafif agrega tanesinin yüzey dokusu, şekli ve ince agreganın'da iri agrega yüzey dokusuna sahip olması, bu betonların işlenebilirliğini azaltıcı bir etki yapmaktadır (Chandra and Bertsson 2003; Aitcin 1998; Short and Kinniburg 1978). Hafif betonların dizaynlarında en temel problemlerden biri, istenilen işlenebilirliğe sahip beton üretiminin oldukça zor olmasıdır. Bu probleminden kurtulmak için ince agrega hacminin, toplam agrega hacminin en az %50'si olması gerekmektedir (Chandra and Bertsson 2003; Aitcan 1998; Neville 1988; Short and Kinniburg 1978). Hafif agregalı betonların işlenebilir karakteristikleri, normal agrega ile üretilen betonunkinden oldukça farklılık göstermektedir. Doğal agrega kullanılarak üretilen betonlarda, geniş bir su miktarı aralığında çok geniş bir işlenebilirlik aralığı elde edilirken, hafif agregada aynı su miktarı kullanıldığında işlenebilirlik çok düşük olabilmektedir. Eğer hafif betonun işlenebilirliği çok düşükse, betonu kompaksiyon veya şişleme ile yerleştirmek mümkün olmaz. Vibratör kullanıldığında ise hafif olan iri agregalar yüzerek yüzeye çıkar ve betonda segregasyonun oluşumuna neden olur (Short and Kinniburgh 1978). Karışımdaki su miktarı çok yüksek ise beton döküm esnasında segregasyon oluşur. Bunun yanı sıra; betonun yerleştirilmesi sırasında, katı iri maddenin tabana çökmesi ve suyun betonu terk ederek ince malzemeyle birlikte dışarı çıkması sonucu, betonda bir çökme oluşur (Chandra and Bertsson 2003). Hafif betonların işlenebilirliğini ölçmede en uygun test yöntemi kompaksiyon faktör test yöntemidir. Kompaksiyon faktör değeri 0.8 ile 0.9 olan bir hafif agregalı beton oldukça iyi bir işlenirliğe sahiptir (Short and Kinniburgh 1978). Bu betonların işlenirliğini ölçmede

kullanılan diğere bir test ise VB testidir. İşlenebilir bir hafif agregalı betonun VB değeri 15 saniyeden daha az olmalıdır (Short and Kinniburgh 1978; Chandra and Bertsson 2003).

Agrega, beton yapımında kullanılan, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın curufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemelerdir (Özışık 1998). Agreganın beton yapımında ekonomik ve teknik yönden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Agreganın maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan, agrega betonda kullanılan ve oldukça ucuz olan bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir. Betonda agrega kullanılması, sertleşen betonun hacim değişikliğini önlemekte veya azaltmakta, çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığını arttırmakta ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonda gerekli dayanımın sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Beton hacminin %75 ile %80'nini agrega bileşeni meydana getirdiği için, üretilecek betonun sahip olması istenilen özelliğine bağlı olarak, agrega seçiminde titizlik gösterilmesi gerekmektedir. Agreganın, gereken dayanıma sahip olması ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziki ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Betonda agrega kullanılmasının sağladığı teknik özelliklerin başında; sertleşen betonun "hacim değişikliği" önlenmesi veya azaltılması, çevre etkilerine karşı "dayanıklılığını" artırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklere karşı gerekli "dayanımı" sağlayabilmesi gelir. İçerisinde agrega bulunmayan bir sisteme göre çok daha az hacim değişikliği (büzülme) gösterir. Yani, çimento hamurunun zamanla kurumması nedeniyle yapacağı büzülme ve meydana gelebilecek çatlamlar agrega tarafından belirli bir ölçüde engellenmiş veya sınırlandırılmış olur (Erdoğan 1995).

Çimentonun hammaddesi kil ve kireçtaşıdır. Bu malzemelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle çoğunluğu kalsiyum silikat ve alüminattan oluşan klinker oluşmaktadır. Bu madde ince öğütülmesiyle bağlayıcılık kazanır. Suyun çimentoya teması ile iki reaksiyon oluşur (Hidroliz ve hidratasyon) ve bu reaksiyonlar sonucunda yeni mineraller oluşur. Bunlardan bazıları bağlayıcılık özelliğine sahiptir. Çimentonun

hidratasyonu sonucunda oluşan serbest kireç, beton içerisindeki donatının korozyonunu artıracak alkalilik oluşturur (Short and Kinniburgh 1978). Çimento bazik yapıda olduğu için asitler bunların yapılarını bozar. Çimento içerisinde aside en dayanıksız mineral tri kalsiyum alüminattır. İçerinde düşük miktarda tri kalsiyum alüminat içeren çimentolar, asit dayanımlı çimento ismini almaktadır. Bütün betonlar çimento ürünü olduğu için, hafif betonların da dayanım kazanmaları, kuruma rötreleri ve durabilitelerinin çimentonun özelliğine bağlı olması doğaldır.

Betonlar çok yüksek basınç ve çok düşük çekme mukavemetine sahip olduklarından, yapılarda taşıyıcı olarak tek başlarına kullanılmazlar. Bunlar yapılarda ancak betonarme gibi kompozit malzeme olarak kullanılabilirler. Bu açıdan bakıldığında betonun çekme dayanımı pek fazla önem arz etmemektedir. Fakat kesitlerde meydana gelen kılcal çekme çatlaklarının, kesitlerin taşıma kapasitelerinde büyük düşmelere ve donatılarda korozyona sebep olduğu gerçeği göz önüne alındığında, betonun çekme dayanımının da en az basınç dayanımı kadar önem arz etmektedir (Ersoy ve Atımtay 1978). Bundan dolayı betonun çekme dayanımının belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Normal betonların çekme dayanımları basınç mukavemetlerinin yaklaşık %10'u kadardır (Neville 1994; Aitcin 1998). Aynı basınç dayanımına sahip hafif betonların çekme dayanımları, normal betonların çekme dayanımlarının 1/2 si ile 2/3 arasında değişmektedir (Neville 1994; Aitcin 1998). Bunun sebebi ise; hafif agregaların içerisindeki boşlukların büyüklüğünden dolayı daha düşük kesme kuvvetlerinde kırılmalarıdır. Eğilme testinin dışında betonların çekme dayanımları, direkt veya en direkt metotlar ile belirlenebilir. Direkt çekme gerilme metodunun uygulanmasının zorluğundan, genelde endirekt metotlar kullanılmaktadır (Neville 1994). Çekme dayanımını belirlemek için çeşitli endirekt metotlar geliştirilmiştir. Bu testlerde, betonun içerisinde betonun kırılmasına sebep olacak çekme gerilmesini oluşturacak basınç kuvveti uygulanır. En çok kullanılan en direkt test yarmada çekme dayanım testidir. Bu testte silindir numune eksenini boyunca çizgisel yük uygulanarak betonun kırılmasına sebep olan yük bulunur. Bu test aynı zamanda küp numuneler üzerinde uygulanabilir (Gambhir 1986).

Betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betona özel nitelikler kazandırmak amacıyla kullanılan ince malzemeler mineral katkı olarak adlandırılırlar. Bu katkıların betona ek dayanım kazandırma özelliği olduğu kadar, betonun durabilite (kalıcılık) anlamında da performansını arttırlar (Neville 1994). Tüm dünyada ve ülkemizde mineral katkılar zaman içinde her türlü fiziksel, kimyasal ve elektro-kimyasal dış etkilere karşı uzun ömürlü betonarme yapıların üretiminde portland çimentosu veya portland çimentosu klinkeri ile birlikte kullanılmaktadır.

Bu çalışmada; Erzincan Mollaköy ham perlit agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde araştırmalar yapılacaktır. Bunun için;

- Farklı Granülometri; D_{max} ve ince- iri agregası oranları değiştirilerek farklı agregası granülometreleri oluşturularak en yüksek mukavemeti veren granülometri belirlenecektir.
- Agreganın çekme dayanımını artırmak için ideal karışımlara çelik lifler eklenecektir.
- Farklı Dojaz; Bağlayıcı miktarı 400, 450, 500, 550, 600 ve 650 kg/m^3 arasında değişen karışımlar yapılacak ve yüksek mukavemetli hafif betonun elde edilebildiği alt limit ile dayanımda artış sağlamayan üst limit belirlenecektir.
- Bağlayıcı olarak yüksek dayanımlı çimento (CEM1) ve yüksek dayanımlı çimento (CEM1) ile silis dumanı karışımı bağlayıcı olarak kullanılacaktır.
- Farklı w/c oranlarında (0,3- 0,4 ve 0,5) karışımlar yapılarak w/c oranının üretilecek betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri belirlenecektir. Burada w/c oranını azaltmak için akışkanlaştırıcı kullanılacaktır.
- Farklı Kür Yöntemleri; $20C^0$ ortam sıcaklığında %50 ve %95 bağıl nem oranı ile $20C^0$ su içerisinde bakıma tabi tutularak, farklı kürün etkileri belirlenecektir.

Elde edeceğimiz yüksek dayanımlı hafif betonların; basınç ve çekme dayanımlarını, poisson oranlarını, elastiklik modüllerini, kuruma rötrelerini, ısı iletkenliklerini ve gerilme deformasyon eğrilerini belirleyerek, sonuçları, kontrol betonu ve diğer hafif agregalar üzerinde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Faust and Konik (1997) farklı hafif agrega, granülometri ve dozaj kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde araştırma yapmışlardır. Sonuç olarak; birim hacim ağırlığı 1000-2000 kg/m³ ve basınç dayanımı 15- 100 MPa arasında değişen hafif beton üretiminin mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Aynı zamanda; yüksek dayanımlı hafif betonlarda kırılmanın iri agregaların kesilmesiyle oluştuğunu ve bu nedenden kırılmanın normal betonlara göre daha gevrek olduğunu söylemektedirler.

Y. Bai *et al* (2004) laytag, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında Çimento+ Kum+Çakıl , Çimento+ Laytag+ Yüksek fırın cürufu ve %70 çimento+ %30 uçucu kül+ Laytag karışımları kullanılmıştır. Sonuç olarak; birim hacim ağırlığı 1560-1960 kg/m³ ve basınç dayanımı 20-40 MPa arasında değişen hafif beton üretiminin mümkün olduğunu, çimentonun bir kısmının yerine uçucu külün kullanılmasının basınç dayanımı ve su geçirgenliğinde düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir. Cüruf ve laytag kullanılması betonun porozitesinde artmaya, uçucu külün kullanılması ise porozitede bir azalmaya neden olduğunu belirtmektedirler. Çekme dayanımı bakımından uçucu kül, cüruf ve laytag orta sınıf betonlarda olumlu etki oluştururken, yüksek dayanımlı betonlarda tam tersi bir etki oluşturduğunu söylemektedirler.

Gao *et al* (1997) liflerin yüksek dayanımlı hafif betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, yüksek dayanımlı hafif betonlar içerisinde en zayıf bileşenin, agregalar ve çimento matrisi arasında gerilme transferini yapan çimento matrisi yerine iri agregaların olduğunu gözlemlemişlerdir. Kullanılan liflerin, iri agrega içerisinde oluşan çatlakların çimento matrisine geçişini engellediğini ve çimento matrisindeki çatlakların daha büyük basınç kuvveti altında oluştuğunu belirttikler. Lifin betonun basınç dayanımında önemli bir artışa sebep olmadığı, fakat çekme dayanımında %90 varan bir artışa neden olduğunu belirlemişlerdir.

Yanai *et al* (1999) yüksek dayanım ve durabiliteye sahip kendiliğinden yerleşebilen yüksek dayanımlı hafif beton üretimi üzerinde çalışma yapmışlardır. Betonun özelliklerini etkileyen en önemli parametrelerin w/c oranı, matrisin birim hacim ağırlığı, iri agreganın birim hacim ağırlığı ile kalitesi olduğunu söylemektedirler. Bu değişkenler ayarlanarak kendiliğinden yerleşebilen, yüksek donma çözülme ve segregasyon direncine sahip, basınç dayanımı 60MPa olan beton üretiminin mümkün olduğunu belirtmektedirler.

Kayali *et al* (2003) fiber ve çelik liflerin yüksek dayanımlı hafif betonların özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada agrega olarak sinterlenmiş uçucu kül ahfif agregası kullanmışlardır. Bazı karışımlarda ise ince malzemenin bir kısmının yerine uçucu kül kullanmışlardır. Beton içerisine beton hacminin %0,56 kadar bir polypropylene fiber lifin katılması, betonun dolaylı çekme dayanımında %90 ve kopma modülünde %20 ye varan bir artış sağlamış ve betonun diğer özellikleri üzerinde önemli bir etki yapmadığını, beton içerisine beton hacminin %1,7'si kadar bir çelik lifin katılması, betonun dolaylı çekme dayanımında %118 ve kopma modülünde %80'ne varan bir artışın sağladığını belirlemişlerdir. Çelik lifin katılması, elastiklik modülünde küçük bir artışa neden olduğu ve gerilme-deformasyon eğrisini daha lineer yaptığını göstermişlerdir. Yaptıkları çalışmada maksimum dayanımı 68 MPa, dolaylı çekme gerilmesini 6,6 MPa, kopma modülünü 5,3 MPa ve Elastiklik modülünü 25 MPa olarak belirlemişlerdir. Lifin kullanımı, yüksek dayanımlı hafif betonların ani ve gevrek kırılmalarını önlediği ve yük altında daha sünek davrandıklarını belirtmektedirler.

Saad (2005) yapmış olduğu bir çalışmada, beton içerisinde ultrasonik ses dalgasının geçiş hızının agrega granülometri ve çeşidine, w/c oranına ve kür zamanına bağlı olarak nasıl değiştiğini deneysel olarak belirlemeye çalışmıştır. Çalışmada ultrasonik dijital göstergeli (PUNDİT) 500 V ve 54 KHz dalga üreten test aletini kullanmış ve w/c oranının geçiş hızı üzerinde etkili olan en önemli parametrelerden biri olduğunu söylemiştir. Bunun nedenini; yüksek w/c oranında çimento matrisinde çok fazla hava boşluğunun bulunması şeklinde açıklamaktadır. Agrega tane boyutunun büyümesi ile hızın arttığı, küçülmesiyle ise azaldığını belirtmektedir. Bunun nedenini ise; tane

boyutunun büyümesiyle çimento matrisinin azaldığı, küçülmesiyle ise arttığı ve matrisin agregaya göre daha az yoğun olması ve çimento hamurunun agregaya kıyasla daha az ses transfer kapasitesine sahip olması olarak açıklamaktadır. Saad (2005), basınç dayanımı 35 MPa olan bir normal ağırlıklı betonda geçiş hızı 0,4 w/c oranında 5-5,1 km/s, 0,5 w/c oranında 4,7-5 km/s ve 0,55 w/c oranında 4,5-4,9 km/s arasında değiştiğini belirlemiştir. Bu değerlerde görüldüğü gibi w/c oranının azalması ile hız artmakta, artmasıyla azalmaktadır. Kür zamanının artmasıyla ses geçiş hızının arttığını belirtmektedir. Bunun nedenini ise; zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu beton içerisindeki boşlukların azalması olarak tanımlamaktadır.

Scheer and Curbach (2002) çok eksenli ve tek eksenli yük altında normal ve hafif betonların davranışlarını incelemiştir. Normal ağırlıklı yüksek dayanımlı betonların, çok eksenli ve tek eksenli yük altındaki kırılma şekli ve davranışlarının çok benzerlik gösterdiğini gözlemlemişler. Yüksek dayanımlı hafif betonlarda maksimum birim deformasyonda ve basınç dayanımında önemli bir artışın oluştuğunu belirtmektedirler.

Friedemann *et al* (1999) yüksek dayanımlı hafif betonların durabilitesi üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada farklı kürün ve mineral katkıların etkisini araştırmışlardır. En yüksek dayanım ve donma-çözülme dayanıklılığının silis katkılı yüksek dayanımlı hafif betonlarda oluştuğunu gözlemlemişler. Numuneler üzerinde yapılan ultrases ölçümlerinin donma çözülme öncesi ve sonrası aynı olmasının, betonun mineralik iç yapısında herhangi bir hasarın olmadığına bir işaret olarak kabul etmişlerdir. Yüksek dayanımlı betonlarda dozajın yüksekliği, beton içerisindeki sıcaklığın 70C⁰ kadar yükselmesine neden olduğunu belirtmektedirler. Bu yüksek sıcaklığın etkisiyle beton içerisinde mikro çatlakların oluştuğunu belirtmektedirler. Bu olumsuz durumun kaldırılması için farklı kür yöntemlerinin uygulanmasını önermektedirler.

Chen and Liu (2004) yüksek dayanımlı hafif betonlarda liflerin etkilerini araştırmışlardır. Liflerin taze betonun işlenebilirliğini artırdığını, kıvam ve segregasyonu azalttığı, bu etkilerin lifin cinsine ve miktarına göre değiştiğini

belirtmektedirler. Sertleşmiş betonda ise dayanım ve sünekliği artırdığını söylemektedirler.

Chia ve Zhang (2002) yüksek dayanımlı hafif betonların klor ve su geçirgenliği üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Çimento matrisi ile hafif agreganın elastiklik modüllerinin bir birine çok yakın olmasının, çimento matrisi içerisinde mikro çatlakların oluşma ihtimalini azalttığı için bu betonların geçirgenliklerinin normal betonlardan daha düşük olduğunu belirtmektedirler. Silis dumanının kullanılmasının su ve klor iyonlarının geçişini azalttığını belirtmektedirler.

Kılıç *et al* (2003) scoria agregası ve mineral katkı kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Hava kurusu birim hacim ağırlıkları 1800 ile 1850 kg/m³ arasında değişen ve uçucu kül katkılı betonların 28 günlük basınç mukavemeti 30 MPa, silis dumanı katkılı betonların basınç mukavemeti 40 MPa olarak bulunmuştur. Eğilmede çekme dayanımları 6-8 MPa arasında değiştiğini belirtmektedirler.

Balendran *et al* (2002) liflerin normal ve hafif betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu araştırma için basınç dayanımı 90 ile 115 MPa arasında değişen karışımlar hazırlamışlar ve bazı karışımlara beton hacminin %1'i kadar lif katmışlardır. Liflerin basınç dayanımı üzerinde pek fazla etki yapmadığını, yarmada çekme, eğilmede çekme ve enerji tokluğunda önemli bir artışa neden olduğunu görmüşlerdir. Bu artışın hafif betonlarda normal betonlara göre çok daha fazla olduğunu söylemektedirler. Bunun nedeni; hafif beton üretiminde kullanılan agregaların, boşluklu yapılarından dolayı, kesme dayanımlarının normal agregalara göre küçük olmasıdır. Kullanılan liflerin gelen kesme kuvvetlerinin büyük bir kısmını üzerlerine aldıklarından, agregaya lifsiz duruma göre daha az kesme kuvveti etkimektedir. Burada lifin kullanımının amacı betonda gevrekliği azaltıp, sünekliği artırmaktır. Lifin etkisi, betonun hafif ya da normal oluşuna, dayanımına, beton içerisindeki lif oranına ve agrega çeşidi ve granülometrisine bağlı olarak değişmektedir. Lif oranı ve beton basınç dayanımının artmasıyla betonun yarma, eğilme ve çekme dayanımlarının arttığını

söylemektedirler. Bu artışların hafif agregalı betonlarda daha yüksek olduğunu belirtmektedirler.

Weber and Reinhardt (1997) yüksek dayanımlı hafif betonlarda autogenous kürün etkisini araştırmışlardır. Özellikle betonun hidrasyonu sırasında su eksikliğinin yaşandığı ve dış ortamdaki suyun çimento matrisindeki yoğunluktan dolayı beton içerisine ulaşamayıp hidrasyonu tamamlamadığı belirtilmektedir. Sonuç olarak; autogenous kürün mekanik özellikleri ve durabilitesi üzerinde diğer kür yöntemlerine göre daha fazla olumlu katkılarının olduğunu belirtmektedirler. Karışımda suya doymuş hafif agreganın kullanılması, farklı kür yöntemlerinin üretilen betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini azalttığını belirtmektedirler.

Kayali and Zhu (2004) klor maruz bir ortamda, uçucu kül katkılı yüksek dayanımlı hafif beton kullanılarak üretilmiş betonarme eleman içerisindeki donatıda oluşacak korozyonu araştırmışlardır. Deney elemanını 15 ay süre ile %2'lik klor iyonu çözeltisinde bekletmişlerdir. Yüksek dayanımlı hafif betonların klor difüzyon direncinin diğer betonlarından daha yüksek olduğunu, uçucu külün kullanılmasının bu direnci daha da artırdığını belirtmektedirler.

Balanca *et al* (2000) termik santrallerinde toz kömürün yanması sonucu oluşan atık taneli (Conespheres) malzemeyi agrega olarak kullanıp ürettikleri hafif betonun özellikleri üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Maksimum boyutu 5 mm ve minimum boyutu 0,2 mm olan bu agreganın kimyasal yapısının uçucu kül ile aynı olduğunu belirtmektedirler. Bu agregaların taneli birim hacim ağırlıkları 990 ile 1010 kg/m³ arasında değişirken, toz halindeki birim hacim ağırlığı 2590 ile 2616 kg/m³ arasında değiştiğini belirtmektedirler. Buradan agreganın çok boşluklu bir agrega olduğu görülmektedir. W/C oranı 0,3, çimento miktarı da 360 ile 717 kg/m³ arasında farklı dozajlarda beton üretmişlerdir. Bu betonların bir kısmı 20±1C⁰ ve %95 nem oranında, bir kısmı da deney gününe kadar 23±1C⁰ deki suda bakıma tabi tutulmuştur. Kür zamanının artmasıyla dayanımın arttığı, maksimum dayanımın 33 MPa olduğunu belirtmektedirler. Elde edilen betonların toplam porozitelerinin %44,5 ile %48,5

arasında değiştiğini ve açık porozitenin ise %12 olduğunu belirtmektedirler. %25'lik kısmın ise imento matrisi ile dolduğunu söylemektedirler.

Hwang and Hung (2005) kendiliğinden yerleşen hafif betonların performansları ve durabiliteleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Beton içerisinde boşluk ve çatlak oluşma ihtimali büyük oranda imento ve su miktarı ile kre bağlıdır. Normal betonlarda istenilen durabilitayı sağlamanın yolu imento miktarını azaltmak ve su miktarını sınırlandırmaktır. Hafif betonda yüksek dayanımın elde edilmesinin şartlarından biri imento miktarını çoğaltmaktır. Bu durum normal betonların durabilite şartıyla çelişmektedir. Autogenous rötrenin oluşumunu engellemek için önerilen minimum w/c oranı ise 0,42 dir. Sonuç olarak bu tür betonlarda durabilitayı artırmak için mutlaka mineral katkının kullanılmasının zorunlu olduğudur.

Durmuş ve Hüsem (1995) Doğu Karadeniz bölgesi hafif agregalarından birini kullanarak üretilen hafif betonun normal betonla kıyaslaması üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak bu agregaya ile elde edilen hafif betonun öngerilmeli ve betonarme elamanların üretiminde kullanılabilirliğini ve bunların normal betonlara göre bazı avantajlarının olduğu belirtilmektedirler.

Dhir *et al* (1984) aglite agregası kullanarak taşıyıcı hafif beton üretimi üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın amaçlarından biri su azaltıcı katkı kullanarak istenilen kohezivliğe ve işlenebilirliğe sahip 28 günlük basınç dayanımı 50 MPa olan bir beton üretmek, diğeri ise imento miktarı 250 ile 600 Kg/m³ arasında değişen betonların mekanik özelliklerini belirlemektir. Aglite betonlarının normal betonlara göre daha gevrek olduğu ve kuruma rötrelerinin daha düşük olduğunu belirtmektedirler. Havada kür edilen betonların basınç dayanımları 29 ile 53 MPa, suda kr edilen betonların basınç dayanımları 43 ile 60 MPa arasında değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Smadi and Migdady (1990) rdnn kuzey doğusundaki doğal tf agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi için çalışmalar yapmışlardır. Yapılan alışma

sonucunda, betonarme ve öngerilmeli betonarme elamanların üretiminde kullanılabilecek 90 günlük basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek dayanımlı hafif betonun üretiminin mümkün olduğunu söylemektedirler.

Faust and König (1997) yüksek dayanımlı hafif betonların gerilme-birim deformasyon grafiklerini incelemiştir. Çalışmasında aynı dayanıma sahip hafif ve normal betonların gerilme-deformasyon eğrilerini karşılaştırmıştır. Sonuç olarak; hafif betonların kırılma bölgesi ötesi daha az sünek, düşük elastisite modülüne sahip ve gerilme deformasyon eğrisinde lineer bir düşüşün olduğunu, bu olayların dayanımın artmasıyla daha belirginleştiğini söylemektedir.

Kayali (2005) uçucu külün sinterleştirilmesiyle elde edilen agregayı kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi üzerinde çalışma yapmıştır. Yapmış olduğu çalışma sonrası bu agregaya ile elde edilen betonun; hafif, düşük poroziteli, yüksek dayanım ve durabiliteye sahip olduğunu söylemektedir. Bu agregaya ile elde edilen hafif betonun diğer hafif betonlardan daha iyi olduğunu, bunun da nedenini agreganın kalitesine bağlamaktadır. 370 kg çimento ile 67 MPa basınç mukavemetine sahip hafif beton üretiminin mümkün olduğunu söylemektedir.

Tomosawa *et al* (1990) yüksek dayanımlı betonlarda elastiklik modülü ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmıştır. Sonuç olarak, betonların elastiklik modüllerinin basınç dayanımının bir faktörü olduğunu belirtmektedir. Betonun bu özelliğinde agregaya ve bağlayıcının özelliğine göre değiştiğini belirtmektedir.

Wilson and Malhotra (1998) Kanada hafif agregası kullanılarak 7 seride 25 farklı karışım hazırlamışlardır. Karışımında bağlayıcı olarak 300- 635 kg/m³ arasında değişen miktarda çimento, çimento+ silis dumanı ve çimento+ uçucu kül karışımı kullanmışlardır. Aynı zamanda bütün karışımlarda hava sürükleyici ve akışkanlaştırıcı kullanılmışlardır. Beton basınç dayanımı ve donma çözülme direncini belirlemek için küp ve silindir numuneler dökülmüştür. Sonuç olarak; birim hacim ağırlığı 2000 kg/m³

civarında olan yüksek dayanımlı hafif betonun üretimi için, süper akışkanlaştırıcı kullanımının zorunlu olduğu belirtmektedirler. Yapmış oldukları bu çalışmada, en yüksek basınç dayanımı olan 66,5 MPa, 638 kg/m³ bağlayıcı miktarıyla 365 günde sonunda ulaşabilmişlerdir. Aynı zamanda, üretilen bu yüksek dayanımlı hafif betonların, yüksek bir donma çözülme direncine sahip olduğunu söylemektedirler.

Yan and Ling (2003) görünen maksimum dayanımı 7,8 MPa ve su emme oranı %4,2 olan sinterleşmiş uçucu külden üretilen agrega kullanarak 60 MPa basınç dayanımına sahip yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Bu betonun çökme değerinin 200 mm nin üzerinde ve 60 dakikada çökme kaybı 20 mm civarında olduğunu belirlemişlerdir. Aynı zamanda üretilen bu betonun, modern bir betonun sahip olması gereken bütün özelliklere sahip olduğunu söylemektedirler.

Bentur *et al* (2001) yüksek dayanımlı hafif betonlarda autogenous rötreyi önlemek için karışımda ıslak hafif agrega kullanmışlardır. Sonuç olarak; bu tür kür yöntemi ile üretilen betonların donma çözülme ve klor difüzyon dirençlerinin daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Al-Ahmoudi *et al* (2007) süper akışkanlaştırıcıların, çimento ve çimento + silis dumanı katkılı betonlarda oluşacak plastik rötre üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak; şiddetli bozucu ortamlara maruz kalacak betonlarda durabilite probleminin çözümü için, akışkanlaştırıcı kullanımının zorunlu olduğunu söylemektedirler. Aynı zamanda; yüksek dayanımlı hafif betonlarda, artan su ihtiyacını azaltmak için, süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasını önermektedirler. Akışkanlaştırıcının kullanılmasının amacı; su miktarını ve su/çimento oranını azaltmak, ayrıca işlenebilirliği artırmak olduğunu söylemektedirler. Bunların yanı sıra; süper akışkanlaştırıcı tiplerinin plastik rötre gerilmesine etkisi olduğu ve süper akışkanlaştırıcının silis dumanlı çimentolu betonun, plastik rötre çatlak oluşum direncini artırdığını belirtmektedirler.

Weber and Reinhardt (1997) yüksek dayanımlı betonlarda autogenous kürün etkisini araştırmışlardır. Yüksek dayanımlı hafif betonların mekanik özellikleri üzerinde en etkili faktörlerden birinin de betonun kürü olduğunu belirtmektedirler. Geleneksel yöntemle yapılan kürün, özellikle silis dumanı kullanılmış ve düşük su/çimento oranına sahip betonlarda, çok yoğun matrisden dolayı yetersiz kalabileceğini söylemişlerdir. Hidratasyonun hızlı, hidrate çimento hamurunun çok yoğun olmasından, suyun dışardan beton içerisine ulaşmasının mümkün olmayacağını ve böylece çimentonun hidratasyonu tamamlayamayacağını söylemektedirler. Bu olumsuz etkileri önlemek için, agreganın %25 yerine suya doygun hafif agrega kullanılarak beton içerisinde bir nem kaynağının oluşturulmasını önermektedirler. Yapılan çalışmada bu yöntemin geleneksel kür yönteme göre daha verimli olduğunu belirlemişlerdir.

Moon and Shin (2005) mineral katkının, betonların donma-çözülme ve donatı korozyonuna etkilerini araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda, mineral katkıların donma ve çözülme dayanıklılığına çok az bir katkısının olduğu görülmüştür. Beton içerisinde hava boşluğunun artırılmasının, donma çözülme dayanıklılığının daha fazla artmasına neden olduğunu belirtmektedirler.

Al-Khaiat and Haque (1998) iri ve ince laytag hafif agregası kullanarak taze birim ağırlığı 1800 kg/m^3 ve 28 günlük basınç dayanımı 50 MPa olan yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri betonun oldukça koheziv ve işlenebilir bir yapıya sahip ve betonların ortalama çökme değerlerinin 95 mm olduğunu belirtmektedirler. Agregalar karışımdan on dakika önce suya daldırılarak bir ön ıslatmaya tabi tutmalarına rağmen, karışımdan on dakika sonra çökme kaybının yaklaşık 25 mm olduğunu belirtmektedirler. Bunun nedenini agreganın aşırı su emmesine bağlamaktadırlar. Ürettikleri bu betonları kuru - sıcak ve nemli-sıcak hava ile tuzlu su ortamında küre tabi tutarak, betonun uzun süreli basınç dayanımı ve durabilitesinde oluşan değişimi incelemişlerdir. İlk zamanlardaki sonuçlar, farklı kür yönteminin basınç dayanımı üzerinde bir etkisinin olmadığını, bunun nedenide; ön ıslatma ve karışım sırasında iri agregalar tarafından emilen suların, ortama tekrar dönerek kür işlemini yapmasına

bağlamaktadırlar. Uzun zamanda ise durabilite üzerinde farklı kür yöntemlerinin oldukça etkisi olduğunu belirlemişlerdir.

Mladenovic *et al* (2004) hafif beton üretiminde yaygın olarak kullanılan genleştirilmiş kil, vermiculite, genleştirilmiş cam ve perlit agregası üzerinde alkali-silis reaktivitesi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Kil ve vermiculit agregasında herhangi bir reaktiviteye rastlanmadığını belirtmektedirler. Perlit ve camsı agregalarda %0,12 lik bir genleşme ve sem görüntülerinde küçük bir oluşum görmüşler. Bu oluşumlar agregada boşlukları içerisinde kaldığı ve genişlenmesinde, ASTM C 1260'da verilen sınır değeri olan %0,2 den daha düşük olduğundan, bu oluşumun uzun vadede bir durabilite problemi oluşturmayacağını söylemektedirler.

Gündüz and Uğur (2005) pomza agregası ile herhangi bir mineral ve akışkanlaştırıcı katkı kullanmadan taşıyıcı hafif beton üretilebilirliği üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bunun için farklı agregada ve çimento oranlarında karışımlar hazırlamışlar. Karışımların çökme değerlerinin 35 ile 45 mm arasında değiştiğini, aynı dayanıma sahip normal ağırlıklı betonlardan %30 ile %40 arasında daha hafif olduğunu belirtmektedirler. 450 kg/m³ çimento kullanarak ürettikleri betonun kuru birim ağırlığı 1270 kg/m³, 28 günlük basınç dayanımı 28 MPa, statik elastisite modülünü 11,129 MPa ve çekme dayanımını 6,38 MPa olarak belirlemişlerdir. Çimento miktarının artmasıyla betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinde artmaların olduğunu belirtmektedirler. Bu betonların ısı iletim katsayısının 0,455 ile 0,345 W/mK arasında değiştiğini, bu değere göre normal ağırlıklı betonlardan % 50 daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğunu belirtmektedirler.

Wang and Tsai (2006) silti hidrasyon ve yüksek sıcaklığın etkisiyle sinterleştirerek değişik birim ağırlıkta hafif agregada üretmişler ve bu agregada dredged silt agregası ismini vermişlerdir. Farklı w/c ve birim ağırlıkta dredged silt agregası kullanarak hafif beton üretmişler ve bu betonların bazı özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak; işlenebilirlik için minimum 250 ±20 mm bir çökme değerinin gerektiğini belirtmektedirler. Sertleşmiş betonun özelliklerinden olan; basınç dayanımı, ultrases değerleri ve ısı iletim katsayısı λ 'nın w/c oranının artmasıyla azaldığı, agregada tane

birim ağırlığının artmasıyla bu değerlerin arttığını belirlemişlerdir. Kür şeklinin basınç dayanımı üzerinde pek fazla bir etkisinin olmadığını belirtmektedirler. Ultrasonik ses dalgalarının beton içerisindeki geçiş hızı; agrega birim ağırlığı, dayanımı ve w/c oranına bağlı olarak değişmiştir. W/C oranının artmasıyla geçiş hızı azalmış, azalmasıyla artmıştır. Betonların λ değeri; agrega birim ağırlığının azalmasıyla azalmış ve artmasıyla artmıştır. W/C oranının, ısı iletim katsayısı λ üzerinde bir etkisinin olmadığını belirtmektedirler. Bunun sebebini; bütün w/c oranında agrega miktarının aynı olmasını göstermektedirler. Üretilen betonların birim ağırlığını 1637 ile 2007 kg/m³, λ değerini 0,58115 ile 0,78841 w/mk, basınç dayanımını 20 ile 40 MPa arasında değiştirdiğini ve beton içerisinde ultrasonik ses dalgalarının geçiş hızını 3900 m/s olarak belirlemişlerdir. Normal betonların λ değeri 1,1262 ile 1,7435 w/mk arasında değiştirdiğini ve dolayısıyla ürettikleri betonların normal betonlara göre %50 daha düşük bir ısı iletim değerine sahip olduğunu belirtmektedirler.

Kim *et al* (2003) betonun ısı iletim katsayısı λ 'dayı etkileyen faktörleri belirlemek için, QTM-D3 ısı iletim cihazı ile deneysel bir araştırma yapmışlardır. Deneysel çalışma sonuçlarına göre; w/c oranı, katkı çeşidi, çimento matrisinin yapısı ve kalınlığı ve nem gibi faktörlerin ısı iletim katsayısını etkilediğini belirlemişlerdir.

Khan (2002) yapmış olduğu çalışmada; çimento hamuru, beton ve betonun ana bileşeni olan agregaların termal iletkenlikleri üzerinde bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında dört farklı kayacın ısı iletim katsayısı λ 'yı belirlemiş ve daha sonra bu kayaları parçalayarak beton üretiminde kullanacağı iri agregayı elde etmiştir. Çimento hamuru ve betonun çeşitli nem oranındaki ve kuru durumdaki λ değerlerini belirlemiştir. Sonuçta; betonun ısı iletim katsayısı λ üzerinde en etkili faktörün agrega olduğu ve nemin λ değerini %48 kadar artırdığını belirlemiştir. λ değeri 8,5 w/mk olan bir quartz agregası ile üretilen betonların λ değerinin 2,29 ile 2,77 w/mk arasında değişebileceğini söylemektedir.

Erdem *et al* (2007) ham perlitin puzolanaik aktivitesini belirlemek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında; çimentonun %20 si ile %30 yerine perlit katarak elde ettikleri karışımların, blain değerlerinin 320 m² /kg ile 370 m² /kg arasında değiştirdiğini

söylemektedirler. Karışımı oluşturmak için perlit ile çimento klinkeri birlikte öğütülmüş, bir kısmında da ayrı ayrı öğütülüp karıştırılarak karışımlar elde edilmiştir. Elde edilen bağlayıcıların performansını belirlemek için tane dağılımını, normal kıvam suyunu, priz sürelerini ve dayanım değerlerini belirlemek için deneyler yapmışlardır. Sonuç olarak; perlitin puzolanik bir aktiviteye sahip olduğunu ve çimentonun bir kısmının yerine bağlayıcı olarak katılmasında bir sakıncanın olmadığını belirtmektedirler. Ayrıca perlitin kimyasal bileşenlerinden, perlitin doğal bir silis olduğu ve XRD analizinde amorf bir yapıya sahip olduğunu ve ASTM C 618'e göre puzolanik bir malzeme olduğunu belirtmektedirler.

Topçu (1997) yapmış olduğu çalışmada; w/c oranını 0,4 olarak sabit tutup, çimento/volkanik cüruf oranı 0,15- 0,30- 0,45 ve 0,60 olacak şekilde ve agreganın %50'sini iri agrega olarak volkanik cüruf, diğer %50'sini ince agrega olarak kum, kullanarak üretmiş olduğu yarı hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Sonuç olarak; betonun en önemli özelliklerinden biri olan işlenebilirliğin, cüruf oranı ve tane boyutunun artmasıyla azaldığı ve özellikle 0,45 çimento/cüruf oranından sonra çökme değerinde ani bir düşmenin olduğu ve bu değerden sonra işlenebilirliğin oldukça zorlaştığını belirtmektedir. Aynı zamanda; üretilen betonun bütün özelliklerinde olduğu gibi, ultrasonik ses geçiş hızı ve schmidt çekici değerlerinde'de volkanik cürufun katılmasıyla bir azalmanın oluştuğunu söylemektedir. Bunun nedenini, volkanik cürufun elastiklik modülünün düşük olması ve agrega içerisinde boşlukların bulunması olarak açıklamaktadır. Volkanik cürufun katılmasıyla betonun birim ağırlığı 2400 kg/m^3 'den 1800 kg/m^3 'e kadar düşerken basınç dayanımında 54,5 MPa'dan 6,2Mpa kadar düştüğünü belirtmektedir. Betonların eğilmede çekme dayanımları 2,5 MPa civarında ve yarmada çekme dayanımlarının 2 MPa civarında değiştiğini belirtmektedirler.

Uysal *et al* (2004) yaptıkları çalışmada; çimento miktarı, çökme değeri ve karışımdaki pomza/ agrega oranının, betonun birim ağırlığı ve ısı iletkenliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada; bağlayıcı olarak 200, 250, 300, 400 ve 500 kg/m^3 çimento, agrega olarakta normal agrega ile normal agreganın %25, %50, %75 ve %100'nün yerine pomza agregası kullanılarak çökme değeri 3, 5 ve 7 cm olacak şekilde karışımlar

hazırlanmıştır. Sonuç olarak; karışımda pomza agregasının artmasıyla, betonun birim ağırlığı ve ısı iletkenliğinde sırasıyla %40 ile %46'lık bir azalmanın olduğu, çimento miktarının artmasının ısı iletkenliği ve birim ağırlıkta bir artışa neden olduğunu belirtmektedirler. Betonun çökme değerinin ise birim ağırlık ve ısı iletkenliği üzerindeki etkisinde belirli bir eğilimin oluşmadığını belirtmektedirler. Üretilen betonların birim ağırlıkları 2270 ile 1329 kg/m³ arasında değişirken, ısı iletim katsayısı λ değeri 0,75 ile 1,5 w/mk arasında değişmiştir.

Demirboğa *et al* (2007) yapmış oldukları çalışmada, yüksek miktarda mineral katkı kullanılarak üretilen betonların termo-mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Bu çalışmayı yapmak için; çimentonun bir kısmının yerine C sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül + yüksek fırın cürufu eklenerek betonlar üretmişlerdir. Daha sonra bu betonların ısı iletkenliği, basınç dayanımı, su emme ve birim ağırlıklarını belirlemişlerdir. Sonuç olarak; çimento içerisine bağlayıcı olarak katılan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül + yüksek fırın cüruf oranının artmasıyla ısı iletim katsayısının ve basınç dayanımının düştüğünü ve basınç dayanımındaki düşüşün kür zamanının artmasıyla azaldığını belirtmektedirler.

3. MATERYAL ve METOD

Birinci bölümde açıklandığı gibi bu çalışmanın amacı; ham perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin belirlenmesidir. Aynı zamanda, üretilen betonların bazı mekanik ve fiziksel özellikleri ile, mineralik ve diğer katkıları ile farklı kür koşulunun elde edilecek betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenecektir.

Bu doğrultuda farklı granülometri, dozaj ve w/c oranı kullanılarak betonlar üretilmiştir. Bu agrega ile yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliği anlaşıldıktan sonra, çalışma sonucunda üretilen katkılı ve katkısız yüksek dayanımlı hafif betonun birim hacim ağırlık, su emme ve ısı iletkenlik katsayısı gibi bazı fiziksel ve yarmada ve eğilmede çekme dayanımı, basınç mukavemeti, poisson ve elastiklik modülü gibi mekanik özellikleri, ASTM ve TSE gibi standartlar ile araştırmacılar tarafından önerilen bazı yöntemler kullanılarak belirlenmiştir.

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Çimento; kil ve kalkerin belli oranlarda karıştırılıp yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle elde edilen klinkerin öğütülmesi sonucu elde edilen ince toz halindeki bağlayıcıdır. Çimentonun özelliği ham maddenin özelliği, pişirilme sıcaklığı ve öğütülme inceliğine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle standartlara uygun çimento üretimi çok sıkı denetim ve kontrolü gerektirmektedir. Yapılan çalışmanın hassasiyeti dikkate alınarak çalışmada kullanılacak çimentonun, standartlara uygun olmasına önem verilmiştir. Araştırmada, çimento olarak Set Çimento Ankara Fabrikasında TS EN 197-1'e (96) uygun olarak üretilen, PÇ 42,5 R kullanılmıştır. Bu çimentonun seçilme nedeni; yapılan akademik çalışmaların çoğunda bu fabrika tarafından üretilen çimentonun tercih

edilmesidir. Bu çimentolara ait fiziksel, kimyasal, mekanik özellikler ve ilgili standart sınır değerleri Çizelge 3.1.1.1’de verilmiştir .

Çizelge 3.1.1.1. PÇ 42,5 R’nin kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri

Bileşenler (%)	PÇ 42,5 R	TS EN 197-1	
CaO	64,02	---	
SiO ₂	20,31	---	
Al ₂ O ₃	5,64	---	
Fe ₂ O ₃	3,27	---	
MgO	1,64	≤ 5,00	
SO ₃	2,86	≤ 4,00	
K ₂ O	0,80	---	
Na ₂ O	0,87	---	
Kızdırma kaybı	0,90	≤ 5,00	
Çözünmeyen kalıntı	0,31	≤ 5,00	
Anabileşenler			
C ₃ S	55,55	---	
C ₂ S	16,50	---	
C ₃ A	9,41	---	
C ₄ AF	9,95	---	
Serb. CaO	1,48	---	
Fiziksel ve Mekanik Özellikler			
Yoğunluk (g/cm ³)	3,11	---	
Özgül yüzey (cm ² /g)	3489	---	
200 µm elek üstü (%)	---	---	
90 µm elek üstü (%)	0,30	---	
40 µm elek üstü (%)	8,40	---	
Hacim genişmesi (mm)	2	≤ 10	
Priz (dakika)	Başlangıcı	145	≥ 60
	Sonu	230	---
Basınç dayanımı (MPa)	7 gün	38,80	---
	28 gün	45,78	≥ 42,5

3.1.2. Silis dumanı

Silis dumanı puzolanik bir malzemedir (Aitcin 1998; Erdoğan 2003). Çimento matrisinin mukavemeti, durabilitesi ve geçirimsizliğini artırır. Silis dumanı portlant çimento hidrasyonu ile birleşerek kalsiyum silikat hidrasyonu jeli oluşturur. Kalsiyum hidroksit göre daha dayanımlı olan bu jel betonun dayanım ve durabilitesini artırır (Short and Kinniburgh 1978). Bu tür mineral katkıları genelde yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılırlar (Neville 1988; Aitcin 1998; Erdoğan 2003; Hossain 2004). Silis dumanı betonun basınç dayanımı ve gevrekliğini artırır. Bu çalışmada mineral katkı olarak Antalya Etibank Elektrometalurji Ferro-Krom Tesislerinden temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1.2.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1.2.1. Silis dumanının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Miktar(%)
SiO ₂	94.6
Al ₂ O ₃	1
Fe ₂ O ₃	0.50
CaO	1.40
MgO	----
Cr ₂ O ₃	----
SO ₃	0.21
Kızdırma Kaybı	----
Çözünmeyen Kalıntı	2.16
Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2.36
Özgül Yüzey (cm ² /g)	200000

3.1.3. Çelik lif

Bu çalışmada, uzunluk-Çap oranı(V_d) 55, boyu 30mm ve çekme dayanımı 1100N/mm^2 ve uzunluk-Çap oranı 80, boyu 60mm ve çekme dayanımı 1050N/mm^2 olan iki farklı lif kullanılmıştır. Bu liflerin sınıfları C, Tipleri A ve ASTM A 820 ye uygundur. Bu bilgiler, lif üretim firması olan Dramik tarafından verilen bilgilerdir.

3.1.4. Akışkanlaştırıcı

Yüksek mukavemetli beton üretiminde temel esaslarda en önemlisi düşük W/C oranı kullanmaktır. Betonda düşük w/c oranında istenilen işlenebilirliği sağlamak için yüksek oranda akışkanlaştırıcı kullanılmalıdır (Bremner and holm 1995; Aitcin 1998; hossain 2004). Bu çalışmada düşük w/c oranında istenilen işlenebilirliği sağlayabilmek için, poli karboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı, her tip çimento ile kullanılabilen ve TS EN 934-2 ve ASTM C 494 Tip F ye uygun bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcının özellikleri Çizelge 3.1.4.1.'de verilmiştir.

Çizelge 3.1.4.1 Akışkanlaştırıcının özellikleri

Malzemenin Yapısı	Poli-karboksilik eter esaslı
Renk	Anber
Yoğunluk	1.082-1.142 kg/Litre
Klor içeriği, %(EN 480-10)	<0.1
Alkali içeriği, %(EN 480-12)	<3

3.1.5. Su

Su, çimento ve agrega ile birlikte betonu oluşturan temel malzemelerden birisidir (Erdoğan 1995). Beton yapımında ve bakımında kullanılacak su, temiz olmalı ve içerisinde taze ve sertleşmiş betonun özelliklerine zararlı etki yapabilecek miktarda kil, silt, organik madde, asit, klorür, sülfat, yağ ve endüstri atıkları gibi yabancı madde bulundurmamalıdır (Neville 1988; Erdoğan 1995). Suyun özellikleri, üretilen betonun kalitesini, en az çimento ve agrega kadar etkilemektedir (Erdoğan 1995). Bu nedenle bu çalışmamızda, karışım ve bakım suyu olarak Erzincan şehir içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanılmıştır.

3.1.6. Agrega

Yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde kullanılacak agrega çok dikkatli bir şekilde seçilmelidir (Aitcin 1998). Hafif agregalar içerisinde çok büyük boşluklar içerdiği için, hem düşük dayanımlı ve gevrek, hem de aşırı derecede su emerek betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır (Faust and Konig 1998; Aitcin 1998; Hossain 2004; kayali 2005). Bu çalışmada Erzincan molla-köyden temin edilen ve Çizelge 4.1.1 ve Çizelge 4.2.2'de kimyasal ve fiziksel özellikleri ile Çizelge 3.2.1, 3.2.2 ve 3.2.3'de granülometrisi verilen ham perlit agregası kullanılmıştır.

3.2. Metot

3.2.1. Yüksek dayanımlı hafif beton karışım hesabı

Yüksek dayanımlı hafif agregalı betonların karışım hesapları, normal ağırlıklı agregalar ile üretilen normal ve yüksek dayanımlı betonların karışım hesaplarından farklılık göstermekte ve oldukça zordur. Çünkü hafif beton üretiminde kullanılan agregaların su emmeleri, özgül ağırlıkları, nem ve karışım içerisindeki ince malzeme miktarı oldukça değişkendir (Neville 1994; Aitcin 1998). Hafif betonların dizaynındaki en

önemli zorluk, farklı hafif agregaların çok farklı özelliklere sahip olmaları ve çok ve hızlı bir şekilde su emmeleridir (Short and Kinniburgh 1978; Zhang and Gjorv 1991; Neville 1994; Aitcin 1998; Friedemann 2003). Çok hızlı su emmeleri, bu agregalarla üretilen betonların kısa zamanda aşırı kıvam kaybetmelerine ve betonların yerine yerleştirilmeden önce işlenebilirliklerini kaybetmelerine neden olmaktadır (Hoff 1990; Novokshchenov and Whitcomb 1990; Malhotra 1990). Malhotra (1990), Hoff (1990) ve birçok araştırmacı; hafif agregaların, karışımdan hemen önce bir ön ıslatmaya tabi tutulmasını ve böylece karışım, taşıma ve yerleştirme sırasında agregaların betonun karışım suyunu emmesinin önlenmesini önermişlerdir. Novokshchenov and Whitcomb (1990) ve bir çok araştırmacı; karışımdan önce agreganın nemlendirilmesinin, üretilen betonların birim ağırlıklarında artma, durabilite, ısı ve basınç dayanımlarında bir düşmeye neden olacağını belirtmektedirler. Burada görüldüğü gibi yüksek dayanımlı hafif beton dizaynında oldukça fazla değişken bulunmakta ve bu değişkenler de, kullanılan hafif agregaya göre değişmektedir. Bu durum bu betonların dizaynını oldukça karmaşık ve zor yapmaktadır.

3.2.2. Karışımdaki agregaya boyut ve oranları

Toplam gerekli olan agregaya miktarı, agregaların gevşek hava kurusu birim ağırlıklarına göre alınmaktadır. Bu miktar hafif agregadan, hafif agregaya göre değişmekle birlikte genellikle 1 m^3 beton için 1 ile 1.2 m^3 hafif agregaya yeterli olmaktadır. Neville (1994), Aitcin (1998), Zhong and Gjorv (1991) gibi bir çok araştırmacı, yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde agregaya maksimum boyutunun, hafif agreganın çeşidine bağlı olmakla birlikte 12.5 ile sınırlandırılmasını önermektedirler. Çünkü hafif agregalarda çap arttıkça, işlenebilirlik ve dayanım azalmaktadır. Elde edilecek betonun özelliklerini etkileyecek en önemli faktörlerden biri de, ince ve iri agregaların granülometrisi ve bunların oranlarıdır. İyi derecelenmiş agregalar üniform bir tane dağılımına ve minimum bir boşluk oranına sahip ve minimum çimento hamuru gerektirmektedir. Bu da çok ekonomik çimento kullanımı sağlamaktadır. İdeal bir karışım ve işlenebilirlik için gerekli ince agregaya miktarı %40 ile %65 arasında olması önerilmekte. Aitcin (1998), Short and Kinniburgh (1978), Neville (1994), Hossain (2004) ve bir çok araştırmacı ise,

işlenebilir yüksek dayanımlı hafif beton üretimi için ince agrega oranının %50 veya daha fazla olması gerektiğini belirtmektedirler. Bu çalışmada; agrega maksimum tane boyutunun etkisini görmek ve istenilen sonuçlara ulaşabilmek için 16 ve 12.5 mm olmak üzere iki farklı maksimum agrega çapı ve gronometrisi seçilmiştir. Gronometri seçiminde, Fuller'in önermiş olduğu 3.2.2.1'deki bağıntı ve ASTM No:4, ASTM C330 ve daha önceki çalışmalar dikkate alınmıştır.

$$P_i = (\sqrt{d_i / D_{max}})^{1/n} \quad (3.2.2.1)$$

3.2.3. Bağlayıcı miktarının belirlenmesi

Yüksek dayanımlı beton üretiminde yüksek miktarda çimento kullanılmalıdır (Neville 1994; Aitcin 1998; Chandras and Berntsson 2003). Araştırmacıların çoğu 400 kg/m³ ile 650 kg/m³ arasında bir bağlayıcının kullanımını önermektedirler. Özellikle yüksek dayanımlı hafif betonlarda, çimento matrisini kuvvetlendirmek için çimentonun bir kısmının yerine silis dumanı veya uçucu kül kullanımı önerilmektedir. Bu puzolanik malzemelerin kullanım amacı; nihai mukavemeti ve işlenebilirliği artırmaktır (Zhang and Gjorv 1990; Malhotra 1990). Aitcin (1998) ve bir çok araştırmacı, maksimum çimento miktarını, betonun mukavemetinde artış yapan son miktar olarak tanımlamaktadır. Bu değer üzerindeki değerler, basınç mukavemeti üzerinde bir etkisi olmayacaktır. Çünkü yüksek dayanımlı hafif betonun basınç dayanımı üzerinde etkin olan iri agreganın dayanımıdır. Bu nedenden dolayı maksimum çimento miktarı, hafif agregadan agregay değişmektedir. Şu ana kadar yapılan çalışmalarda maksimum bağlayıcı miktarı 630 ile 750 kg/m³ arasında değişmiştir. Bu çalışmada; yüksek dayanımlı hafif beton üretebilmek ve üretilen betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin, bağlayıcı miktarının değişimi ile nasıl değiştiğini belirleyebilmek için 450, 500, 550, 600 ve 650 kg/m³ gibi beş farklı dozajda beton üretilmiştir.

3.2.4. Karışım suyu

Yüksek dayanımlı beton üretiminde temel ilkelere biri minimum w/c oranı kullanmaktır (Aitcin 1998). Yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde kullanılacak minimum su miktarı, betonun karıştırılması, taşınması, sıkıştırılması ve mastarlanmasını sağlayacak miktarda olmalıdır. Suyun az olması betonun işlenebilirliğini azaltmakta ve özellikle yüksek bağlayıcı miktarında, autogenous rötrenin oluşumuna neden olabilmektedir. Suyun fazla olması ise betonda segregasyona, basınç dayanımı ve durabilitede azalmaya ve kuruma rötresinde artışa neden olmaktadır (Aitcin 1998; Neville 1994). Hafif agregalar karışım sırasında sürekli su emdikleri için, bu agregalarla beton üretiminde sabit bir su miktarı belirlemek zordur. Curbach (2002), Aitcin (1998), Chen and Liu (2005) ve Weber and Reinhardt (1997) gibi bir çok araştırmacı gerekli su miktarını, istenilen işlenebilirliği sağlayacak en az su miktarı olarak belirtmektedirler. Araştırmacılar bu su miktarını; betonda 100-200mm bir çökme oluşturacak su miktarı olarak belirtmektedirler. Yüksek dayanımlı hafif beton üretebilmek için; oldukça düşük w/c oranı kullanılmalıdır. Bu da ancak yüksek miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanmakla mümkündür (Berra and Ferrara 1990; Aitcin 1998). W/C oranının işlenebilirlik ve betonun diğer özellikleri üzerindeki etkisini görmek için 0,3 - 0,4 ve 0,5 w/c oranında su kullanılmıştır.

3.2.5. Karışım oranları

Bu çalışmada, perlit agregası kullanarak yüksek dayanımlı beton elde edebilmek ve elde edilecek yüksek dayanımlı hafif betonun, fiziksel ve mekanik özelliklerinin çimento miktarı ve w/c oranına bağlı olarak değişimin belirleyebilmek için Çizelge 3.2.5.1, Çizelge 3.2.5.2 ve Çizelge 3.2.5.3.'de verilen üç farklı w/c oranında ve beş farklı çimento miktarında karışımlar hazırlanmıştır. Bununla birlikte, Silis dumanı ve lif gibi katkıların elde edilecek betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde nasıl bir etki yapacağını belirlemek için Çizelge 3.2.5.4'de verilen karışımlar hazırlanmıştır.

Çizelge 3.2.1. 0.3 w/c oranı için beton karışım oranları

Bileşenler	Birim	Karşım No				
		M	H	I	K	N
Su	kg/m ³	150	165	180	195	135
Çimento	kg/m ³	500	550	600	650	450
Silis Dumanı	kg/m ³	-	-	-	-	-
W/C	kg/m ³	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Elek aralığı	Elek aralığına göre agrega miktarı					
12,5-9,5 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
9,5-9,75 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
6,75-4,75 mm	kg/m ³	124	124	124	124	124
4,75-2,4 mm	kg/m ³	246	246	246	246	246
2,4-1,2 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
1,2-0,6 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
0,6-0,3 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
0,3-0 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
Akışkanlaştırıcı	kg/m ³	7,5	8,25	9	9,75	6,75

Çizelge 3.2.2. 0.4 w/c oranı için beton karışım oranları

Bileşenler	Birim	Karşım No				
		A	B	C	D	E
Su	kg/m ³	200	220	240	260	180
Çimento	kg/m ³	500	550	600	650	450
Silis Dumanı	kg/m ³	-	-	-	-	-
W/C	kg/m ³	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Elek aralığı	Elek aralığına göre agrega miktarı					
12,5-9,5 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
9,5-6,75 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
6,75-4,75 mm	kg/m ³	124	124	124	124	124
4,75-2,4 mm	kg/m ³	246	246	246	246	246
2,4-1,2 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
1,2-0,6 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
0,6-0,3 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
0,3-0 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
Akışkanlaştırıcı	kg/m ³	7,5	8,25	9	9,75	6,75
Lif	kg/m ³	-	-	-	-	-

Çizelge 3.2.3. 0.5 w/c oranı için beton karışım oranları

Bileşenler	Birim	Karşım No				
		S	R	P	O	T
Su	kg/m ³	250	275	300	325	225
Çimento	kg/m ³	500	550	600	650	450
Silis Dumanı	kg/m ³	-	-	-	-	-
W/C	kg/m ³	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Elek aralığı	Elek aralığına göre agrega miktarı					
12,5-9,5 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
9,5-6,75 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135
6,75-4,75 mm	kg/m ³	124	124	124	124	124
4,75-2,4 mm	kg/m ³	246	246	246	246	246
2,4-1,2 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
1,2-0,6 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185
0,6-0,3 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
0,3-0 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111
Akışkanlaştırıcı	kg/m ³	7,5	8,25	9	9,75	6,75

Çizelge 3.2.4. Katkılı beton karışım oranları

Bileşenler	Birim	Karşım No						
		1	2	3	4	5	6	7
Su	kg/m ³	240	300	240	270	198	180	198
Çimento	kg/m ³	600	600	600	650	600	550	600
Silis Dumanı	kg/m ³	-	-	-	-	60	50	60
W/C	kg/m ³	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
Elek aralığı	Elek aralığına göre agrega miktarı							
12,5-9,5 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135	135	135
9,5-6,75 mm	kg/m ³	135	135	135	135	135	135	135
6,75-4,75 mm	kg/m ³	124	124	124	124	124	124	124
4,75-2,4 mm	kg/m ³	246	246	246	246	246	246	246
2,4-1,2 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185	185	185
1,2-0,6 mm	kg/m ³	185	185	185	185	185	185	185
0,6-0,3 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111	111	111
0,3-0 mm	kg/m ³	111	111	111	111	111	111	111
Akışkanlaştırıcı	kg/m ³	9	9	9	9,75	9,9	9	9,9
Lif	Kg/m ³	50(80)	50(80)	50(55)	50(55)	-		50(80)

3.3. Betonun karıştırılması ve kalıplanması

Karışımında kullanılan malzemelerinin hepsinin aynı anda betoniyere konulması, hafif agregaların hızlı bir ortamda su emmelerinden dolayı çimentonun topaklanmasına sebep olmaktadır. Bu da çimento hamurunun bağlayıcılık özelliğini ve karışım içerisindeki homojen dağılımını azaltmaktadır (Erdoğan 1995). Karışım oranları tespit edilmiş olan malzemelerden hangilerinin mikser teknesine daha önce yerleştirileceğine, ve karışım oranlarına uymak şartı ile, hangilerinin azar azar veya bir defada yerleştirilmesi gerektiğine dair standartlarca belirtilmiş bir kural bulunmamaktadır. Öte yandan uygulamalardan elde edilmiş tecrübelerle göre, malzemelerin mikser teknesine

yerleştirilme sıraları ve uygulanan yöntem, elde edilecek betonun homojenliğini, belirli bir ölçüde etkilemektedir (Erdoğan 2003). Betonun karıştırılmasında 100 dm³ kapasiteli ve yatay eksenli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır. İlk önce iri ve ince agrega miksere konulup bir dakika karıştırılmıştır. Daha sonra çimento eklenmiş ve mikser 2 dakika daha çalıştırılmıştır. Sonra karışım suyunun üçte ikisi iki dakika içerisinde, mikser çalışırken karışıma eklendi. Kalan su ile süper akışkanlaştırıcı karıştırılıp miksere konulmuş ve karıştırma işlemine üç dakika daha devam edilmiştir. Silis dumanı katkılı betonlarda ise suyun tamamı eklenip karıştırma işlemi bittikten sonra, çözelti haline getirilmiş silis dumanı karışıma eklenmiş ve karıştırma işlemine üç dakika daha devam edilmiştir.

Taze betonun yerine yerleştirilmesi işleminde en önemli hedef, betonun homojen özelliğini kaybetmeden ve segregasyon yapmadan kalıplar içerisindeki yerini almasını sağlamaktır. Karışımı tamamlanmış beton numunesi, basınç dayanımı için 10x10x10 cm³ 'lük çelik ve 15x15x15 cm³ 'lük plastik küp kalıplar ile 100/200 mm lik silindir plastik kalıplar, yarmada çekme ve elastisite modülü deneyi için 100/200 mm lik silindir plastik kalıplar, eğilmede çekme mukavemeti için 150x150x500 mm lik çelik kalıplar ASTM C 192 ye göre doldurulmuştur.

3.4. Betonun bakımı

Çimento ile suyun karıştırılmasından sonra iki temel reaksiyon oluşmaktadır (Neville 1994). Bu reaksiyonlar sonucunda meydana gelen kompleks yapının sertleşmesi ile beton dayanım kazanmaktadır (Erdoğan 2003). Bu reaksiyonların devam edip betonun dayanım kazanması için beton, belirli bir sıcaklık ve neme sahip ortamda bekletilmesi gerekmektedir. Bu olaya betonun bakımı veya kürü denir (Short and kinniburg 1978; Neville 1994). Betonun bakımı için arazide genelde iki metot kullanılır, biri belirli periyotlarla betonu sulama, diğeri betonu nemlendirmektir. Laboratuarda ise 23±1C⁰ suda veya sıcak buhar odalarında çok çeşitli şekilde bakıma tabi tutulmaktadır. ASTM C 192 ye göre hazırlanan numuneler, 23±1C⁰ de ve %90 nemli bir ortamda 24 saat bekletildi. Sonra numunelerin yarısı 23±1C⁰ deki kirece doymuş suda deney saatine

kadar bakıma tabi tutuldu. Bu bakım olayı bu çalışmada iç kür olarak adlandırıldı. Diğer yarısı ise deney saatine kadar dışarıda, sabah ve akşam hortumla sulama şeklinde bir bakıma tabi tutuldu. Bu bakım olayı ise bu çalışmada dış kür olarak adlandırıldı.

3.5. Betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Betonun standart basınç dayanımı; $23\pm 1C^0$ 'de suda kür edilmiş 28 günlük numunelerin eksenel basınç kuvveti altındaki dayanımı olarak tanımlanır (Erdoğan 2003, Neville 1994). Betonların basınç dayanımını etkileyen faktörleri; karışım, bakım ve deney esnasında olmak üzere üçe ayırmak mümkündür. Deney esnasında betonun basınç mukavemetini etkileyen faktörler ise aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

1-Numunenin Geometrisi; yapılan çok sayıdaki deneyler, numune geometrisinin basınç dayanımını etkilediğini kanıtlamıştır. Belirli bir numune geometrisi alındığında örneğin küp, boyutlar dayanımı önemli ölçüde etkilemektedir. Genelde numune boyutları küçüldükçe dayanım artmaktadır. Bu artış hafif ve normal betonlarda farklılık göstermektedir (Aitcin 1998). Buna boyut etkisi denir.

2-Yükleme Hızı; beton zamana bağlı deformasyon gösteren bir malzeme olduğundan, basınç deneyi esnasındaki yüklenme hızı çok önem arz etmektedir. Yapılan çalışmalar yavaş yüklenen bir numune dayanımının, hızlı yüklenen numune dayanımına göre daha düşük olduğunu göstermiştir.

3-Numunenin Nemi; nemli deneye tabi tutulan bir numune, kuru numuneye oranla daha düşük değerler vermektedir (Gambhir 1986; Neville 1994; Aitcin 1998).

Üretilen betonların basınç dayanımlarını belirlemek için; 100x100x100mm ve 150x150x150mm küp ve 100/200 mm ebadındaki silindir numuneler üzerinde 7, 14, 28, 60 ve 90 gün sonunda ASTM C 39 ve TS EN 1352 ye göre üçer numune üzerinde Şekil 3.5.1'de görülen ELE 2000 Auto dijital göstergeli ve hız kontrollü basınç test presi kullanılarak basınç mukavemet testi yapıldı.



Şekil 3.5.1. Betonun basınç dayanımının belirlenmesi

Bu üç numunenin sonuçlarının aritmetik ortalaması, o numunenin basınç dayanım değeri olarak alındı. Betonun yarmada çekme dayanımı yine aynı test presi kullanılarak 100/200 mm boyutundaki üç adet silindir numune üzerinde ASTM C 496' göre yapıldı ve bu üç numunenin sonuçlarının aritmetik ortalaması, o numunenin yarmada çekme dayanım değeri olarak alındı. Betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesi Şekil 3.5.2'de görülmektedir.



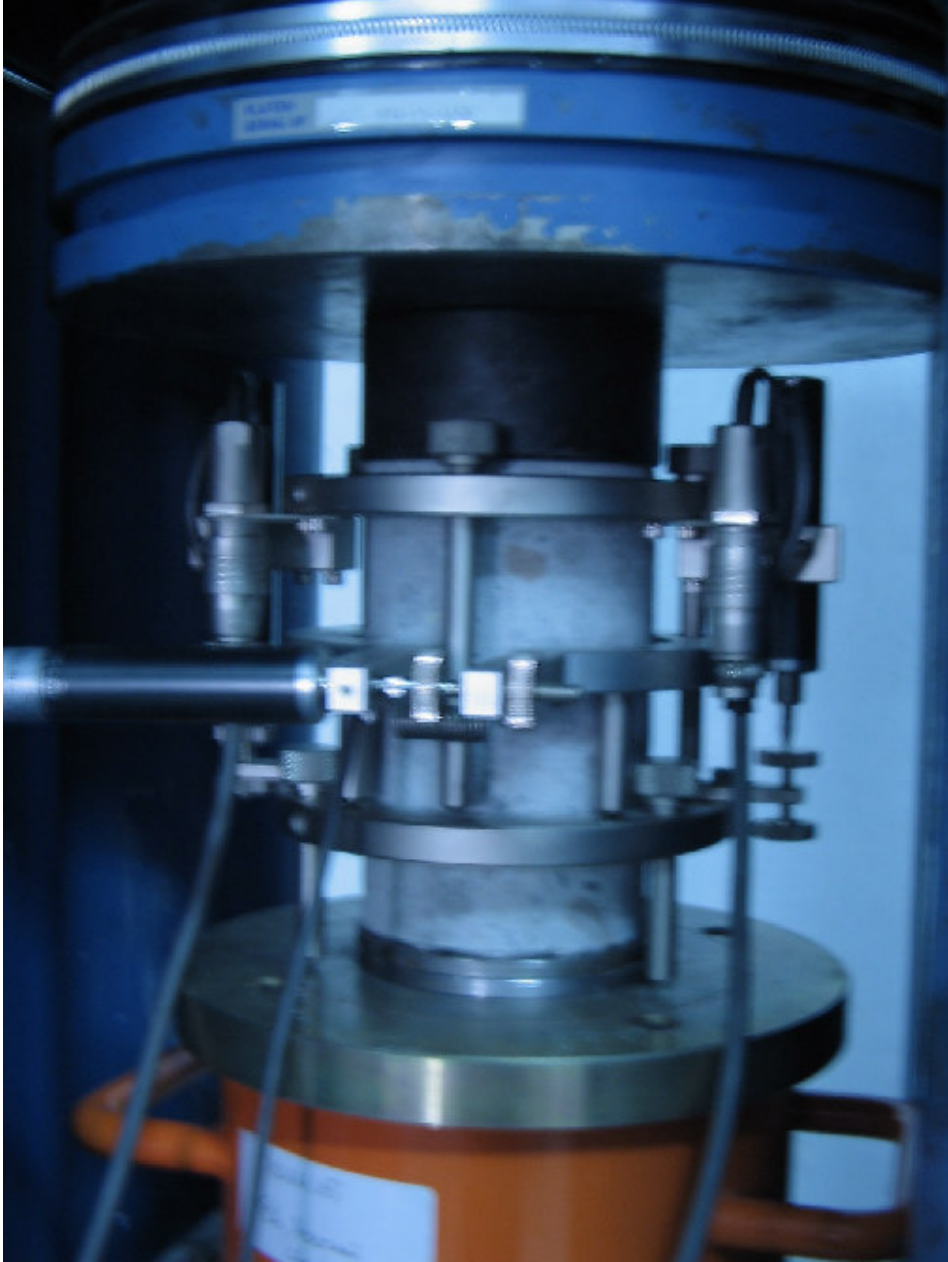
Şekil 3.5.2. Betonun yarmada çekme dayanımının belirlenmesi

Betonun eğilmede çekme dayanımı ise Şekil 3.5.3’de görülen ELE 50 KN kapasiteli, dijital göstergeli ve hız kontrollü eğilmede çekme deney seti kullanılarak, 150x 150x 500 mm boyutundaki üç adet kiriş numune üzerinde ASTM C78’ ya göre test yapıldı ve hesaplandı.



Şekil 3.5.3. Betonun eğilmede çekme dayanımının belirlenmesi

Betonun statik elastiklik modülü ve poisson oranı ELE ADR 200-300 EN dijital göstergeli ve hız kontrollü test cihazı ile yanal ve dikey deformasyonu ölçüp kayıt yapan Şekil 3.5.4'de genel görünümü görülen data-logur aleti birlikte kullanılarak her 4 saniyede bir yük değerini ve bu yük değeri altında oluşan dikey ve yanal deformasyonlar kayıt edilmiştir. Gerilme-deformasyon deneyin yapılışı ve sonuçların değerlendirilmesi ASTM C 469 ve TS 3502 'ye göre yapılmıştır. Basınç dayanımı ve elastiklik modülünün belirlenmesinde kullanılan silindir numuneler, deneyden önce ASTM C 39 göre kükürt ve grafit kullanılarak başlıklanmıştır.



Şekil 3.5.4 . Elastiklik modülü deneyinden genel bir görünüm

3.6. Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.6.1. Taze betonun işlenebilme özelliğinin belirlenmesi

Normal betonlarda olduğu gibi yüksek dayanımlı hafif betonlarda aranan en önemli özelliklerden biri, taze iken sahip oldukları işlenebilirlik özelliğidir. Hafif betonların işlenebilme karakteristikleri normal ağırlıklı betonlarınkinden oldukça farklılık göstermektedir (Hossain 2004). Bu betonların kıvamları çok düşük ise yerleştirme problemi yaşanacak ve vibratör kullanımı sonucunda hafif ince malzemeler ile iri agregalar yüzerek yüzeye çıkacaktır. Bu durum betonun dayanımı ve durabilitesinde düşüğe neden olmaktadır. Kıvamın çok yüksek olması ise betonun kohezyonunu azaltarak, taşınma, döküm ve yerleştirme sırasında segregasyon riskini artıracak ve aynı zamanda betonun tabana çökerek yüzeyde suyun toplanmasına ve kesitin azalmasına neden olmaktadır (Hoff and Elimov 1997). Yapılan çalışmaların çoğunda yüksek dayanımlı hafif betonların işlenebilirliklerinin belirlenmesinde, çökme deneyi yerine kompaksiyon faktör testi veya vebe deneyini önermektedirler. İşlenebilir bir hafif beton için kompaksiyon faktör test değerinin 0.8 ile 0.9 arasında olması ve vebe değerinin ise 15 saniyeden daha düşük olması yeterli olmaktadır (Short and Kinniburgh 1978). Neville (1994), Hossain(2004), Short and Kinniburg (1978), Berra and Ferra (1990) ve daha birçok araştırmacı ise pratikte bu testlerin uygulamadaki zorluklarını dikkate alarak, yüksek dayanımlı hafif betonların işlenebilirliklerinin belirlenmesinde çökme testinin uygun olduğunu ve işlenebilir bir hafif beton için 100 ile 200 mm lik aralıktaki bir çökme değerinin yeterli olduğunu belirtmektedirler.

3.6.2. İşlenebilme özelliğinin kompaksiyon faktör testi ile belirlenmesi

Deneye tabi tutulacak numune, beton karışım işlemi bittikten hemen sonra kompaksiyon faktör test kovasına konulmuştur. Kabin alt kısmındaki kapak açılarak betonun kendi ağırlığı ile ikinci kovaya dolması sağlanmıştır. Bu kovanında alt kapağı açılarak beton numunesinin yerçekimi etkisiyle 150 mm çapında ve 300 yüksekliğindeki birim ağırlık

kabına dolması sağlanmıştır. Birim ağırlık kovanının üzeri tesviye edilerek tartılmış ve kab+numune ağırlığı kayıt edilmiştir. Aynı karışımdan alınan numune birim ağırlık kovasına iki eşit tabakada doldurularak her tabaka vibratör ile sıkıştırıldı. Daha sonra birim ağırlık kovanının üzeri tesviye edilerek tartıldı ve kab + numune ağırlığı kayıt edildi. Bu iki ağırlığın oranı, o betonun kompaksiyon test değerini vermektedir.

3.6.3. Beton kıvamının çökme testi ile belirlenmesi

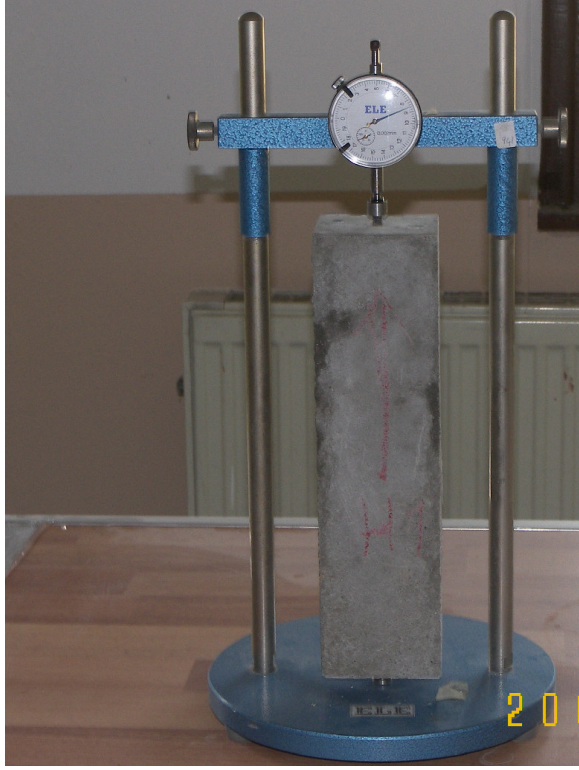
Betonun Kıvamı ASTM C143 göre, çökme hunisi üç eşit kademede dolduruldu ve her tabaka homojen bir şekilde 25 kez şişleme çubuğu ile şişlendi. Daha sonra huni yerinden oynatılmadan hassas bir şekilde dikey olarak yukarı çekilerek betonun kendi ağırlığı altında yayılması sağlandı. Huni yayılan betonun yanına konularak oluşan çökme değeri belirlendi. Şekil 3.6.3.1’de çökme deneyinin yapılışı görülmektedir.



Şekil 3.6.3.1. Beton kıvamının çökme deneyi ile belirlenmesi

3.6.4. Betonun kuruma rötresinin belirlenmesi

Deney numunelerinin hazırlanmasında 285x75x75mm boyutlarında ikili harç kalıpları kullanılmıştır. Numunelerin kalıplara yerleştirilmesi, bakımı ve ölçümü ASTM C 157 “Standart test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete” standardına göre yapılmıştır. Her numune grubu için üç adet 285x75x75 mm boyutunda çubuk numune hazırlanmıştır. Numunelerin köşelerinde ve ölçüm çivilerinin etrafında boşluk kalmaması için gereken özen gösterilmiştir. Kalıba yerleştirilen numunelerin başlangıçtaki boy değişimleri nedeniyle ölçüm çivilerinin bir zorlamaya maruz kalmaması için, ölçüm çivilerinin tutucuları hafifçe gevşetilmiştir. Üzeri cam plakalarla kapatılan numuneler kür odasına yerleştirilmiştir. Karışıma su katılmasından $23,5 \pm 0,5$ saat sonra, numuneler kalıplardan ölçüm çivileri hasar görmeden dikkatli bir şekilde çıkarılıp, karıştırılmaması için kodlandıktan sonra $23 \pm 0,5C^0$ sıcaklığına sahip kür tankına konulmuştur. 30 dakikanın sonunda kür tankından çıkarılan numuneler, ıslak bir bezle kurulandıktan sonra komparatörde Şekil 3.6.4.1’de görülen biçim’de ilk boy okumaları yapılmış ve bu ölçümler sıfır gün yaş okumaları olarak kaydedilmiştir. Ölçüm işlemi tamamlanan numuneler, ilgili standartta belirtilen şartlara haiz kür odasındaki raflara yerleştirilmiştir. Hava sirkülasyonunun sağlanması için numunelerin dört tarafında yeteri kadar boşluk bırakılmıştır. Numuneler üzerinde 0, 7, 14, 28, 56, 90, 112 ve 128 günlük boy değişimi ölçümleri tekrarlanmıştır. Her okuma öncesinde komparatör kalibrasyon çubuğu ile kontrol edilmiştir. Her harç grubu için hazırlanan 3 deney numunesinden elde edilen okuma değerleri ASTM C 157’de verilen formülde yerine konularak, rötre deneyinden sonra ölçüm yapılan yaşlarda her bir numunede oluşan birim deformasyonlar hesaplanmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır.



Şekil 3.6.4.1. Betonun kuruma rötresinin ölçülmesi

3.6.5. Taze betonun birim ağırlığının belirlenmesi

Taze betonun birim hacim ağırlığı ASTM C 138' göre belirlendi. Deneyden önce birim ağırlık kovasının hassas bir şekilde ağırlığı ve hacmi belirlendi. Daha sonra birim ağırlık kovası iki eşit tabakada doldu ve her tabaka ayrı ayrı vibratör ile sıkıştırıldı. Üst yüzey masterlandıktan sonra tartılarak ağırlık kayıt edildi. Her beton numunesi için bu olay üç kere tekrarlanmıştır. ASTM C 138 göre hesaplama yapıldı ve bu üç deneyin aritmetik ortalaması, o numunenin taze birim hacim ağırlığı olarak alındı.

3.6.6. Sertleşmiş betonun birim ağırlık ve su emme oranının belirlenmesi

Sertleşmiş betonun birim ağırlık ve su emme oranları ASTM C 567 'ye göre belirlendi. Önce numuneler etüvde $105\pm 5C^0$ değişmez ağırlığa kadar kurutuldu ve desikatörde 20-

25C⁰ kadar soğutuldu. Numuneler 0.001 hassasiyetli terazide tartıldıktan sonra, 24 saat suda bekletilerek boşlukların su ile dolması sağlanmıştır. Suyu doymun hale gelen numuneler, yüzeyleri silinerek tartılıp doymun kuru yüzey ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra doymun kuru yüzey halindeki numuneler suda tartılarak, sudaki ağırlıkları belirlenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak betonun birim ağırlıkları ve su emme oranları ASTM C567 göre hesaplanmıştır.

3.6.7. Betonun ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi

Betonun ısı iletim katsayısı λ Şekil 3.6.7.1'de görüldüğü gibi kızgın tel yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Sıcak tel yöntemi, lineer ısı kaynağı boyunca, bu kaynaktan tanımlı bir uzaklıktaki ısı yükselmesini ölçen standart direkt dinamik yöntem olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemin temeli, sabit bir ısı kaynağının numune boyunca sabit ve üniform bir ısı vermesi ve bu hat boyunca belirli zaman aralığında ısı değişimini ölçmeye dayanmaktadır. Ölçülen ısı farkından direkt ısı iletkenlik katsayısı λ W/mK cinsinden belirlenmektedir.



Şekil 3.6.7.1. Sıcak tel yöntemiyle ısı iletkenliğinin belirlenmesi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Perlit Agregasının Özellikleri

Erzincan Mollaköy ham perlit agregası üzerinde MTA'nın yapmış olduğu kimyasal analiz ile dünya genelinde perlit için verilen genel değerler Çizelge 4.1.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1.1. Perlit agregasının kimyasal bileşenleri

Bileşenler	MTA ₁ (%)	MTA ₂ (%)	MTA ₃ (%)	MTA ₄ (%)	Genel Perlit
SiO ₂	74,600	73,710	74,80	73,860	71-75
TiO ₂	0,027	0,036	0,032	0,037	0,01
Al ₂ O ₃	13,200	12,980	12,910	12,910	12,50-16
Fe ₂ O ₃	0,480	0,510	0,490	0,520	0,30-0,50
FeO	0,130	0,550	0,480	0,160	0,33
MnO	0,075	0,071	0,070	0,068	0,071
MgO	0,018	0,040	0,020	0,032	0,03-0,02
CaO	0,750	0,770	0,760	0,760	0,40-0,82
Na ₂ O	3,100	3,300	3,220	3,110	3,20
K ₂ O	3,140	3,180	3,200	4,200	4-5
P ₂ O ₅	0,004	0,005	0,003	0,002	0,00375
Kızdırma Kaybı(%)	2,370	2,830	2,850	2,230	2,502

Bu değerler dünya genelinde perlit için verilen analiz sonuçlarıyla oldukça benzerlik göstermektedir. Oluşan çok küçük farklar perlitin oluşum zamanı ve yerinden kaynaklanabilmektedir. Perlit makroskopik olarak gri renkli, ince-orta taneli, kristalli, camsı parlaklık sunan hamurlu, akma yapılı ve peridotik dokuludur. Kayacın hamuru küresel kırılmalı (perlit dokusu), devitrifikasyon göstermeyen kahverengi ve yeşil biyotit ve plajiyoklaz mikrolitleri içeren volkanik camdır. Perlit agrega kesitinde açık çatlak veya boşluk yer almamaktadır (Göncüoğlu 2005). Magmanın yeryüzüne çıkıp havada soğuması sonucu pomza, suyun içerisinde soğuması sonucu ise perlit

oluşmaktadır. Pomza perlite göre daha boşluklu ve hafif olmaktadır. Perlit ise suyun içerisinde oluştuğu için bünyesinde %2 ile %6 arasında değişen oranda, su tutmakta ve bu su kuruma ile giderilemez. Ancak, perlitin ani olarak 900C⁰ de ısıtılması sırasında perlit yumuşamakta ve bünyesindeki su gaz haline geçip perlit genleştirmektedir. Perlit ilk hacminin 7 ile 20 katı genleşebilmektedir. Çizelge 4.1.1'de görüldüğü gibi agregaların çabuk dağılmasına, bozulmasına ve agreganın alkali özellik göstermesine neden olan magnezyum oksitçe (MgO) oldukça zayıftırlar. Mladevonic *et al.* (2004), Turanlı (2005) ve Erdem *et al.* (2007) Perlit ve camsı dokulu agregalarda, betonun zamanla parçalanarak tahrip olmasına neden olabilecek alkali-agrega reaksiyonunun ASTM C 1260'ın belirttiği sınır değerinin altında kaldığını belirttikler.

Perlit yüksek oranda amorf yapıda silis, alüminyum ve demir içerdiği için, puzolanik aktivite gösterir (Erdem *et al.* 2007). Bu agregalar; çimento hidrasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç ile reaksiyona girerek hem dayanım artışına, hem de matrisin yoğunluğunu artırarak, zararlı ve bozucu suların beton içerisine girişini engellemektedir. Bu olay betonun durabilitesini artırarak daha uzun ömürlü olmasına neden olmaktadır. Anwar Hossain (2004) puzolanik aktiviteye sahip hafif agregalı betonlarda, agregaya yüzeyi ile temas eden çimento matrisinin basınç dayanımının, diğer bölgedeki matrisin basınç dayanımından %50 daha fazla olduğunu belirlemiştir. Bunun da çimento ile agregaya arasındaki puzolanik aktiviteden kaynaklandığını belirtmektedir. İlk çağlardan günümüze kadar ulaşan yapılarda bağlayıcı olarak bu tür puzolanik aktiviteye sahip malzemelerin kullanıldığı görülmektedir (Erdoğan 2003). Normal dayanımlı betonlarda, betonun mekanik özellikleri üzerinde, agregaya ve matrisinin özellikleri etkin olmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlarda ise bu özellikler üzerinde en önemli faktör agregaya yüzey dokusu, şekli, dayanımı ve petrografik özellikleridir (Tamasawa *etal.* 1990; Malhotra 1990; Neville 1998; Aitcin 1998). Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılacak hafif agregaların şekli, yüzey dokusu, boşluk yapısı ve miktarı çeşitli limit değerlerde olabilir. Bununla ilgili fazla bir sınırlama getirilmemekle birlikte Zhang and Gjorv (1997) hafif agregaları zayıf ve gevrek kılacak ve üretilecek hafif betonların mekanik özelliklerini aşırı derecede olumsuz olarak etkileyecek boşluk ve benzeri olumsuzluktan kaçınılması gerektiğini belirttiklerdir. Perlit agregalarının yüzey dokuları pürüzlü ve

gözenekli olduğu için çimento matrisi ile agregası arasındaki bağı artırarak, elde edilecek betonların mekanik davranışlarında olumlu bir katkı sağlayacaktır. Yapılan çalışmada; perlit agregası kullanılarak üretilen betonun dayanımını kaybetmesi, beton içerisindeki iri agreganın kesilmesi sonucunda gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 4.1.1'de görülmektedir. Bunun iki nedeni bulunmaktadır;

1-Yüzey dokuları pürüzlü ve gözenekli olduğu için, agregası ile çimento matrisi arasında oldukça kuvvetli bir bağın oluşması,

2-Agregası içerisindeki boşlukların agregası mukavemetini düşürmesidir.



Şekil 4.1.1. İri perlit agregasının basınç dayanım testi sırasında kırılması

Wasserman and Bentur (1996), Neville (1994), Aitcin (1999) ve Hoff (1990) gibi bir çok araştırmacı, her hafif agreganın yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde kullanılamayacağını belirtmektedirler. Çünkü; yapmış oldukları çalışmalarda bir çok doğal veya yapay hafif agregaların, basınç yükü altında yeterli direnci gösteremeyerek, üretilen betonların çok düşük yükler altında dayanımını kaybetmesine neden olduğunu

gözlemlemişlerdir. Hafif agregaya dayanımı, genelde agreganın birim ağırlığı ile doğru orantılıdır (Malhotra 1990; Neville 1994; Aitcin 1998). Perlit agregası, diğer hafif agregalara göre daha yüksek birim ağırlığa (BA), dolayısıyla da daha yüksek dayanıma sahiptir. Birim ağırlığı belirleyen faktör, agregaya içerisinde bulunan boşluk miktarı ve boyutudur. Bu boşluklar aynı zamanda agreganın dayanımını da belirlemekteler. Perlit agregalarının hava kuruşu gevşek (GBA) ve sıkışık birim ağırlıklarının (SBA), tane çapına ters orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Bu durum; iri agregalar içerisinde ve taneler arasında boşlukların fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 4.1.2'de Erzincan Mollaköy Perlit agregasının bazı fiziksel özellikleri görülmektedir. Çalışmada kullanılan ham perlit agregasının gevşek (GBA) ve sıkışık birim ağırlıkları (SBA) Çizelge 4.1.2'de görüldüğü gibi sırasıyla 1060-1130 kg/m³ ile 1020-1260 kg/m³ arasında değişmiştir. Özgül ağırlıkları (ÖA) ise 1.91 ile 2.01 arasında değişmektedir. Bu değerler ASTM C330'da taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılacak agregaların sahip olması gereken limit değerler ile uyuşmaktadır.

Perlit agregasının su emme oranı Çizelge 4.1.2'de görüldüğü gibi agreganın tane çapına bağlı olarak artmıştır. Bununda nedeni agregaya tane boyutu arttıkça, tane içerisindeki boşluğun artmasıdır. Su emme oranı kuru ağırlığın %2,7 ile %7,2 arasında değişmiştir. Bu değerler hafif agregalar için oldukça düşük bir su emme değeri sayılabilir. Zhang and Gjorv (1997) çok farklı hafif agregalar üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu agregaların birim ağırlıkları 1007 ile 1540 kg/m³ arasında değişirken su emme oranı %8 ile %13 arasında değişmiştir. Swamy and Lmabert (1981) ise sinterize uçucu kül agregası olan lytagın su emme oranını %13 ile %14 arasında değiştiğini ve bunun büyük bölümün ilk dakikalarda gerçekleştiğini belirtmektedirler. Hafif agregaların 24 saatlik su emme oranlarının, kuru ağırlığın %5 ile %20'si arasında değişebileceği belirtilmekle birlikte, bu oran taşıyıcı beton üretiminde kullanılacak agregalarda %15 ten fazla olmamalıdır (Neville 1988; Faust and Konig 1997; Aitcin 1998). Wasserman and Bentur (1996) her hafif agregaya ile yüksek dayanımlı hafif beton üretilmeyeceğini belirtmektedirler. Değişik hafif agregaya kullanılarak istenilen dayanım ve birim ağırlık elde edilmiş olsa bile; karışımda kullanılan agregaya sınır değerlerin üzerinde su emiyor ise o agregaya yüksek mukavemetli beton üretiminde kullanılamaz.

Çizelge 4.1.2. Erzincan Mollaköy perlit agregasının fiziksel özellikleri

Özellikler	Dane Grubu (mm)				
	12,5-9,5	9,5-6,75	6,75-4,75	4,75-1,2	1,2-0
GBA (kg/m ³)	960	1010	1050	1080	1130
SBA (kg/m ³)	1020	1090	1130	1195	1260
ÖA (gr/cm ³)	1,91	1,93	1,96	1,99	2,01
Su Emme (%)	7,2	6,6	6	4,5	2,7
30 dakikalık Su Emme (%)	3,4	3,2	2,8	2,2	1,8
Organik Madde	-	-	-	yok	yok

Çünkü; karışım ve taşıma sırasında betonun suyunu emerek inşaat sahasında işlenemez bir betonun oluşmasına neden olur (Zhang and Gjorv 1991; Aitcin 1998). Bu problemi çözmek için, Hoff and Elimov (1995) karışımdan önce agreganın tamamen suya doymun hale getirilmesini, Zhang and Gjorv (1990) karışımdan önce agreganın yarı doymun hale getirilmesini önermektedirler. Aitcin (1998) ve Neville (1988) gibi araştırmacılar ise bu uygulamanın birim ağırlığı artıracığını ve betonun durabilitesini düşüreceğini belirterek bu işleme karşı çıkmaktadırlar. Bentur *et al.* (1999) ise olaya farklı bir noktadan bakarak, hafif agregaların karışım sırasında su emmelerinin, yüksek dayanımlı betonlarda autogenous rötreyi engellediği ve kuruma rötresini azalttığından dolayı bir avantaj saymaktadırlar. Bu olayın, aynı zamanda farklı kür veya kür eksikliğini ortadan kaldırdığını da belirtmektedirler.

4.2. Taze betonun özellikleri

Hafif betonlarda karıştırma, taşıma ve yerleştirme sırasında hafif iri agregaların yüzerek yüzeye çıkmasıyla ayrışma (Segregasyon) problemi oluşmaktadır (Blandren *et al.* 2002). Kayali *et al.* (2003), Al khait and haque (2003), Aitcin (1998) ve Balendran *etal.* (2002) gibi bir çok araştırmacı, yüksek dayanımlı hafif betonlarda karıştırma, taşıma ve yerleştirme esnasında, ayrışmanın oluşmaması için, üretilen betonun yüksek kohezivliğe sahip olmasının zorunlu olduğunu belirtmektedirler. Bu betonlarda sıkça karşılaşılan

problemlerden biri de, karışımda kullanılan hafif agregaların karışım ve taşıma süresi boyunca su emerek betonun işlenebilirliğini azaltması veya tamamen ortadan kaldırmasıdır (Lafraugh and Wiss 1997). Bu durum özellikle, yüksek dayanımlı hafif beton üretimi için zorunlu olan düşük w/c oranı ve yüksek dayanımlı ve yüksek miktarda bağlayıcı kullanılması ilkesi ile uyuşmamaktadır (Aitcin 1998). Kullanılan çimentonun dayanım ve miktarının yüksek olması, çimentonun erken priz almasına ve kullanılan akışkanlaştırıcıların priz hızlandırması, üretilen betonların kısa zamanda kıvam kaybına neden olmaktadır (Aitcin 1998). Hossain (2004), Kayali *et al.* (2003), Rossignalo *et al.* (2003) ve Aitcin (1998) gibi bir çok araştırmacı; bu etkileri dikkate alarak işlenebilir yüksek dayanımlı hafif betonların 100 ile 200 mm' lik bir çökme değerine sahip olmalarının zorunluluğunu belirtmekteler. Bu belirtilen problemleri yaşamamak ve yüksek dayanımlı ve inşaat sahasında işlenebilir bir hafif beton üretimi için çalışmalar hassas bir şekilde yürütülmüştür. Sonuçta perlit agregası kullanılarak üretilen betonların tamamında yüksek bir kohezivlik görülmüş, ölçülen çökme değerleri 120 ile 210 mm arasında değişmiştir. Şekil 4.2.1'de betonun çökme biçimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi yüksek çökme değeri oluşmasına rağmen, yüksek viskoziteden dolayı taze beton konikliğini korumuştur.

Karışımdan 30 dakika sonra yapılan ölçümlerde, betonun oldukça işlenebilir bir beton olduğu ve çökme değerinde ortalama 15-20 mm civarında bir düşmenin olduğu görülmüştür. Karışımda w/c oranı ve çimento miktarı artıkça kıvam artmış, azalması ile azalmıştır. Karışıma silis dumanı ve çelik lifin katılması kohezivliği artırmış, fakat kıvamı düşürmüştür.



Şekil 4.2.1. Katkısız betonun çökme biçimi

En düşük çökme değeri lif ve silis dumanı katkılı betonda ve 120 mm olarak ölçülmüştür. Lif, betonun viskozitesini artırarak betonun yayılmasını önlemiştir. Bu durum Şekil 4.2.2'de görülmektedir. Li *et al.*(2006)'da lifin taze betonun kohezivliğini artırdığını, çökme değerini azalttığını belirtmektedirler. Çalışmalarında benzer çökme ve kıvam kaybını belirlemişlerdir. 120 ve 210 mm'lik çökme değerleri arasındaki kıvamın; karıştırma, taşıma ve kalıplara boşluksuz yerleştirme işlemi için yeterli olduğu ve bu işlemler esnasında ayrışma ve segregasyona rastlanmamıştır. Yüksek çökme değerinde ayrışma olmamasının nedeni;

- 1-Yüksek miktarda kullanılan bağlayıcının kohezivliği artırması,
 - 2-İşlenebilirlik için kullanılan akışkanlaştırıcının kohezivliği artırması,
 - 3-Karışımda kullanılan ince agrega miktarının %60'ın üzerinde olması,
- gibi sebepler söylenebilir.



Şekil 4.2.2. Lifli betonun çökme biçimi

Üretilen betonların taze birim ağırlıkları ise 1850 ile 1995 kg/m³ arasında değişmiştir. Çizelge 4.2.1’de görüldüğü gibi en yüksek birim ağırlık lif ve silis dumanı katkılı ve en düşük çökme değerine sahip olan 7’ nolu karışımda, en düşük birim ağırlık ise 1850 kg/m³ ile 450 kg çimento ve 0,5 w/c oranında elde edilmiştir. Çizelge 4.2.1’de görüldüğü gibi betonun taze birim ağırlıkları, çimento miktarı ile doğru orantılı ve w/c oranı ile ters orantılı olarak artmaktadır. Silis dumanının katılması taze betonun birim ağırlığında azda olsa bir düşüş oluşturmuştur. Bunun nedeni; boşlukların bir kısmının çimento yerine silis dumanı ile doldurulması ve silis dumanının birim ağırlığının çimento’nun birim ağırlığına kıyasla oldukça düşük olmasıdır.

Çizelge 4.2.1. Üretilen betonların taze birim ağırlıkları

Numune No	Çimento Miktarı kg/m ³	w/c	Silis Dumanı kg/m ³	Lif kg/m ³	Taze-Birim Ağırlık(kg/m ³)
A	500	0,4	-	-	1890
B	550	0,4	-	-	1900
C	600	0,4	-	-	1910
D	650	0,4	-	-	1930
E	450	0,4	-	-	1865
H	550	0,3	-	-	1920
I	600	0,3	-	-	1930
K	650	0,3	-	-	1955
M	500	0,3	-	-	1920
N	450	0,3	-	-	1880
O	650	0,5	-	-	1890
P	600	0,5	-	-	1875
R	550	0,5	-	-	1895
S	500	0,5	-	-	1890
T	450	0,5	-	-	1850
1	600	0,4	-	50(80)	1950
2	600	0,5	-	50(80)	1940
3	600	0,4	-	50(55)	1920
4	650	0,4	-	50(55)	1910
5	600	0,3	60	-	1902
6	550	0,3	50	-	1990
7	600	0,3	60	50(80)	1995
8	650	0,3	-	-	2449

4.3. Sertleşmiş Betonun Fiziksel Özellikleri

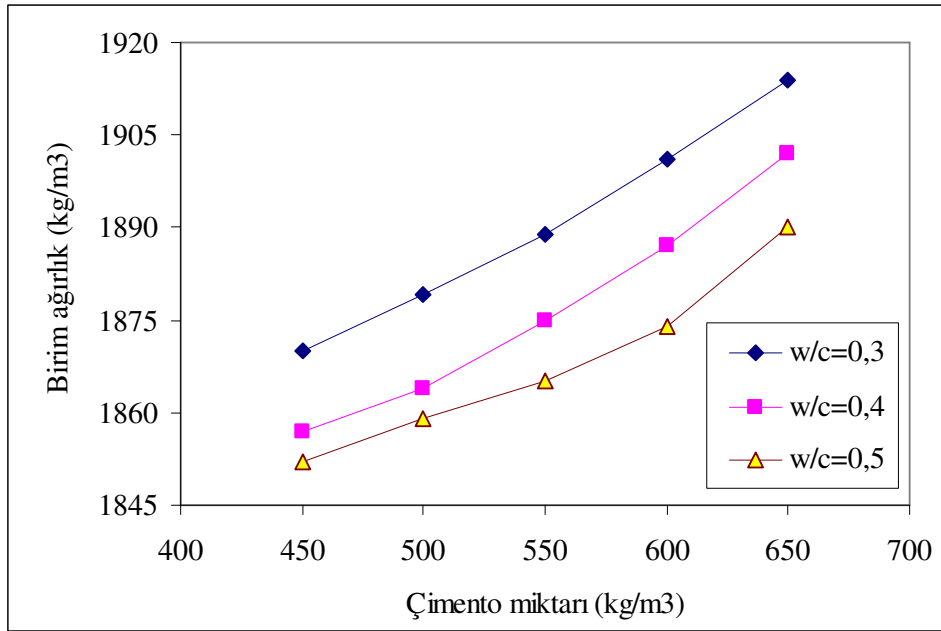
4.3.1. Birim ağırlık

Hafif betonların yaygınlaşmasında ve bazı yerlerde kullanımlarının zorunlu hale gelmesinde etken olan en önemli faktörlerden biri, birim hacimde sağlamış olduğu hafiflemedir (Neville 1994; Aitcin 1998). Hafif betonların Kuru birim ağırlığı (KBA), kullanım amacına, kullanılan agreganın birim ağırlığına ve karışımda kullanılan bağlayıcı miktarına bağlı olarak değişmektedir.

Çizelge 4.3.1. Yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlık ve su emme oranları

Numune No	Bağlayıcı M. (kg/m ³)	w/c	İç kür	Dış kür	İç kür	Dış kür
			Su emme (%)	Su emme (%)	KBA (kg/m ³)	KBA (kg/m ³)
A	500	0,4	6,85	7,10	1840	1817
B	550	0,4	6,62	7,00	1850	1860
C	600	0,4	6,45	6,85	1874	1865
D	650	0,4	6,35	6,70	1881	1868
E	450	0,4	7,00	7,20	1832	1806
H	550	0,3	5,20	5,50	1890	1885
I	600	0,3	4,60	4,90	1900	1870
K	650	0,3	4,40	4,75	1915	1907
M	500	0,3	6,50	6,80	1880	1863
N	450	0,3	6,90	7,20	1870	1848
O	650	0,5	6,40	6,80	1860	1836
P	600	0,5	6,50	7,20	1846	1829
S	500	0,5	7,40	7,65	1837	1844
T	450	0,5	7,75	8,15	1830	1824
2	600+50kg lif	0,5	5,67	-	1983	-
3	600+50kg lif	0,4	5,17	-	1993	-
4	650+50kg lif	0,4	5,77	-	1994	-
5	600+50kgS.D	0,3	3,40	-	1952	-
6	650+50kg S.D	0,3	3,00	-	1946	-
8	650 K.Betonu	0,3	3,20	-	2409	-

Bu nedenle, farklı çalışmalarda farklı kuru birim ağırlığa (KBA) sahip, yüksek dayanımlı hafif beton üretmek doğaldır. Yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlığı için bir alt sınır getirilmemekle birlikte üst sınır getirilmiştir. Bu üst sınırdaki genelde 2000 kg/m^3 olarak belirtilmektedir. Berra and Ferrara (1990) ise yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlıklarının 1700 ile 2085 kg/m^3 arasında değiştiğini belirtmektedirler. Yanai *et al.* (1999) ise hafif agregası kullanarak birim ağırlığı 2000 kg/m^3 ve basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Gao *et al.* (1997) birim ağırlığın 2000 kg/m^3 altında kalacak şekilde karışımda genleştirilmiş kil ve kum kullanarak birim ağırlığı 1963 kg/m^3 ve basınç dayanımı $85,4 \text{ MPa}$ olan yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Burada normal agregası, dayanımı artırmak için kullanılmıştır. Kayali (2005) flashag hafif agregası kullanarak birim ağırlığı 1747 kg/m^3 olan ve 28 günlük basınç dayanımı $62,9 \text{ MPa}$ olan yüksek dayanımlı beton üretmişlerdir. Yaşar *et al.* (2004) bazaltik pomza agregası kullanarak birim ağırlığı 1800 - 1860 kg/m^3 , basınç dayanımı 30 ile 40 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir.



Şekil 4.3.1. Çimento miktarı ile birim ağırlık arasındaki ilişki

Chia ve Zhang (2002) genleştirilmiş kil ve normal agregaya kullanarak birim ağırlığı 1768 ile 1863 kg/m³ ve basınç dayanımı 34 ile 55,8 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Aynı çalışmada normal ağırlıklı agregaya kullanarak üretilen betonların birim ağırlıkları 2248 ile 2312 kg/m³ ve basınç dayanımı 80 ile 90 MPa arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Bu iki beton arasındaki dayanım farkının agregaya dayanımından kaynaklandığı belirtilmektedir. Smadi and Migdady (1990) bölgesel bir hafif agregaya kullanarak birim ağırlığı 2000 kg/m³ den daha düşük, basınç dayanımı 60 MPa olan yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Kayali *et al.* (2003) sinterize uçucu kül agregası kullanarak birim ağırlığı 1870 ile 1940 kg/m³ ve basınç dayanımı 30 ile 68,5 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretmişlerdir. Anwar Hossain (2005) volkanik pomza agregası kullanarak birim ağırlığı 1852 ile 1970 kg/m³ ve basınç dayanımı 18 ile 35 MPa arasında değişen yüksek dayanımlı hafif beton üretmiştir. Çizelge 4.3.1' görüldüğü gibi perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlıkları 1830 ile 1915 kg/m³ arasında w/c oranı ve çimento miktarına bağlı olarak değişmiştir. Elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonların, aynı dayanıma sahip normal agregalı betona göre %21 ile %25 daha hafif olduğu belirlenmiştir. Bu durum, yapıların ölü yüklerinde küçümsenemeyecek oranda hafifleme sağlayarak, bir deprem sırasında yapılara daha az deprem yükünün etkimesini sağlamaktadır. Elde edilen betonların birim ağırlık değerleri, diğer araştırmacıların bulduğu değerler ile çok benzerlik göstermektedir. Özellikle çalışmada doğal volkanik orijinli kayaç kullanan Yanai *et al.* (1999), Smadi and Migdady (1990), Anwar Hossain (2004) ve Yaşar *et al.* (2004) gibi araştırmacıların elde ettikleri sonuçlar ile çok yakın birim ağırlık değerleri vermiştir. Farklı çalışmalar sonucu elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonların birim ağırlıkları arasında oluşan küçük farklar, agreganın birim ağırlığı, karışımdan önce agreganın nem durumu, karışımın w/c oranı, bağlayıcı miktarı ve tipinden kaynaklanmaktadır. Genelde; taşıyıcı beton üretiminde kullanılan volkanik orijinli agregaların birim ağırlıkları, termal işlem sonucu elde edilen agregaların birim ağırlıklarından biraz daha fazladır. Dolayısıyla üretilen betonların birim ağırlıklarında belirgin farkların oluşması normaldir. Üretilen betonları, özellikle de hafif betonları, daha sağlıklı değerlendirmek, kullanılan malzemenin performansını ölçmek için yapısal verim denilen yeni bir kavram oluşmuştur. Yapısal verim betonun basınç dayanımının, birim ağırlığına bölünmesiyle elde edilmektedir. Çizelge 4.3.2'de görüldüğü gibi perlit

kullanılarak elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonların yapısal verimi 32 ile 51 MPa dm^3/kg arasında değişmiştir. Bu değerler ortalama olarak kontrol betonundan %10 daha fazladır. Lifin katılmasıyla bu oran %28'e, silis dumanının katılmasıyla da %36'ya çıkmıştır. Lif ve silis dumanının kullanımı, sadece betonun mekanik özelliği üzerinde değil aynı zamanda, malzemenin yapısal veriminde oldukça önemli bir artışa neden olmuştur.

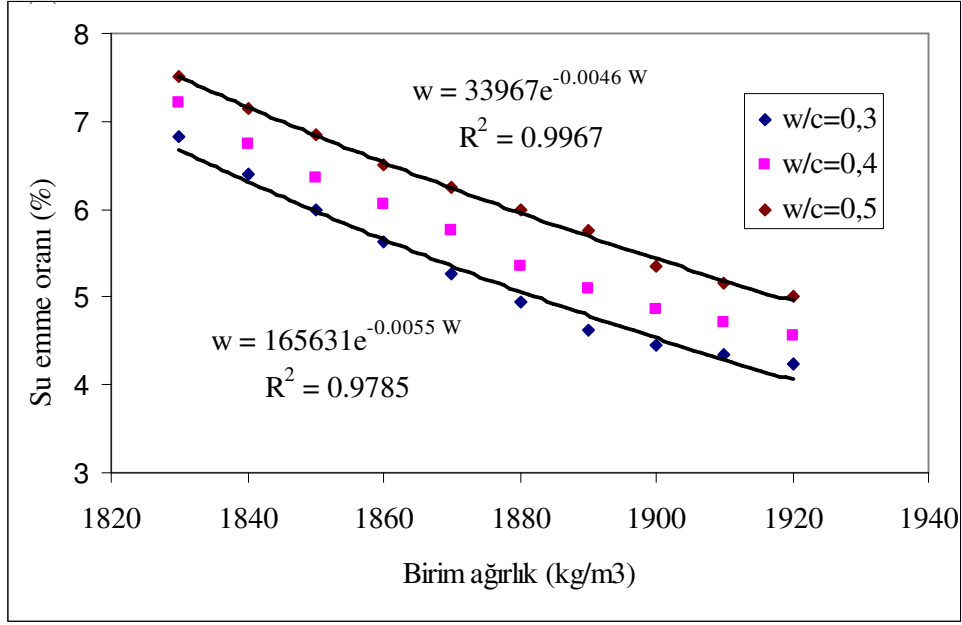
Çizelge 4.3.2. Malzemenin yapısal verimi

Num. No	Bağlayıcı Miktarı. kg/m^3	w/c	Kuru Birim Ağırlık (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Yapısal Verim ($\text{MPa} \cdot \text{dm}^3 / \text{kg}$)
A	500	0,4	1840	65	35,33
B	550	0,4	1850	68	36,76
C	600	0,4	1874	71	37,88
D	650	0,4	1881	72	38,30
E	450	0,4	1832	60	32,75
H	550	0,3	1890	70	37,04
I	600	0,3	1900	73	38,42
K	650	0,3	1915	77	40,21
M	500	0,3	1880	67	35,64
N	450	0,3	1870	64	34,22
O	650	0,5	1860	72	38,74
P	600	0,5	1846	70	37,92
S	500	0,5	1837	64	34,84
T	450	0,5	1830	60	32,8
2	600+50kg lif	0,5	1983	72	36,31
3	600+50kg lif	0,4	1993	73	36,63
4	650+50kg lif	0,4	1994	80	40,12
5	600+50kg Silis dum.	0,3	1952	110	56,12
6	650+50kg Silis dum.	0,3	1946	100	51,38
8	650 K.Betonu	0,3	2409	87	36,11

Birim ağırlıkta olduğu gibi, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların yapısal verimleri de, Kayali *et al.*(2003), Gao *et al.* (1997), Anwar Hossain (2004) ve Yanai *et al.* (1999) gibi bir çok araştırmacının üretmiş oldukları yüksek dayanımlı hafif betonların yapısal verimleri ile çok benzerlik göstermektedir. Bu araştırmacılar tarafından üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların yapısal verimleri 28 ile 34 MPa dm^3/kg arasında değişmiştir.

4.3.2. Su emme oranı

Betonların durabiliteleri su emme oranlarıyla ters orantılı olarak değişmektedir. Özellikle hafif beton üretiminde kullanılan agregaların yüksek oranda su emmeleri, bu betonlar için büyük bir durabilite problemi oluşturmaktadır (Neville 1994). Neville (1994) ve Aitcin (1998) durabilitesi yüksek hafif beton için, maksimum su emme oranını %10'la sınırlamaktadırlar. Betonun su emme oranı üzerinde en etkili parametreler; agreganın boşluk yapısı ve miktarı, w/c oranı ve bağlayıcı miktarıdır. Çizelge 4.3.2.1'de görüldüğü gibi üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların su emme oranı %3 ile %8,15 arasında değişmiştir. Çizelge 4.3.1 ve Şekil 4.3.2.1'de görüldüğü gibi bu hafif betonların su emme oranları w/c oranına, çimento miktarına, kür şekline ve birim ağırlığa bağlı olarak değişmiştir.



Şekil 4.3.2.1. Birim ağırlık ile betonun su emme oranı arasındaki ilişki

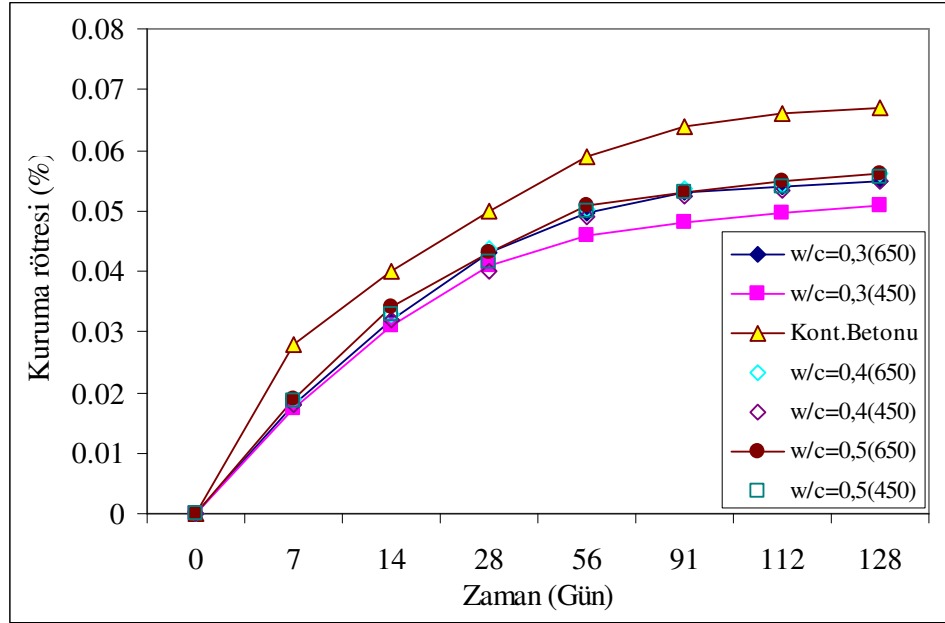
Kür şeklinin, diğer özelliklerde olduğu gibi su emme üzerinde de pek fazla etkili olmadığı Çizelge 4.3.1’de görülmektedir. Bunun nedeni de hafif agreganın karışım öncesi ve karışım sırasında emdiği suyu ortama vererek kürün etkisini azaltmasıdır. Karışımında w/c oranının artması, matris içerisinde boşlukların oluşumuna neden olmaktadır. Bu durumda betonun su emme oranını artırarak durabilitenin düşmesine neden olmaktadır (Aitcin 1998). Şekil 4.3.2.1’de görüldüğü gibi w/c oranının artmasıyla su emme oranı artmış ve azalmasıyla azalmıştır. W/C oranının tersine birim ağırlık ve çimento miktarının artmasıyla su emme oranında bir azalma oluşmuştur. Şekil 4.3.2.1’de görüldüğü gibi betonun su emme oranı birim ağırlığın artmasıyla azalmış, azalmasıyla da artmıştır. Bu artış aynı zamanda karışımın w/c oranına bağlı olarak da değişmiştir. Bunun nedeni, agrega boşluklarının bir kısmının çimento hamuruyla kapatılması ve matris yoğunluğunu artırarak su emme oranını düşürmesidir. Bu durum silis dumanı katkılı betonlarda daha belirgin olarak gözükmemektedir. Çizelge 4.3.1’de görüldüğü gibi silis dumanı katkılı betonun su emme oranı %3 ile kontrol betonunun su emme oranının bile altına düşmüştür. Silis dumanının benzer etkisini, Novkschnov and Withcomb (1990), Aitcin (1998), Cerny *et al.* (2003), Chen and Liu (2004), Kayali

(2005), Bhanja and Sengupta (2005) gibi araştırmacılar yapmış oldukları çalışmalarda görmüşlerdir. Bunu da, silis dumanının çok ince olmasından dolayı imento matrisinin boşluklarını doldurarak matrisin yoğunluğunu ve dayanımını artırmasına bağlamaktadırlar.

4.3.3. Kuruma rötresi

Kuruma rötresi (kuruma büzülmesi); sertleşmiş betonun içerisindeki suyun bir miktarının buharlaşarak kaybolması sonucunda yer alan hacimsel büzülmedir. Bu büzülme; karışımın w/c oranına, agreganın yapısı ve ortamın nemi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Doğal olarak; betondaki su kaybı ilk zamanlarda daha hızlı olacak ve kuru ortam devam ettikçe su kaybı devam edecektir (Erdoğan 2003). Su kaybederek kuru duruma gelmiş olan beton, tekrar ıslak ortama geldiğinde, suyunu kaybetmiş kapiler boşlukların bir kısmı tekrar su ile dolarak büzülme miktarında biraz azalma olmaktadır. Kuru durumdan tekrar ıslak duruma getirilmesiyle betonda oluşan toplam büzülme miktarının ancak %40 ile %70 kadarı geri dönebilmektedir (Erdoğan 2003). Berra and Ferrara (1990) yüksek dayanımlı hafif agregalı betonların, normal agregalı betonlara göre daha düşük bir kuruma rötresine sahip olduğunu belirtmektedirler. Bunun nedenini; hafif agregaların karışım sırasında emdikleri suları tekrar ortama vererek, kuruma rötresinin daha yavaş gelişmesine neden olması olarak açıklamaktalar. Bununla birlikte hafif agregalı betonlarda nihayi kuruma rötresinin daha büyük olabileceği, çünkü normal agregalı betonda ilk zamanlarda hızlı bir kuruma olurken, kuruma rötresi belirli bir zaman sonra sabitleştğini belirtmektedirler. Şekil 4.3.3.1'de görüldüğü gibi yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonun kuruma rötre değeri, Berra and Ferrara (1990) ve Anwar Hossain (2004)'nin belirttiği gibi başlangıçta ve 112 gün sonunda normal agregalı kontrol betonuna göre daha yavaş gelişmiş ve daha düşük bir değer almıştır. Normal olarak betondaki nem hareketi, temelde agrega çeşidine, imento matrisinin miktarına ve kalitesine bağlıdır. Short and Kinniburg (1978), genleştirilmiş kil agregası kullanılarak üretilen hafif betonların birim ağırlıkları 960 ile 1760 kg/m³ ve kuruma rötrelerinin %0,04 ile %0,07 arasında, genleştirilmiş slate agregası ile üretilen hafif betonların birim ağırlıkları 1490 ile 1745 kg/m³ ve kuruma

rötreleri %0,03 ile %0,04 arasında ve pomza agregası kullanılarak üretilen hafif betonların birim ağırlıkları 770 ile 1250 kg/m³ ve kuruma rötrelerinin %0,090 ile %0,070 arasında değiştiğini belirtmektedirler. Chandra and Berntsson (2003) aynı çimento miktarı ve w/c oranına sahip olan ve elastiklik modülü normal agregadan %18 daha düşük olan laytag agregası kullanılarak üretilen hafif betonun, 210 gün sonundaki kuruma rötresinin normal agregalı betonun kuruma rötresinden %50 daha düşük olduğunu belirlemişlerdir. Bunun nedeni de yine, hafif agrega, içerisinde bulunan suyu ortama vererek kuruma hızı ve miktarını azaltmasına bağlamaktadırlar. Anwar Hossian (2004) hafif betonlarda kuruma rötresinin w/c oranı ve agrega/çimento gibi iki temel faktörden etkilendiğini, w/c oranının artmasıyla rötrenin arttığını, agrega/çimento oranının artmasıyla rötrenin azaldığını belirtmektedirler. Yapmış olduğu çalışmalarda w/c oranının %1 artmasının rötrede %2'lik bir artışa neden olduğunu gözlemlemiştir. Yine çalışmalarında, başlangıç rötre oranının yüksek olduğu bir grup numunenin çekme dayanımının da diğer numunelere göre oldukça düşük çıktığını belirlemiştir. Bu olaya neden olarak; başlangıçta oldukça yüksek olan kuruma rötresinin oluşturmuş olabileceği rötre çatlaklarını göstermiştir.



Şekil 4.3.3.1. Kuruma rötresinin zamana bağlı değişimi

Bununla birlikte, yüksek orandaki kuruma rötre çatlağının oluşturacağı olumsuz etkinin, volkanik pomza betonlarının sahip oldukları düşük elastiklik modülün olumlu etkisi ile telafi edilebileceğini belirtmektedir. Şekil 4.3.3.1’de görüldüğü gibi perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif betonun kuruma rötresi %0,047 ile %0,056 arasında değişmiştir. Bulunan bu değer hafif agregalı beton için oldukça düşük bir değerdir. Perlit agregalı betonun rötre değeri, karışımın w/c oranına ve karışımdaki çimento miktarına bağlı olarak değişmiş ve bu değerlerin artmasıyla bir artış, azalmasıyla bir azalma göstermiştir. Elde edilen değerler kontrol betonunun rötre değerinden ortalama %20 daha düşük çıkmıştır. Perlit agregası kullanılarak üretilen aynı basınç dayanımına sahip hafif betonların elastiklik modülü, normal agregalar ile üretilen betonların elastiklik modülünden %40 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni; perlit agregasının elastiklik modülünün, normal agreganın elastiklik modülünden daha düşük olmasıdır. Buna rağmen bu betonların kuruma rötrelere, normal agregalı betonların rötre değerinden %20 daha düşük çıkmasının nedeni, karışımdan önce agregaların ön ıslatmaya tabi tutulmaları ve karışım anında emdikleri suyu, ortama vererek kuruma rötre değerinin yavaş ve daha düşük olmasıdır. Anwar Hossain (2004) Volkanik pomza kullanarak ürettiği hafif betonun kuruma rötresini %0,061 ve kontrol betonunun kuruma rötre değerini %0,046 olarak belirlemiştir. Aynı zamanda; Anwar Hossain (2004) yüksek performanslı hafif beton için diğer bütün şartlar yerine gelmiş olsa bile, kuruma rötre değerinin maksimum, normal ağırlıklı betonun rötre değerinin %30 fazlasından küçük olmasının zorunlu olduğunu belirtmektedir. Betonda oluşacak kuruma rötre değerinin bu belirtilen sınır değerlerden daha yüksek olması durumunda; iç yapıda çatlaklar oluşturarak betonun çekme dayanımında ve durabilitesinde büyük azalmalara neden olmaktadır (Neville 1994; Aitcin 1998).

Elde edilen rötre sonuçlarına göre, perlit agregası kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif betonun, diğer şartlar yerine geldiğinde yüksek performanslı hafif beton sınıfına girmesi için bir engel bulunmamaktadır. İç yapıda oluşan çatlakların, betonun çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı üzerinde belirgin bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Perlit agregalı yüksek dayanımlı betonların, çekme dayanımı ve ultrases değerlerinin, diğer yüksek dayanımlı hafif agregalı betonların değerlerine göre yüksek çıkması, perlit

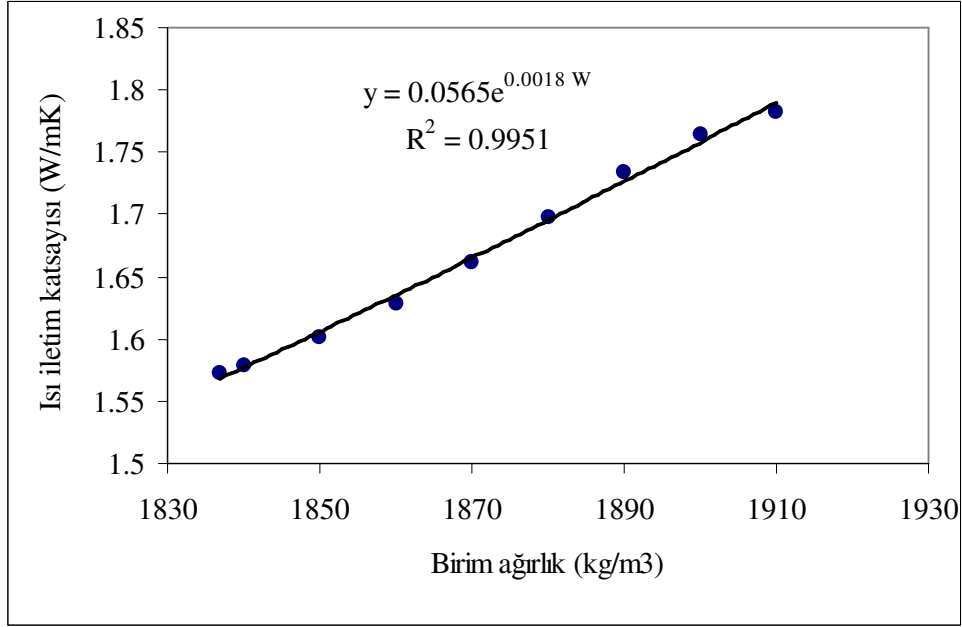
agregalı betonlarda oluşan maksimum kuruma rötresinin, betonun durabilitesi ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığına bir işarettir.

4.3.4. Isı iletim katsayısı

Beton gibi kompozit katı malzemelerde ısı iletimi, büyük oranda, betonu oluşturan malzemelerin ısı iletimine bağlı olarak değişmektedir. Hacimsel olarak betonun %80 ile %85'ni agrega oluşturduğundan, bu malzemelerin ısı iletimi üzerinde en önemli faktör, agreganın ısı iletim değeri olmaktadır. Neville (1994) normal betonun ısı iletkenlik değerinin 1,6 ile 3,6 W/mK arasında değiştiğini, bu geniş aralığın nedenini, kullanılan agregaların çok farklı ısı iletim katsayısına sahip olmalarına bağlamaktadır. Khan (2002) ise agreganın, betonun ısı iletim katsayısını %48 artırabileceğini belirtmektedir. Agregalarda ısı iletimi üzerinde, en etkin faktör, agreganın iç yapısıdır. Chandra and Berntsson (2003) kristal yapının amorf yapıya göre 15 kat daha fazla ısı iletimine sahip olduğunu belirtmektedirler. Nevilla (1995) ise ısı iletiminin kristal dizilim yönüne bağlı olarak değiştiğini ve kristal yapının, amorf yapıya göre daha fazla iletken olduğunu belirtmektedir. Morabito (1989) yapmış olduğu çalışmada, betonun ısı iletiminin karışım oranına, agreganın mineral yapısına, nem durumuna ve birim ağırlığına bağlı olarak değiştiğini belirlemiştir. Wang and Tsai (2006) w/c oranının betonun ısı iletim katsayısı üzerinde etkisinin olmadığını, ısı iletim katsayısının, betonun birim ağırlığa bağlı olarak değiştiğini, artmasıyla arttığını ve azalmasıyla azaldığını belirtmektedirler. Bunun nedenini de; tüm w/c oranlarında agrega/çimento oranının sabit olması olarak açıklamışlardır. Oysa uysal *et al.* (2004) ve Demirboğa and Gül (2003) betonun ısı iletkenlik katsayısını w/c oranına bağlı olarak değiştiğini, w/c oranının azalması ile arttığını ve artması ile azaldığını belirtmektedirler. Sebep olarak da w/c oranının artmasıyla beton içerisindeki boşluğun artacağı ve bu boşlukların iletkenliği olmayan hava ile dolacağını göstermektedirler. Bu çalışmada üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların ısı iletim katsayısı ise; betonun birim ağırlığına bağlı olarak değişmiştir. Şekil 4.3.4.1'de görüldüğü gibi birim ağırlığın artmasıyla ısı iletim katsayısı artmış ve azalmasıyla da azalmıştır. Birim ağırlık ile ısı iletim değeri arasındaki ilişkiden faydalanılarak aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir.

$$\lambda = 0,0565 e^{0,0018 W} \quad (4.3.4.1)$$

Elde edilen bu bağıntı diğer hafif betonlar için önerilmiş bağıntılarla çok farklı sonuçlar vermektedir. Bunun nedenlerinden biri; yüksek dayanımlı perlit agregalı betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinin, diğer hafif betonlara kıyasla oldukça farklılık göstermesi, diğeri ise verilen ampirik bağıntıların taşıyıcı olmayan hafif betonlar veya düşük dayanımlı taşıyıcı hafif betonlardan elde edilmiş olmasıdır. Çalışmada üretilen yüksek dayanımlı hafif betonun, ısı iletim katsayısı, bütün karışımlarda agrega oran ve miktarı aynı olduğu için w/c oranı, bağlayıcı miktarı ve birim ağırlığa bağlı olarak küçük değişim göstermiştir. Isı iletim katsayısı w/c oranına bağlı olarak çok azda olsa bir değişim göstermiştir. w/c oranının artmasıyla ısı iletim katsayısı λ 'da azalma, azalmasıyla da bir artmanın oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonların λ değeri 1,55 ile 1,75 W/mK arasında değişmiştir. Bulunan bu değerler bir hafif betona göre yüksek olsa da, normal betona ve kontrol betonunun değerine göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Kontrol betonunun ısı iletim değeri 3,8 ile 4,2 w/mk arasında değişmiştir. Bulunan bu değerler oldukça yüksek değerlerdir. Kontrol betonunda ısı iletiminin yüksek çıkmasının nedeni, kontrol betonunun üretiminde kullanılan agreganın ısı iletkenlik katsayısının oldukça yüksek olmasıdır.



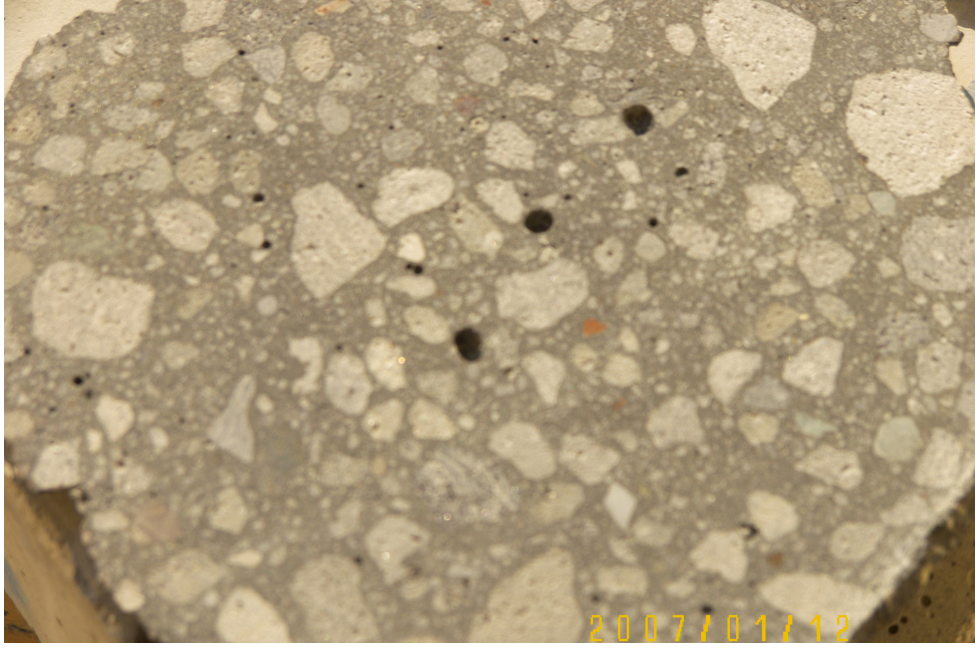
Şekil 4.3.4.1. Birim ağırlık ile ısı iletkenliği arasındaki ilişki

Kontrol betonunun üretiminde kullanılan agregayı (Fırat agregası) temsil eden kayaçlar üzerinde yapılan deney sonucunda, Fırat agreganın ısı iletkenlik katsayısı λ 'da 6,7121 ile 8,1632 W/mK arasında değişmiştir. Kontrol betonu agregası üzerinde yapılan ölçümler sonucu elde edilen ısı iletim katsayı değerleri çok yüksek görünmekle birlikte, bu değerler Khan (2002)'nin beton üretiminde kullanılan kayaçlar için belirttiği, maksimum ısı iletim katsayısı 8.6 w/mk'den biraz daha düşük olduğu ve sonucun normal olduğu görülmektedir. Agreganın yüksek ısı iletkenliğine sahip olmasından dolayı kontrol betonun yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması da normaldir. Çünkü agrega betonun ısı iletim katsayısını 2 kat artırabilmektedir (Neville 1994). Bu değerlere göre perlit agregasının ısı iletkenlik katsayısı oldukça düşük, fakat diğer hafif betonlara göre, elde edilen değerler biraz daha yüksek çıkmıştır. Diğer hafif betonlara kıyasla ısı iletim katsayısının daha yüksek çıkmasının nedeni;

1-Perlit agregasının yüksek oranda silis içermesi ve ısı iletim katsayısının 1,6 ile 1,8 W/mK arasında değişmesi,

2-Diğer hafif agregalara kıyasla, su emme oranının düşük olması ve birim ağırlığın yüksek olmasına neden olan boşluk miktarı ve yapısı,

3-Şekil 4.3.4.2’de görüldüğü gibi, betonun birim alanında çok miktarda agrega bulunması ve betonun kompozitesinin diğer hafif betonlara göre yüksek olması,



Şekil 4.3.4.2 Isı iletkenliğinin ölçüldüğü beton yüzeyi

1-Çimento hamurunun agrega içerisine enjekte olarak agrega yüzeyindeki boşlukları kapatması,

2-Isı iletim katsayısını belirleme yöntemlerindeki farklılıklar gibi nedenler sayılabilir.

Elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonun, normal agregalı kontrol betonuna ve normal betona göre %50 ile %65 daha düşük ısı yalıtım katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu da bu betonun normal ağırlıklı betona göre tercih sebeplerinden biri olabilir.

4.3.5. Kür

Literatür ve saha çalışma sonuçları, yüksek dayanımlı betonlarda kürün etkisinin oldukça önemli olduğunu göstermektedir. Özellikle silis dumanı gibi mineral katkıların kullanılmasıyla matrisin yoğunluğu ve kalınlığı artmakta ve dışarıdaki suyun beton içerisine ulaşması oldukça zorlaşmaktadır. Bunun sonucunda betonun iç bölgelerinde autogenous rötre oluşarak betonun bu bölgelerinde aşırı kılcal çatlaklar oluşmakta ve hidrasyon tam gelişmemektedir. Betonda autogenous rötrenin oluşumu özellikle betonun çekme dayanımı ve ultrasonik ses geçiş hızında belirgin düşümlere neden olmaktadır. Bentur *et al.*(1999) hafif agregalı yüksek dayanımlı betonlarda autogenous rötrenin oluşmadığını, neden olarak; karışım sırasında iri agregata tarafından emilen suyun zamanla kapilerite ile ortama verilerek, dışarıdan iç kısma su ulaşmasa bile kür olayının gerçekleşmesini göstermektedir. Dhir *et al.*(1984) aglite hafif agregası, akışkanlaştırıcı ve 600 kg/m^3 çimento kullanarak üretilen betonlardan suda küre tabi tutulan hafif betonların basınç dayanımı 43 ile 60 MPa, havada küre tabi tutulan betonların basınç dayanımlarının 29 ile 53 MPa arasında değiştiğini belirtmektedirler. Burada kürün basınç dayanımı üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmektedir. Fakat Bentur *et al.*(1999) ise farklı kür etkisinin, hafif betonların mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde maksimum %3 fark oluşturduğunu söylemektedirler. Bunun da çok önemli olmadığını belirtmektedir. Bu çalışma sonucunda, farklı kürün betonun hem mekanik hem de fiziksel özellikleri üzerinde etkisinin olduğu, bu etkinin bütün özelliklerde benzer olduğu ve %1 ile %3 arasında değiştiği görülmüştür. Kür etkisinin düşük oranda kalmasının sebebi; Bentur *etal.* (1999) tarafından belirtildiği gibi iri hafif agregaların gerek karışım öncesi, gerek karışım sırasında emdikleri suyu kapileritenin etkisi ile ortama vererek kür olayına yardımcı olmasıdır. Betonun küre hassas olmaması, yüksek performanslı ve dayanımlı beton üretimi için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Kür olayının yavaş ve uzun süreli devam etmesi, betonun dış etkilere karşı dayanımının ve mekanik özelliklerinin daha yüksek olmasına neden olmaktadır (Neville 1994; Aitcin 1998).

4.4. Sertleşmiş Betonun Mekanik Özellikleri

4.4.1. Basınç dayanımı

Perlit agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması için beş farklı çimento miktarı ve üç farklı w/c oranında karışımlar hazırlanmıştır. Farklı çimento miktarı ve w/c oranında numune hazırlanmasının nedeni; hangi çimento miktarında yeterli dayanımın elde edilebileceği ve çimento miktarı ve w/c oranının değişimiyle betonun mekanik ve fiziksel özelliklerinde oluşacak değişimleri belirlemektir. Numuneler üzerinde ASTM C39 ve C 617'ye göre yapılan basınç dayanım testinden elde edilen sonuçlar w/c oranına göre Çizelge 4.4.1.1, Çizelge 4.4.1.2 ve Çizelge 4.4.1.3'de verilmiştir. Boyut etkisini belirlemek için aynı karışımdan 100x100x100 mm³, 150x150x150 mm³ ve 150 mm çapında ve 300 mm boyunda silindir numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler üzerinde yapılan basınç dayanım test sonuçlarından yararlanılarak ampirik dönüşüm formülleri elde edilmiştir. 100'lük küpün 150'lik küpe dönüşüm formülü denklem 4.4.1.1'de ve 150'lilik küpün silindire dönüşüm formülü denklem 4.4.1.2'de verilmiştir.

$$f_{cu} = 0,8301 f_c + 3,2 \text{ MPa} \quad (4.4.1.1)$$

$$f_{cy} = 1,0153 f_{cu} - 2,2 \text{ MPa} \quad (4.4.1.2)$$

Bu ampirik formüller Anwar Hossain (2004)'ün önermiş olduğu ampirik dönüşüm formülü ile oldukça benzer sonuçlar vermiştir. Neville (1997) hafif betonlar ile normal betonların boyut etkisinin çok farklı olduğunu ve hafif betonlarda boyut etkisinin daha düşük olduğunu belirtmekte ve küpün silindire dönüşüm katsayısının kullanılan hafif agreganın yapısına bağlı olarak 0,95 ile 0,98 arasında, normal betonlarda 0,8 ile 0,9 arasında değiştiğini belirtmektedir. Basınç dayanımı arttıkça bu oran 0,9'a, azaldıkça 0,8'e yaklaşmaktadır (Neville 1997; Erdoğan 2003). Farklı hafif agrega kullanılmasına rağmen, bu çalışmada bulunan dönüşüm katsayısı Anwar Hossain (2004) ve Neville (1997) 'nin önerdikleri dönüşüm katsayıları ile aynı limit içinde kalmıştır. Hafif

betonlarda boyut etkisinin normal betonlara göre daha düşük olmasının nedeni; hafif agrega ile çimento matrisinin benzer rijitliğe sahip olmalarından dolayı, beton içerisinde oluşan gerilmelerin homojen dağılmasıdır. Diğer bir deyişle hafif agregalı betonların, normal agregalı betonlara göre daha monolitik davranmasıdır.

Çizelge 4.4.1.1. 0,3 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları

Numune No	Bağlayıcı miktarı. kg/m ³	w/c	Basınç dayanımı (MPa) 100x100x100 mm ³ (küp numune)					
			Kür şekli	Ölçüm zamanı (Gün)				
				7	14	28	60	90
M	500	0,3	İç kür	50	55	61	65	67
			Dış kür	47	51	56	61	64
H	550	0,3	İç kür	54	58	63	67	70
			Dış kür	51	55	59	63	66
I	600	0,3	İç kür	55	59	65	69	73
			Dış kür	52	57	61	66	69
K	650	0,3	İç kür	57	63	69	75	77
			Dış kür	52	58	65	70	73
N	450	0,3	İç kür	46	53	58	62	64
			Dış kür	44	49	55	58	61

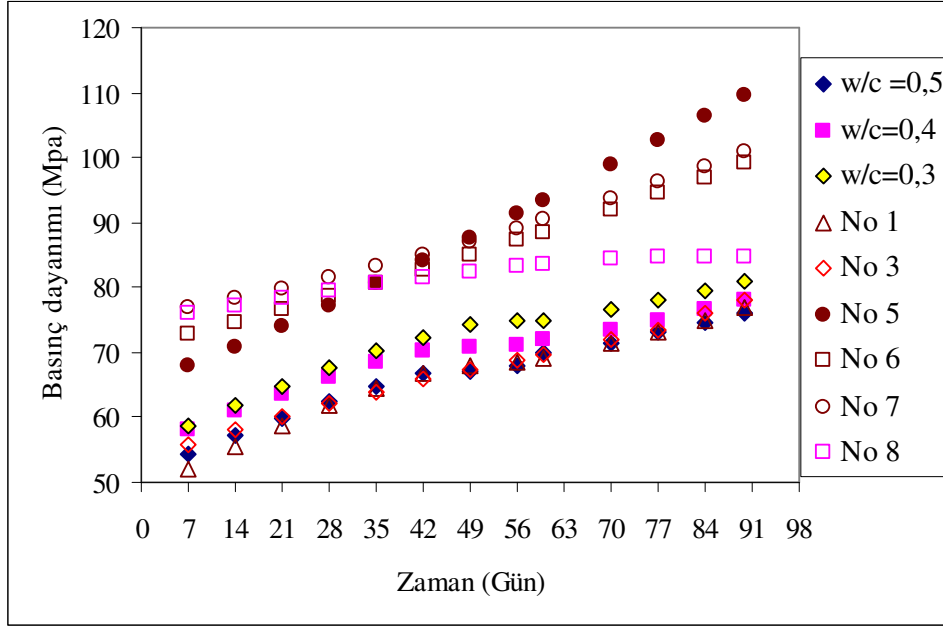
Çizelge 4.4.1.2. 0,4 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları

Numune No	Bağlayıcı miktarı. kg/m ³	w/c	Basınç Dayanımı (MPa) 100x100x100 mm ³ (küp numune)					
			Kür şekli	Ölçüm zamanı (Gün)				
				7	14	28	60	90
A	500	0,4	İç kür	48	53	59	63	65
			Dış kür	46	50	56	60	62
B	550	0,4	İç kür	52	56	61	65	68
			Dış kür	49	53	57	63	65
C	600	0,4	İç kür	53	58	64	67	71
			Dış kür	51	55	59	64	68
D	650	0,4	İç kür	56	62	68	72	74
			Dış kür	53	59	63	68	70
E	450	0,4	İç kür	46	51	56	60	63
			Dış kür	44	47	53	57	60

Çizelge 4.4.1.3. 0,5 w/c oranındaki karışımın basınç dayanım sonuçları

Numune No	Bağlayıcı miktarı. kg/m ³	w/c	Basınç dayanımı (MPa) 100x100x100 mm ³ (küp numune)					
			Kür şekli	Ölçüm zamanı (Gün)				
				7	14	28	60	90
S	500	0,5	İç kür	44	51	58	61	64
			Dış kür	42	47	54	58	60
R	550	0,5	İç kür	44	53	59	63	66
			Dış kür	43	51	55	60	64
P	600	0,5	İç kür	51	56	62	64	70
			Dış kür	48	54	60	63	67
O	650	0,5	İç kür	52	59	64	69	72
			Dış kür	48	56	61	65	69
T	450	0,5	İç kür	43	49	54	58	60
			Dış kür	41	46	51	54	57

Elde edilen sonuçlardan, perlit agregası kullanarak 28 günlük sonuçlara göre yüksek dayanımlı hafif beton üretebilmek için Çizelge 4.4.1.1'de görüldüğü gibi 0,3 w/c oranında 450 kg çimento yeterli iken, Çizelge 4.4.1.2 ve 4.4.1.3'de görüldüğü gibi diğer w/c oranlarında en az 500 kg çimento gerekmektedir. 90 gün sonunda ise perlit agregası kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi için tüm w/c oranlarında 450 kg çimento yeterli olmuştur. Karışımlarda agrega miktarı aynı olduğu için betonun basınç dayanımı zamana, çimento miktarına, w/c oranına, kür şekline, birim ağırlığa ve katkı miktarı ve cinsine bağlı olarak değişim göstermiştir. Şekil 4.4.1.1'de görüldüğü gibi zamanla basınç dayanımı artmış ve ilk zamanlardaki artış hızı diğer zamanlara göre daha yüksek olmuştur. Kontrol betonundaki dayanım artışı 28 günden sonra dururken, diğer betonlardaki artış devam etmiştir. Fakat artış hızı ilk zamanlara göre daha düşük olmuştur. 28 günden sonraki artış oranı %9 ile %13 arasında değişmiştir. Al-khaiat and Haque (1998) ise laytag hafif agregası ve kum kullanarak ürettikleri betonun 28 günlük basınç dayanımını 50 MPa ve 90 günlük dayanımını ise 56 MPa olarak bulmuşlardır. Bu betonun 28 ile 90 günlük dayanım farkının sadece %9 ve bunun da normal agregalı betonların artış değerinden daha düşük olduğunu ifade etmektedirler. Bu artış oranının normal betonlara göre daha düşük kalmasının nedeni; hafif agregalı betonlarda dayanım artışının, agrega dayanımı ile sınırlandırılmış olmasına bağlamaktadırlar. Aynı durum Hoff (1990), Nvokschchenov and Whitcomb (1990) tarafından da belirtilmiştir. Bunlar yüksek mukavemetli hafif betonlarda, basınç dayanımı üzerinde en önemli parametrenin agrega dayanımı olduğunu ve basınç dayanımındaki artışın agrega dayanımı ile sınırlandırıldığını söylemişlerdir. Üretilen yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonlar, 28 günlük dayanımlarının %75 ile %80' nini ilk yedi günde tamamlamışlardır. Benzer durum Rossignolo et al. (2003) tarafında belirtilmiştir. Rossignolo et al. (2003) yüksek dayanımlı hafif betonların, basınç dayanımlarının büyük bir kısmını ilk yedi günde tamamladığını ifade etmişlerdir. Bunun nedeni; beton üretiminde kullanılan çimentonun erken dayanım kazanan portland çimentosu ve işlenebilirlik için kullanılan akışkanlaştırıcıların belirli dozaja kadar dayanım hızlandırıcı etkisinin olması şeklinde açıklamışlardır.



Şekil 4.4.1.1. Basmaç dayanımının zamana bağılı değişimi

Şekil 4.4.1.1’de görüldüğü gibi kontrol betonunda (No:8) 28 günden sonra dayanım artışı olmazken perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda artış devam etmiştir. Bunun nedeni perlit agregasının puzolanik aktiviteye sahip olmasıdır. Perlit agregasının puzolanik aktivite gösterdiği, üretilen betonların mekanik özelliklerinden ve kırılma yüzeylerinin incelenmesinde net olarak görülmüştür. Chandra and Bertsson (2003) bir betonun kırılma yüzeyi incelendiğinde, agrega yüzeyi ve matris yüzeyinde kalsiyum hidroksit kristal oluşumunun görülmesi o agreganın puzolanik aktiviteye sahip olmadığını bir göstergesi olduğunu söylemişlerdir.



Şekil 4.4.1.2. Normal agregalı betonda (Kontrol betonu) basınç dayanım testi sonrası görünüm

Kontrol betonunun (Normal agregalı beton) kırılma yüzeyleri incelendiğinde, Şekil 4.4.1.2 ve 4.4.1.3’de de görüldüğü gibi agrega ve matris yüzeyinde kalsiyum hidroksit kristalinin oluştuğu görülmüştür. Agregası ve matris yüzeyindeki kalsiyum kristal oluşumu kontrol betonunun bütün numunelerinde görülmüştür. Perlit agregalı beton numunelerde kırılma yüzeyleri incelenmiş ve Şekil 4.4.1.4’de görüldüğü gibi perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonda agrega yüzeyinde ve matriste herhangi bir kalsiyum hidroksit kristalinin oluşumuna rastlanmamıştır. Zhang and Gjørsv (1990) hafif agregaların benzer puzolanik aktivite gösterdiğini ve bu reaktivite sonucu, hafif agrega çimento hidrasyonu sonucu ortaya çıkan serbest kireç ile bağ yaparak agrega yüzeyi ile matrisin aderans kuvvetini artırdığını söylemektedirler.



Şekil 4.4.1.3. Normal agregalı betonda (Kontrol betonu) eğilmede çekme dayanım testi sonrası kırılma yüzeyi



Şekil 4.4.1.4. Basınç dayanım testi sonrası perlit agregalı hafif betonda görünüm

Katkılı betonların basınç dayanımları Çizelge 4.4.1.4'de verilmiştir. En yüksek basınç dayanımına, Çizelge 4.4.1.4'de görüldüğü gibi silis dumani katkıli beton karışımlarında (5, 6 ve 7 nolu numuneler) ulaşılmıştır. Şekil 4.4.1.1'de görüldüğü gibi silis dumani katkıli betonlarda dayanım artış oranı diğer katkısiz betonlara göre daha fazla ve lineer bir artış oluşmuştur. Katkısiz betonlarda, 28 günden 90 güne kadar %13 lük bir artış olurken, silis dumani katkıli betonlarda bu oran %28 kadar çıkmıştır.

Çizelge 4.4.1.4. Silis dumani ve lif katkıli karışımların basınç dayanım sonuçları

Numune No	Lif kg/m ³ (Vd)	Silis dumani kg/m ³	Çimento miktarı. kg/m ³	w/c	Basınç dayanımı (MPa) 100x100x100 mm ³ (küp numune)				
					Ölçüm zamanı (Gün)				
					7	14	28	60	90
1	50(80)	-	600	0,4	50	55	65	68	72
2	50(80)	-	600	0,5	48	52	61	63	66
3	50(55)	-	600	0,4	54	60	62	69	73
4	50(55)	-	650	0,4	55	63	65	77	80
5	-	60	600	0,3	66	77	79	88	110
6	-	50	550	0,3	70	76	82	86	100
7	50(80)	60	600	0,3	76	79	85	87	101
8	-	-	650	0,3	75	84	86	87	87

Her ne kadar'da Hoff (1990) ve Nvokschchenov and Whitcomb (1990) gibi araştırmacıların, yüksek dayanımlı hafif betonlarda, basınç dayanımı üzerinde en önemli parametrenin agrega dayanımı olduğunu ve basınç dayanımındaki artışın agrega dayanımı ile sınırlandırıldığını söylemiş olsalarda, Zhang and Gjorv (1990), Kayali *et al.*(2003) ve Cerny *et al.*(2006) gibi araştırmacılar da, puzolanik mineral katkı kullanarak bağlayıcı matris dayanımının artırılmasıyla, hafif agregalı betonların dayanımının artırılmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Benzer bilgiler Malhotra (1990), Anwar Hossain (2004) ve Nassif *et al.* (2005) gibi bir çok araştırmacı tarafında verilmiştir. Bunlar; matris dayanımının artırılması ile hafif betonlarda, dayanımın agrega çekme dayanımının üzerine çıkılabileceğini belirtmişlerdir. Bunu sağlamak için de silis dumani ve uçucu kül gibi puzolanik malzemenin kullanımının zorunlu olduğunu ifade etmişlerdir. Bütün dayanım testlerinde (Basınç, çekme, eğilme)

kırılmanın şekil 4.4.1.4'de görüldüğü gibi, iri hafif agreganın kesilmesiyle gerçekleştiği görülmüştür. Buradan agregaya dayanımı aynı kalmak şartı ile, matris dayanımını artırıp, agregaya gelecek yükü azaltarak, dayanımı artırmanın mümkün olduğu görülmektedir. Benzer durum Kılıç *et al.*(2003) tarafından belirtilmiştir. Kılıç *et al.*(2003) bazaltik pomza agregası ve farklı bağlayıcı kullanarak ürettikleri hafif betonlarda en yüksek basınç dayanımına (43,8 MPa) silis dumanı katkılı betonda ulaştıklarını, bunun nedenini; silis dumanının puzolanik etkisinden dolayı matris dayanımının diğer karışımlara göre daha yüksek olması olarak açıklamışlardır. Zhang and Gjorv (1990) ise puzolanik aktiviteye sahip hafif agregalarında, puzolan mineral katkıların yaptığı etkiye yakın bir etki yaptıklarını söylemektedirler. Yaptıkları çalışmada; matris dayanımı 6-9 MPa arasında değişirken, agregaya yüzeyindeki dayanım değerlerinin 9 ile 15 MPa arasında değiştiğini belirlemişlerdir. Buradan görüldüğü gibi agreganın puzolanik aktiviteye sahip olması, matris dayanımında %50'nin üzerinde bir artışa neden olmuştur. Bu durum, bu tip hafif agregaya ile üretilen betonların mekanik ve fiziksel özelliklerinde oldukça önemli değişimlere neden olmaktadır. Cerny *etal.*(2006) silis dumanı, uçucu kül ve benzeri puzolanik katkı maddelerinin hafif betonların basınç dayanımlarına oldukça önemli bir katkı sağladığını ortaya koymuşlardır. Bunun nedeni olarak; çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç ile puzolanların reaksiyonu sonucu ortaya çıkan ürünün çimento hamurunun yoğunluğunu ve dayanımını artırması, gösterilmektedir. Zhang and Gjorv (1991) beş farklı hafif agregaya üzerinde çalışma yapmışlar ve yaptıkları çalışmada; yüksek dayanımlı hafif betonların basınç dayanımları üzerinde en etkin faktörün agregaya dayanımı olduğunu belirlemişlerdir. Fakat çimento matrisini kuvvetlendirmekle, hafif agregalı betonların basınç dayanımlarını belli bir miktar daha artırmanın mümkün olduğunu da ifade etmişlerdir. Kayali *et al.* (2003) ise benzer malzemeleri kullanarak mineral katkıyı biraz artırarak basınç dayanımını 67,5 MPa kadar çıkarmayı başarmışlardır. Poon *et al.* (2006) silis dumanı ve uçucu külün basınç dayanımı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu, bu malzemelerin puzolanik aktivitelerinden dolayı, bu etkinin 7 günden sonra kendini gösterdiğini belirtmektedirler. Çünkü puzolanik malzemelerin 7 güne kadar basınç dayanımı üzerinde pek etkisinin olmadığı belirtilmektedir. Neville (1994) ve Aitcin (1998) ise agreganın yeterli dayanıma sahip olması durumunda, betonun basınç dayanımı ve elastiklik modülünün çimento matrisinin dayanımına bağlı olarak

değiştirdiğini ve agrega ile matris arasındaki aderans zayıflığının beton dayanımında %30'a varan bir azalmaya neden olduğunu belirtmektedirler. Bu durumun ancak w/c oranını düşürmek ve silis dumanı gibi puzolanik katkı kullanımıyla giderilmesinin mümkün olduğunu da söylemektedirler. Short and Kinniburgh (1978) yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş kil ve slate, pomza ve sinterize uçucu kül agregası gibi yaygın olarak kullanılan hafif agregaları kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üretimi üzerinde çalışmalar yapmışlardır. En yüksek dayanıma sinterize uçucu kül agregalı betonda 45 MPa olarak ulaşmışlardır. Basınç dayanımları arasındaki farkın nedenini, agreganın özelliğinden kaynaklandığını belirtmektedirler. Yüksek dayanımlı hafif betonun davranışının büyük bölümünü agreganın dayanımı ve elastiklik özelliği belirlemektedir (Baolbaki 1991; Zeldin and Aitcin 1991). Yapılan araştırmalarda; hafif agregalı betonların mekanik özellikleri üzerinde en etkili faktörün agrega dayanımı olduğu ve matris dayanımının artırılmasıyla, betonun basınç dayanımının agrega dayanımının üzerine çıkarmanın mümkün olduğu görülmüştür. Karışımlarda silis dumanını kullanımının nedeni; nihaiyi basınç dayanımını artırmak ve taze betonun vizkozitesini artırarak segregasyon riskini azaltmaktır (Novokschcnov and Whitcomb 1990). Yapılan çalışmada; silis dumanının perlit agregalı yüksek dayanımlı betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumlu yönde artırmakla birlikte, özellikle basınç dayanımı sırasında betonun gevrek kırılmasına neden olduğu belirlenmiştir. Normalde hafif agregalı hafif betonlarda basınç dayanımının artmasıyla bir gevreklik oluşmaktadır. Bu durum dayanımın artmasıyla dahada belirgenleşmektedir. Bu tür betonlarda sünekliği artırmak için Demiröz vd. (1994), Balendran *et al.*(2002), Chen and Liu (2004) ve Li *et al.* (2006) gibi bir çok araştırmacı karışımda lif kullanımını önermişlerdir.

Karışımda çelik lif kullanımı, yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonun basınç dayanımında bir artış sağlamamıştır. Bunların basınç dayanımları Şekil 4.4.1.1'de 1 ve 3 nolu egride görüldüğü gibi diğer katkısız perlit agregalı betonla benzer basınç dayanım göstermişlerdir. Lif betonun basınç dayanımını artırmasa da, sünekliğini artırmıştır. Lifsiz betonlar yük altında çok gevrek bir kırılma gösterirken, lifli betonlar Şekil 4.4.1.5'de görüldüğü gibi maksimum dayanımdan sonra sünek davranış göstererek

bütünlüğünü korumuşlardır. Basınç dayanımı yüksek olan lif ve silis dumanı katkıli betonda, maksimum dayanım sınırından sonra beton yüzeyinde yükün uygulama doğrultusuna paralel çatlaklar oluşurken, basınç dayanımı daha düşük olan lif katkıli betonda kırılma, numunenin orta bölgesinde ezilme ve çatlakların oluşmasından oluşmuştur. Benzer kırılma şekilleri Saradhi Babu *et al.* (2005)'un çalışmalarında'da görülmüştür. Li *et al.*(2006)'da lifin betonun basınç dayanımında bir artışa sebep olmadığını, fakat betonun daha sünek davranmasına sebep olduğunu belirtmektedirler.



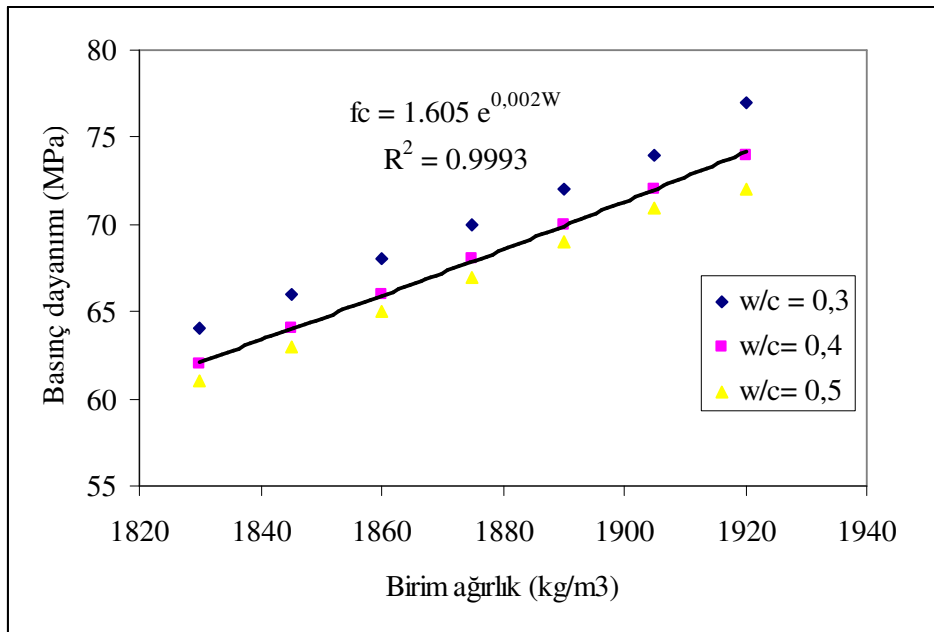
Şekil 4.4.1.5. Lif katkıli betonların basınç yükü altında kırılma şekilleri

Balendran *et al.*(2002) liflerin betonun basınç dayanımı üzerinde pek etkili olmadığını söylemişlerdir. Nataraja *et al.*(1999) ise betona çelik lifin katılmasının, betonun bir çok mühendislik özelliklerinde iyileştirme oluşturacağını belirtmektedirler. Özellikle darbe direnci, tokluğunu, eğilme ve çekme dayanımını ve betonun kırılma şeklini etkilediğini söylemektedirler.

Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların basınç dayanımları şekil 4.4.1.6'da görüldüğü gibi birim ağırlığa bağılı olarak değişmiştir. Birim ağırlık arttıkça betonun basınç dayanımı da artmıştır. Basınç dayanımı ile birim ağırlık arasındaki ilişkiyi yararlanarak, basınç dayanımının, birim ağırlığa bağılı olarak belirlenmesinde kullanılacak denklem 4.4.1.3'de verilen ampirik bir bağıntı elde edilmiştir.

$$f_c = 1,605 e^{0,002 W} \quad (4.4.1.3)$$

Elde edilen bu ampirik bağıntı, Zhang and Gorv (1991)'un önermiş olduğu ampirik bağıntı ile benzer sonuçlar vermektedir. Rossignola *et al.*(2003)'da hafif betonların mekanik özelliklerinin, birim ağırlığın artmasıyla arttığını belirtmektedirler. Benzer sonuçları sinterize uçucu kül agregası üzerinde çalışma yapan Kayali *et al.* (2003)'da belirtmiştir. Kayali *et al.*(2003) hafif betonun mekanik özelliklerinin büyük oranda betonun birim ağırlığın artmasıyla arttığını belirlemiştir.

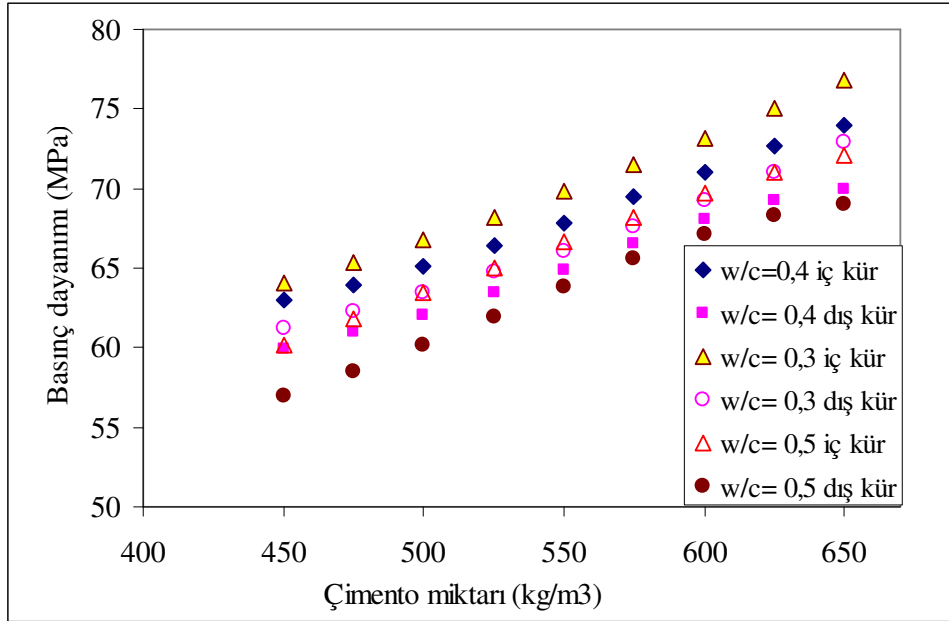


Şekil 4.4.1.6. Birim ağırlık basınç dayanımı arasındaki ilişki

Weigler and Karl (1980) hafif betonlarda basınç dayanımı ile birim ağırlık arasındaki ilişkinin lineer olduğunu söylemektedirler. Al-Khaiat and Haque (1998) ise laytag agregası kullanarak ürettikleri hafif betonlarda basınç dayanımı birim ağırlığa bağlı olarak lineer bir değişim gösterdiğini söylemektedirler. Benzer bir sonuçta Blanco *et al.* (2000) tarafından belirtilmiştir. Blanco *et al.* (2000)'da yüksek dayanımlı hafif betonlarda basınç dayanımı ile birim ağırlık arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu belirtmektedirler. Aynı agrega ve bağlayıcı kullanarak farklı çalışmalarda üretilen hafif betonlar benzer sonuç verirken, farklı agrega veya bağlayıcı kullanılarak üretilen betonlar aynı birim ağırlığa sahip olsalarda çok farklı basınç dayanım değeri verebilmektedirler. Berra and Ferrara (1990); Neville (1994); Aitcin (1998) ve Chandra and Berntsson (2003) gibi bir çok araştırmacı tarafından belirtildiği gibi, hafif betonların özellikleri kullanılan agrega ve bağlayıcıların özellikleriyle sınırlandırılmaktadır. Aynı zamanda Aitcin (1998); enyüksek birim ağırlığa sahip olan betonun, en yüksek mekanik özelliklere sahip olacağı anlamının çıkarılmasında yanlış olduğunu belirtmiştir. Bai *et al.*(2005)'da aynı birim ağırlığa sahip olan betonların farklı dayanıma sahip olabileceğini ifade etmektedirler. Bunun sebebi; yukarıda belirtildiği gibi aynı birim ağırlığa sahip hafif agregalar çok farklı rijitliğe sahip olabilmektedirler.

Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda çimento miktarının artmasıyla, basınç dayanımında bir artış oluşmuştur. Bunun sonucu olarak da Şekil 4.4.1.7'de görüldüğü gibi basınç dayanımı ile çimento miktarı arasındaki ilişki lineer olmuştur. Şekil 4.4.1.7'de görüldüğü gibi sadece dış küllerde 650 kg çimento miktarında grafiğin eğiminde bir değişim olmuş, iç küllerde ise grafiğin eğiminde bir değişim oluşmamıştır. Bunun anlamı da; dış küre tabi tutulan betonlarda çimento miktarı artırılırsa, basınç dayanımında bir artışın oluşmayacağıdır. Berra and Ferrara (1990), Zhang and Gjorj (1990) ve Novokshchenov and Whitcomb (1990) gibi bir çok araştırmacı yüksek dayanımlı hafif betonlarda 400 ile 600 kg/m³ arasında bir çimento miktarının kullanımını önermişlerdir. Çimento miktarının artırılmasının nedeni; matris kalınlığını artırarak matrise ve agregaya gelecek gerilmeyi azaltmaktır (Berra and Ferrara 1990; Neville 1994). Aitcin (1998) maksimum çimento miktarını, betonun basınç

dayanımında artış sağlamayan çimento miktarı olarak tanımlamıştır. Chen *et al.* (1999)'da yüksek dayanımlı hafif betonlarda çimento miktarının belirli miktardan sonra dayanım üzerinde etkili olmadığını belirtmektedirler. Çünkü betonun agrega ve çimentodan oluşan kompozit bir malzeme olduğunu, normal agregalı betonda dayanım kaybı, matrisin kırılmasıyla oluştuğunu ve burada matrisin önemli olduğunu, hafif betonlarda ise kırılmanın, iri hafif agreganın kırılmasıyla oluştuğunu ve buradada agreganın önemli olduğunu belirtmektedirler.

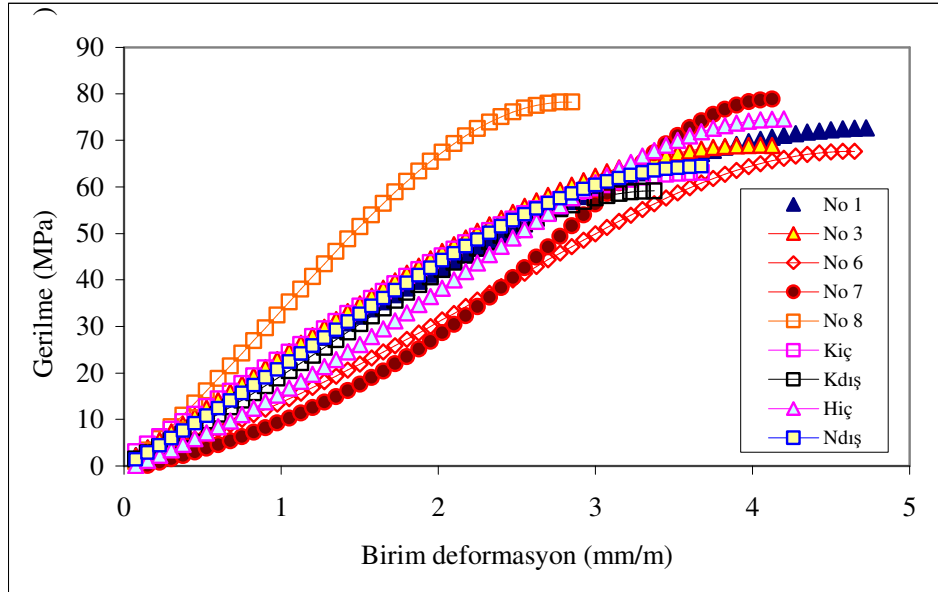


Şekil 4.4.1.7. Basınç dayanımı ve çimento miktarı arasındaki ilişki

Aitcin (1998) ve Chandra and Berntsson (2003) gibi araştırmacılar da yüksek dayanımlı hafif betonlarda çimento miktarı yerine, çimentonun dayanımının artırılmasının, beton dayanımı üzerinde daha etkili olacağını belirtmektedirler. Bunun için de çimentonun bir kısmının yerine silis dumanı veya uçucu kül gibi mineral kökenli puzolanik malzemelerin kullanımını önermektedirler. Yapılan çalışmada; çimentonun bir kısmının yerine silis dumanı kullanımında, perlit agregalı hafif betonun mekanik ve fiziksel bütün özelliklerinde olumlu artış görülmüştür.

4.4.2. Betonun gerilme deformasyon ilişkisi

Betonların birim deformasyon eğrileri, kullanılan agreganın rijitliğine, miktarına ve matrisin dayanımına bağlı olarak değişmektedir. Bu eğrinin şeklini etkileyen diğer faktörlerden biri de, iri agreganın yüzey dokusu ve şeklidir. Betonun iki bileşeni olan çimento ve agrega ayrı ayrı teste tabi tutulduğunda, çimentonunki daha düşük olmak üzere agreganın gerilme deformasyon eğrisiyle lineer bir grafik oluşturmaktadır. Betonun gerilme deformasyon eğrisi ise bu iki lineer eğri arasında parabol olarak devam etmektedir (Neville 1994; Aitcin 1997; Choi *et al.*2006). Agreganın ve matrisin gerilme deformasyon eğrileri lineer bir doğrudan oluşurken, betonun bu eğrisinin parabol olmasının nedeni; betonun elastiklik modülü deneyi sırasında, gerilmenin artmasıyla, agregaya göre daha düşük dayanıma sahip olan çimento matrisinde çatlakların oluşmasıdır. Oluşan bu çatlağın hareketinin agrega ve agrega matris aderansı tarafından sınırlandırılması sonucunda gerilme deformasyon eğrisinin şekli lineerden parabole dönüşür (Neville 1994).



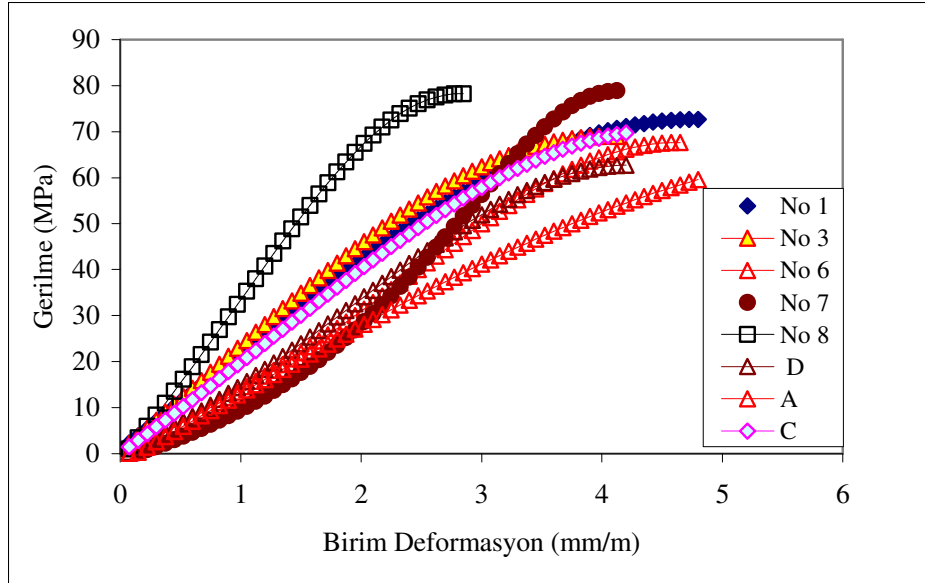
Şekil 4.4.2.1. Katkılı ve w/c oranı 0,3 olan betonların gerilme deformasyon eğrileri

Zhang and Gjorv (1991) yüksek dayanımlı hafif betonların gerilme birim deformasyon eğrilerinin, düşük mukavemetli hafif betonlarınkine göre daha lineer olduğunu söylemektedirler.

Betonun diğer özelliklerinin yanı sıra, özellikle yük altındaki davranışının bilinmesi, daha sağlıklı yapı tasarımına imkan sağlayacaktır. Genelde hafif agregalar, normal agregalara göre daha düşük elastiklik modülüne sahip olduklarından, hafif agregalı betonlar yük altında normal betonlara göre daha fazla deformasyon yapabilmektedir (Faust and Konig 1997).

Çalışmada bütün karışımlarda agrega ve miktarı aynı olduğu için gerilme birim deformasyon grafiği karışımın w/c oranına, çimento miktarına, kür şekline, silis dumanı ve lif katılmasına bağlı olarak değişmiştir. Şekil 4.4.2.1'de görüldüğü gibi kontrol betonu 2,55 mm/m'lik bir birim deformasyon gösterirken, w/c oranı 0,3 olan betonlar ($K_{iç}$, $K_{dış}$, $H_{iç}$ ve $N_{dış}$) 3,65 - 4 mm/m arasında deformasyon göstermiştir. Bu değerler birim ağırlık ve basınç dayanımının artmasıyla azalmış, azalmasıyla da artmıştır. Fakat Faust (1997) ve Faust and Konig (1998) ise tam tersini belirtmektedirler. Bunlar yapmış oldukları çalışmalarda, birim ağırlığı 1250 kg/m³ ve basınç dayanımı 20-25 MPa olan betonların, maksimum 2,3 mm/m'lik, birim ağırlığı 1700 kg/m³ ve basınç dayanımı 55-65 MPa olan betonların 3,6 mm/m'lik deformasyon yaptığını ifade etmişlerdir. Bu genelleme belki birim ağırlığı çok düşük olan hafif betonlar için geçerli olabilir, çünkü Bremner and Holm (1995) ve Balendran *et al.*(2002) birim ağırlığı çok düşük olan hafif betonların genelde yük altında oldukça gevrek kırıldığını belirtmektedirler. Birim ağırlığın çok düşük olması, agrega içerisinde çok ve büyük boşluğun olduğuna bir işarettir. Bu boşlukların büyük olması agreganın ve dolayısıyla betonun gevrek davranış göstermesine neden olmaktadır. Çünkü seramik malzemeler basınç dayanımı yüksek çekme dayanımı düşük olan malzemelerdir. Bu boşluklar yük altında agregada çekme gerilmeleri oluşturarak agreganın düşük yük altında ani ve gevrek kırılmalarına neden olmaktadır. Küçük boşluklar ise agreganın daha da sünek davranmasına neden olmaktadır. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda birim ağırlığın artması, perlit agregalarının bazı boşluklarının çimento hamuru ile dolması ve matrisin

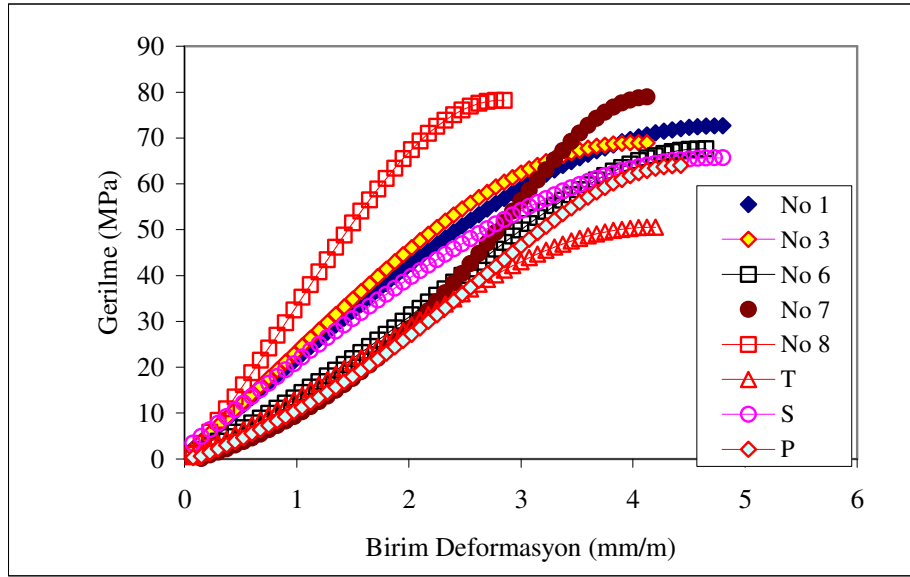
yoğunluğunun artmasıyla mümkün olmuştur. Agrega içerisindeki küçük boşlukların bir kısmının dolması ile agrega sünekliğinin azalması ve matris yoğunluğunun artmasıyla; agrega ile matris rijitlikleri arasındaki farkın büyümesi, bu betonları daha az sünek davranmaya zorlamaktadır. Şekil 4.4.2’de görüldüğü gibi w/c oranı 0,4 olan betonlarında gerilme deformasyon eğrileri w/c oranı 0,3 olan betonlarınkine oldukça benzerlik göstermektedir. Burada maksimum yük anındaki maksimum birim deformasyon biraz daha artmış ve grafiğin eğimi azalarak paraboloiden lineere doğru bir yaklaşım göstermiştir. Şekil 4.4.2.2’de görüldüğü gibi bu numunelerin (A, C ve D) birim deformasyonları 4,3 ile 4,70 mm/m arasında değişmiştir.



Şekil 4.4.2.2. Katkılı ve w/c oranı 0,4 olan betonların gerilme deformasyon eğrisi

Şekil 4.4.2.3’de görüldüğü gibi birim deformasyon diğer w/c oranlarına göre biraz daha artarak maksimum birim deformasyon 4,5 mm/m olarak ölçülmüştür. Nataraja *et al.* (1999) çelik lifin bütün betonların gerilme-deformasyon eğrisinin oluşumu üzerinde etkili olduğunu ve eksenel yük altındaki birim deformasyonda önemli oranda bir artış sağladığını belirtmektedirler. Bu etkinin hafif agregalı betonlarda daha fazla olduğunu söylemektedirler. Benzer durum, Balendran *et al.*(2002) tarafından da belirtilmektedir. Balendran *et al.* (2002) çelik lifin betonun sünekliği ve gerilme birim deformasyon

ergisi üzerinde önemli bir değişime neden olduğunu ve bu etkinin, hafif betonlarda normal betonlara göre fazla olduğunu ifade etmektedirler. Çelik lif, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda da Balendran ve Natajara tarafından belirtilen etkilere benzer etkiler yapmıştır. Lifin katılmasıyla Şekil 4.4.2.3'te 1 ve 3 nolu eğrilerde görüldüğü gibi, grafiğin eğimi ve maksimum yük altındaki birim deformasyonunda %15'lik bir artış ölçülmüştür. Silis dumanının katılmasıyla 6 nolu eğriden de görüldüğü gibi, gerilme deformasyon eğrisinde ve maksimum birim deformasyonda %5'lik bir düşüş ölçülmüştür.



Şekil 4.4.2.3. Katkılı ve w/c oranı 0,5 olan betonların gerilme deformasyon eğrisi

Lif ve silis dumanının birlikte katılmasıyla 7 nolu eğriden de görüldüğü gibi, maksimum birim deformasyon olarak diğer lifli betonlar ile benzer birim deformasyon göstermiş fakat grafiğin şekli, lineerden çok parabole yaklaşmıştır. Bunun nedeni lif ve silis dumanının kullanımıyla, bir birine yakın olan agrega ve matris dayanımları arasında, bir rijitlik farkının oluşması ve lifin normal betondaki agrega gibi çatlak sınırlayıcı olarak davranmasıdır. Yüksek dayanımlı betonlarda, gerilme deformasyon eğrisinin yükselme ve alçalma kısımları oldukça keskindir (Neville 1994; Aitcin 1998). Berra and Ferrara (1990) ise yüksek dayanımlı hafif betonların gerilme deformasyon eğrisinin maksimum

yüke kadar yukarı doğru lineer bir artış gösterdiğini, bu noktadan sonra ise hızlı bir şekilde düşüş gösterdiğini, beton dayanımının artmasıyla bu durumun daha da belirginleştiğini belirtmektedirler. Bunun nedeni bu tür betonların kırılma anlarında oldukça az bir deformasyon göstermeleridir. Lifsiz olan bütün numunelerde maksimum gerilme sonrası, ani ve gevrek kırılma olduğundan, okuma yapılamamıştır. Hafif agregalı hafif betonlarda, agregası normal ağırlıklı betondaki gibi, çatlak sınırlayıcı olarak davranmadığından, hafif betonlarda maksimum gerilme sonrası kırılma hızlı ve gevrek olmaktadır (Neville 1997; Faust and Gert Konig 1997). Gerilme deformasyon deneyi sırasında, maksimum gerilme değerinden sonra, lif katkılı betonlarda bir okuma daha yapılabilmiştir. Maksimum gerilmeden sonraki bu okumada; gerilme değeri maksimum gerilmenin %25'ne düşerken dikey deformasyon %40 artmış ve yanal genişleme ise iki katına çıkmıştır.

4.4.3. Betonun elastiklik modülü

Betonun elastiklik özelliği, yapıların ve yapı elemanlarının yük altındaki davranışını etkileyen basınç dayanımından sonraki en önemli özelliğinden biridir. Zhang and Gjorv (1991), Neville (1994) ve Choi *et al.*(2006) bu özelliğin de büyük oranda karışımda kullanılan agreganın rijitliğine bağlı olarak değiştiğini belirtmektedirler. Bu çalışmada üretilen perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların ASTM C 469'a göre yapılan deney sonucunda elde edilen statik elastiklik modülleri Çizelge 4.4.3.1'de verilmiştir. Çizelge 4.4.3.1' de görüldüğü gibi bu betonların statik elastiklik modülleri 16,5 ile 26,7 GPa arasında değişmiştir. Aynı çalışmada normal agregası kullanarak üretilen benzer dayanıma sahip kontrol betonunun statik elastiklik modülü ise 32,8 GPa olarak belirlenmiştir. Bütün karışımlarda agregası ve oranı aynı olduğu için, betonun elastiklik modülündeki değişimin nedeni, w/c oranı ve bağlayıcı miktarındaki değişim ile bazı karışımlara silis dumanı ve lif katılmasıdır. Lifin katılması betonun statik elastiklik modülü üzerinde %10'luk bir artış sağlarken, silis dumanının katılması %9 luk bir artış sağlamıştır. Silis dumanının, bu çalışmadaki etkilerine benzer etkiler yaptığı, Berntsson and Chandra (2003), Chen and Liu (2004) ve Bhanja and Sengupta (2005) gibi araştırmacılar tarafından belirtilmektedir. Bu araştırmacılar, mineral kökenli

puzolanların, betonun elastiklik modülü üzerinde %10 ile %15 arasında değişen bir artış sağladığını belirtmektedirler. Elde edilen bu sonuçlar, Neville (1994), Aitcin (1998), Anwar Hossain (2004) ve Kayali (2005) gibi bir çok araştırmacının bulmuş oldukları veya önermiş oldukları sonuçlarla oldukça benzerlik göstermektedir.

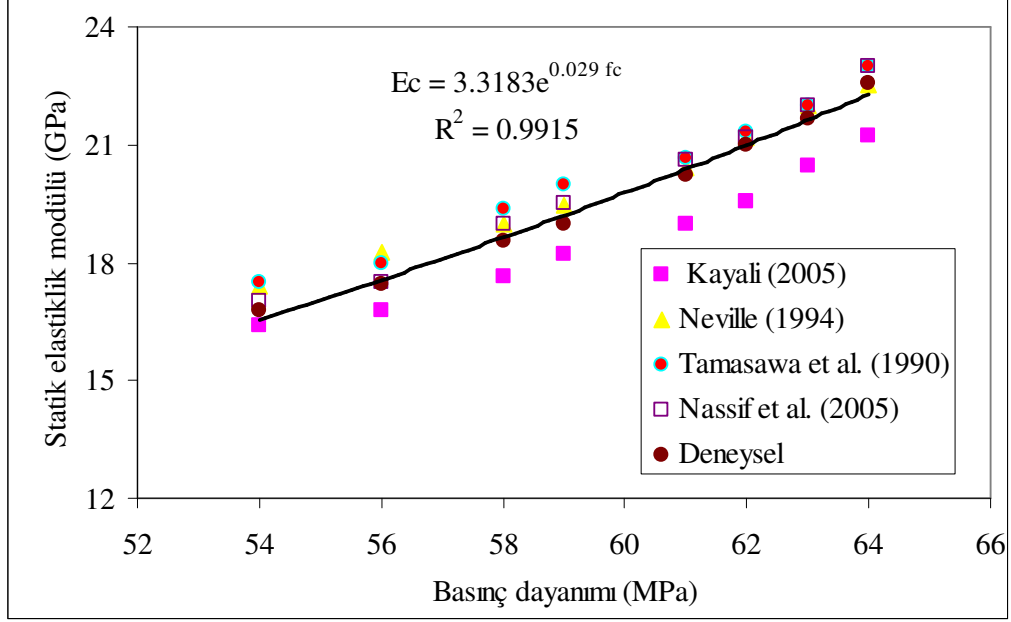
Çizelge 4.4.3.1. Perlit agregalı yüksek dayanımlı betonların elastiklik modülleri

Num. No	Bağlayıcı miktarı Kg/m ³	W/C	Elastiklik modülü		Poisson Oranı
			E _c (GPa)	E _d	
A	500	0,4	18,85	23,5	0,304
B	550	0,4	19,3	24,40	0,295
C	600	0,4	20,5	25,9	0,278
D	650	0,4	23,65	29,8	0,269
E	450	0,4	17,25	21,80	0,310
H	550	0,3	19,9	25,2	0,278
I	600	0,3	24,5	30,9	0,260
K	650	0,3	25	31,51	0,258
M	500	0,3	18,75	23,70	0,270
N	450	0,3	18,18	23	0,297
O	650	0,5	20,18	25,5	0,285
P	600	0,5	19,5	24,6	0,299
S	500	0,5	17	21,60	0,310
T	450	0,5	16,5	20,90	0,320
1	600+50kg lif(80)	0,4	25,5	37	0,245
2	600+50kg lif(80)	0,5	25,1	36,5	0,258
3	600+50kg lif(55)	0,4	24,1	36	0,235
4	650+50kg lif(55)	0,4	25,2	36,3	0,225
5	600+50kg S. D.	0,3	26,7	37	0,218
6	550+50kg S. D.	0,3	24,75	32	0,230
7	600+60kg S.D+50kg lif	0,3	26,18	38	0,225
8	650 (Kontrol betonu)	0,3	32,8	39,8	0,18

Neville (1989, 1994) hafif betonların elastiklik modülünün, normal ağırlıklı betonların elastiklik modülünün %40 ile %70 ve Anwar Hossain (2004) ise yüksek dayanımlı hafif betonların elastiklik modülünün; aynı mukavemete sahip normal agregalı betonların elastiklik modülünün %40 ile %80 arasında değiştiğini belirtmektedirler. Hafif betonların elastiklik modülünün düşük olmasının nedeni; hafif agregaların boşluklu ve gevrek bir yapıda olmasına bağlamaktalar. Zhang and Gjorv (1991) yapmış

oldukları çalışmada ürettikleri yüksek dayanımlı hafif agregalı betonların elastiklik modülünün 17,8 ile 25,9 GPa arasında, Kayali (2005) ise bunlardan farklı bir hafif agregalı kullanarak ürettiği yüksek dayanımlı hafif betonun elastiklik modülünü 23.7 GPa olarak belirlemiştir. Neville (1994) ve Aitcin (1999) basınç dayanımı 50 ile 90 MPa arasında değişen normal agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların elastiklik modüllerinin, kullanılan agreganın elastiklik modülüne bağlı olarak 30 ile 40 GPa arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların ASTM C 469'a göre belirlenen statik elastiklik modülleri, benzer dayanıma sahip normal ağırlıklı yüksek dayanımlı betonların elastiklik modülünün %50'si ile %80'i arasında değişmiştir. Bulunan sonuçlar Neville (1989, 1994) ve Anwar Hossain (2004) tarafından belirtilen limitler arasında kalmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, betonun elastiklik modülünün, birim ağırlık ve basınç mukavemeti ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Birim ağırlık ve basınç dayanımının betonun elastiklik modülü üzerindeki etkisini yaptıkları çalışmalarda gören, Tamasawa *et al.* (1990), Neville (1994), Aitcin (1998), Kayali (2005) ve Nassif *et al.* (2005) gibi bir çok araştırmacı, hafif ve normal ağırlıklı yüksek dayanımlı betonların elastiklik modülünü teorik olarak belirlemek için birim ağırlık ve basınç dayanımına bağlı olarak değişen bir çok ampirik bağıntılar önermişlerdir. Haque *et al.* (2004)'de birçok araştırmacının; betonun elastiklik modülünü belirlemek için, birim ağırlığa ve basınç dayanımına bağlı olarak değişen bağıntılar önerdiklerini belirtmektedir. Teorik ve deneysel olarak belirlenen elastiklik modülü değerleri arasında bazen büyük farkların olabileceğini, bu farkında; betonun elastiklik modülünün birim ağırlık ve basınç dayanımının yanında iri agreganın çeşidine, yüzey dokusuna, üretilen hafif betonun normal ağırlıklı, normal ve hafif agregalı karışımı veya tamamı hafif agregalı kullanılmasına bağlı olarak değişmesinden ortaya çıktığını belirtmektedirler. Yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif beton üzerinde yapılan deney ve testlerden elde edilen sonuçları değerlendirmek ve diğer çalışma sonuçlarıyla kıyaslamak için, çalışmada elde edilen birim ağırlık ve buna tekabül eden basınç dayanım verileri, diğer araştırmacılar tarafından önerilen ampirik formüllerde yerine konarak, teorik olarak da elastiklik modülü belirlenmiştir. Basınç dayanımına bağlı olarak, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların, teorik olarak elastiklik modülleri denklem 4.4.3.1 ile belirlenebilir. Şekil 4.4.3.1'de deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların bir birine oldukça yakın olduğu ve basınç dayanımının artmasıyla bu

ilişkinin dahada yakınlaştığı görülmektedir. Deney sonucu elde edilen değerler ile farklı araştırmacılar tarafından önerilen ampirik bağıntıların kullanımıyla elde edilen değerler arasında küçük farkların oluşması doğaldır, çünkü çalışmalarda farklı rijitlik, birim ağırlık, şekil ve yüzey dokusuna sahip hafif agregalar kullanılmıştır. Şekil 4.4.2.1’de görüldüğü gibi, volkanik orijinli agrega kullanılan hafif betonların (Tamasawa *et al.* 1990; Nassif *et al.* 2005) teorik olarak belirlenen elastiklik modülü, termal işlem sonucu elde edilen hafif agregalı betonlarınkinden (Kayali 2005) biraz daha yüksektir. Buradaki fark, aynı basınç dayanımına sahip sinterize agregalı hafif betonların birim ağırlıklarının, diğer hafif betonlara göre %10 ile %15 daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Gerçekte ise sinterize agregalar, diğer hafif agregalara göre daha rijit oldukları için bu agregalardan üretilen hafif betonların elastiklik modülleri daha yüksek olabilir. Anwar Hossain (2004) ve Zhang and Gjorv (1991) ise volkanik orijinli agregaların rijitliklerinin, sinterize agregaların rijitliğinden daha düşük olduğunu, buna rağmen betonlarının benzer elastiklik modülü vermelerinin nedenini, volkanik orijinli agregaların şekil ve yüzey dokularının elastiklik modülünü artırıcı etki yapmasına bağlamaktadırlar.



Şekil 4.4.3.1 Basınç dayanımı ile statik elastiklik modülü arasındaki ilişki

Betonların elastiklik modülleri agrega rijitliği, matris dayanımı, agrega ile matris arasındaki aderans, agrega geometrisi ve yüzey dokusu gibi bir çok değişkene bağlı olarak değiştiği için deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar arasında farkın olması normaldir. Önemli olan bu farkın, kabul edilebilir sınırlar arasında kalmasıdır.

Yaptığımız çalışmalar sonucunda, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonun, teorik elastiklik modülünün, betonun basınç dayanımına bağlı olarak denklem 4.4.3.1 ile belirlenmesinin uygun olduğu görülmüştür.

$$E_c = 3,3183 e^{0.029 f_c} \text{ (GPa)} \quad (4.4.3.1)$$

Betonun diğer elastiklik modülü olan dinamik elastiklik modülü üzerinde, her zaman saf elastiklik etkili olmakta, sünmenin bir etkisi olmamaktadır. Dinamik elastiklik modülü genelde statik elastiklik modülü deneyinde elde edilen başlangıç tanjant modülüne yaklaşık bir değerdir. Bu değer her zaman statik elastiklik modülünden daha büyüktür (Neville 1994). Neville (1994) ve Aitcin (1998) bu iki modül arasındaki farkın

betondaki heterojenlikten kaynaklandığını, bu farkın da %20 ile %40 arasında değişebileceğini belirtmektedirler. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların dinamik elastiklik modülü, betonların ultrasonik ses geçiş hızı ve poisson oranı kullanılarak Neville (1994) 'ün önermiş olduğu ampirik formül 4.4.3.2. kullanılarak belirlenmiştir. Bu betonların statik ile dinamik elastiklik modülleri arasındaki ilişki denklem 4.4.3.3'de verilmiştir.

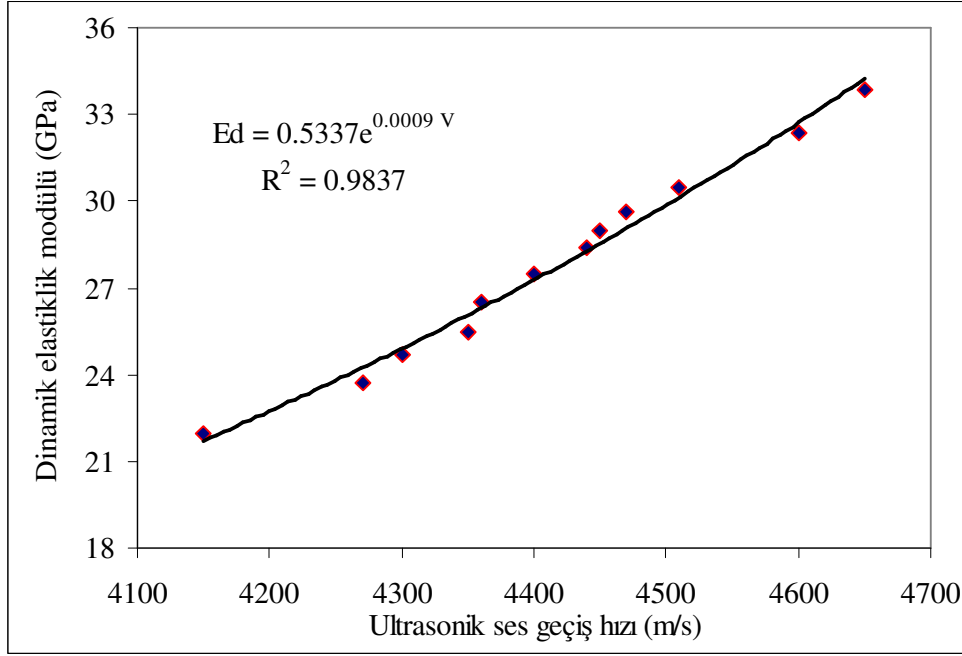
$$E_d = \rho V^2 (1+\mu) / ((1-\mu)) \text{ (GPa)} \quad (4.4.3.2)$$

$$E_d = 1,250 E_c + 0,51 \text{ (GPa)} \quad (4.4.3.3)$$

Elde edilen modüller arasında %20 ile %35 arasında bir farkın ve basınç dayanımının artmasıyla bu orandada bir artışın olduğu görülmüştür. Chang *et al.* (2006)'da yapmış oldukları çalışmada, betonun dinamik elastiklik modülünün, statik elastiklik modülünden %41 daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Farklı agrega kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların elastiklik modülleri arasında büyük farkların olabileceği ve bu farkın özellikle dinamik elastiklik modülünde dahada belirginleşmektedir. Birim ağırlığın bir birine yaklaşmasıyla, bu farkın azaldığı, artmasıyla da arttığı gözlemlenmiştir. Buna en bariz örnek; Sarı and Paşamehmetoğlu (2005) pomza agregası kullanarak ürettikleri hafif betonun dinamik elastiklik modülünü 10 GPa olarak belirlemişlerdir. Bu betonun birim ağırlığı 1300 kg/m^3 ve ultrasonik ses geçiş hızını da 2814 m/s olarak belirlemişlerdir. Bu değerlerin, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların sonuçlarına göre oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedenleri; pomza agregasını perlite göre daha düşük birim ağırlığa ve yüksek su emme oranına sahip olması ve agregalar arasındaki rijitlik farkıdır. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların, dinamik elastiklik modülü ile ultrasonik ses geçiş hızı arasındaki ilişki, Şekil 4.4.3.2' de görülmektedir. Şekil 4.4.3.2'de görüldüğü gibi ultrasonik ses geçiş hızının artmasıyla betonun dinamik elastiklik modülündede bir artış oluşmuştur. Bu betonların dinamik elastiklik modülü teorik olarak denklem 4.4.3.3 ile belirlenebilir.

$$E_d = 0,5337 e^{0,0009 V} \text{ GPa} \quad (4.4.3.3)$$

Lif ve silis dumanı betonun basınç dayanımı ve statik elastiklik modülü üzerinde çok fazla etkili olmaz iken, dinamik elastiklik modülünde %50'ye varan bir artış sağlamıştır. Ultrases değerlerini farklı yönlerde yaklaşık %14 ile %15 bir farklılık göstermiştir.



Şekil 4.4.3.2. Ultrasonik ses geçiş hızı ile dinamik elastiklik modülü arasındaki ilişki

4.4.4. Çekme dayanımı

Erdoğan (2003) betonun çekme dayanımını; betonda çekme etkisi oluşturacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlamaktadır. Betonun çekme dayanımı üç değişik yöntem kullanılarak belirlenmektedir.

1-Çekme yüklerinin doğrudan uygulanmasıyla (Pul-off test)

2-Çizgisel basınç yükünün uygulanmasıyla (Yarmada-çekme dayanımı)

3-Kiriş numunelere eğilme yükünün uygulanmasıyla (Eğilmede- çekme dayanımı)

Bu üç yöntemle elde edilen sonuçlar bir birinden farklılık göstermekte ve eğilmede çekme dayanımı > Yarmada çekme dayanımı > doğrudan çekme dayanımı gibi bir

sıralanma mevcuttur (Neville 1994; Aitcin 1998;, Erdoğan 2003). Bu fark, yapılan kabüllerden ve çekme dayanımını belirlemede kullanılan yöntem ve formüllerden kaynaklanmaktadır (Erdoğan 2003). Betonun çekme ve basınç dayanımları bir birleriyle yakından ilişkilidir (Neville 1994, Aitcin 1998, Erdoğan 2003). Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif beton numunelerin yarmada ve eğilmede çekme dayanımları ASTM C 469 ve ASTM C 78'e göre belirlenmiştir. W/C oranı 0,3 olan numunelerin sonuçları Çizelge 4.4.4.1'de , w/c oranı 0,4 olan numunelerin sonuçları Çizelge 4.4.4.2'de ve w/c oranı 0,5 olan numunelerin sonuçları Çizelge 4.4.4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.4.4.1. W/C oranı 0,3 olan karışımın çekme dayanım sonuçları

Numune No	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	
	28 Gün	60 Gün	28 Gün	60 Gün
Hiç	5,86	6,07	6,31	6,53
Hdış	5,74	5,83	6,17	6,26
İiç	6,22	6,32	6,69	6,80
Idış	5,74	5,83	6,17	6,26
Kiç	6,64	6,82	7,14	7,33
Kdış	6,10	6,32	6,56	6,80
Miç	4,26	5,21	4,58	5,60
Mdış	4.11	4,58	4,41	4,93
Niç	3.68	4,71	3,96	5,06
Ndış	3.05	4,22	3,28	4,53

Çizelge 4.4.4.2. W/C oranı 0,4 olan karışımın çekme dayanım sonuçları

Numune No	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	
	28 Gün	60 Gün	28 Gün	60 Gün
Aiç	4,26	4,46	4,58	4,8
Adış	4,11	4,22	4,42	4,53
Biç	5,35	5,50	5,75	6,26
Bdış	4,83	5,08	5,19	5,46
Ciç	4,70	5,83	5,81	6,35
Cdış	4,12	4,71	5,32	5,96
Diç	5,83	6,20	6,09	7,16
Ddış	5,56	5,80	5,29	6,66
Eiç	3,35	4,41	4,17	5,09
Edış	3,19	3,96	3,86	4,33

Çizelge 4.4.4.3. W/C oranı 0,5 olan karışımın çekme dayanım sonuçları

Numune No	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	
	28 Gün	60 Gün	28 Gün	60 Gün
Oiç	5,80	6,08	5,97	6,76
Odış	5,08	5,50	4,98	5,73
Piç	5,13	5,76	5,52	6,45
Pdış	4,26	4,63	4,58	5,30
Riç	5,13	5,45	5,52	5,87
Rdış	4,05	4,50	4,78	4,87
Siç	3,95	4,46	5,17	5,73
Sdış	3,10	3,43	4,71	5,03
Tiç	3,71	4,35	4,06	4,85
Tdış	3,12	3,36	4,03	4,44

Bütün çekme deneylerinde çekme kırılması, basınç dayanımında olduğu gibi iri agreganın kesilmesiyle oluşmuştur. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların yarmada çekme dayanımları, basınç dayanımlarının %8 ile %11 ve eğilmede çekme dayanımları, basınç dayanımlarının %8 ile %12' si arasında değişmiştir. Farklı hafif agrega kullanılarak üretilen yüksek dayanımlı hafif beton üzerinde yapılan çalışmalarda; Malhotra (1990) sinterize ucucu kül agregası kullanarak yaptığı çalışmada basınç dayanımı 66,5 MPa olan yüksek dayanımlı hafif betonların eğilmede çekme dayanımını,

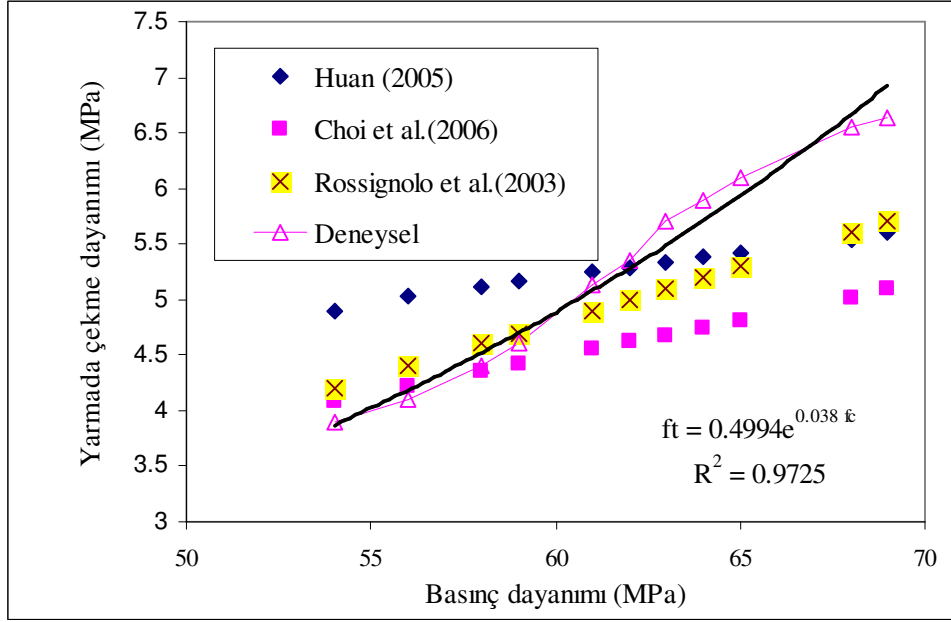
basınç dayanımının %5,26 ile %7,8 ve eğilmede çekme dayanımını, basınç dayanımının %13'ü olarak belirlemiştir. Novokshchenov and Whitcomb (1990) genişletilmiş kil agregası kullanarak yaptıkları çalışmada; basınç dayanımı 50 ile 60 MPa arasında değişen yüksek mukavemetli hafif betonların, eğilmede çekme dayanımlarını basınç dayanımlarının %12 kadar olduğunu belirlemiştir. Blanco *et al.* (2000) sinterize uçucu kül agregası (Conespheres) kullanarak elde ettikleri betonların basınç dayanımı 28,8 ve 30 MPa iken aynı betonların eğilmede çekme dayanımlarını basınç dayanımının %15'i olarak belirlemiştir. Haque *et al.* (2004) Laytag iri agrega ve çöl kumu kullanarak ürettikleri betonların yarmada çekme dayanımlarını, basınç dayanımının %6,67 ve eğilmede çekme dayanımları %9,10 olduğunu belirlemiştir. Rossignola *et al.* (2003) Brezilya hafif agregası kullanarak ürettikleri betonun çekme dayanımlarının, basınç dayanımına oranları %7,7 ile %10,2 arasında değiştiğini ve bir yıl sonraki artışlarda basınç dayanımının daha fazla olduğunu gözlemlemiştir. Gao *et al.* (1997) basınç dayanımı 85,4 MPa olan yüksek dayanımlı hafif betonun yarmada çekme dayanımı basınç dayanımının %5,7'si ve eğilmede çekme dayanımını basınç dayanımının %7,3 olduğunu belirlemiştir. Zhang and Gjorv (1990) yapmış oldukları çalışmada, elde ettikleri yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımlarını, basınç dayanımlarının %6,5'si olarak belirlemişler. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda, basınç dayanımının artmasıyla çekme dayanımının, basınç dayanımına oranında bir artış olurken, Malhotra (1990), Novokshchenov and Whitcomb (1990), Blanco *et al.* (2000) ve Haque *et al.* (2004) gibi bir çok araştırmacı ise yapmış oldukları çalışmalarda, basınç dayanımının artmasıyla çekme dayanımının, basınç dayanımına oranında'da bir azalmanın oluştuğunu söylemişlerdir. Bunun sebebini çekme dayanımının, iri hafif agreganın çekme dayanımı ile sınırlandırılmasına bağlamışlardır. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonda ise tam tersi oluşmuştur. Bunun sebebi; karışım sırasında perlit agregası içerisine gözeneklerden enjekte olan çimento matrisinin, perlit agregasının çekme dayanımını artırmasından, çekme gerilmesindeki artış, basınç dayanımındaki artışa paralellik göstermiştir. Bu sonuçlara göre, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımı bakımından, diğer hafif betonlarla bir benzerlik göstermekle birlikte daha yüksek çekme dayanım değerleri vermiştir. Perlit agregasının puzolanik aktiviteye sahip olmasından dolayı, elde edilen yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonların özelliklerinde bu puzolanik aktivitenin

etkisi görülmüştür. Aynı çalışmadaki kontrol betonunda yarmada çekme dayanımı, basınç dayanımının %9,5 ve eğilmede çekme dayanımı ise basınç dayanımının %10'u olarak belirlenmiştir. Karışımda w/c oranının azalması ve çimento miktarının artmasıyla üretilen hafif betonun çekme dayanımlarında bir artış olmuştur. Çekme dayanımlarındaki artış oranı normal ağırlıklı ve diğer hafif betonlara göre daha yüksek çıkmıştır. Bu da perlitin puzolanik aktiviteye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Hafif agreganın puzolanik etkisi, Anwar Hossain (2003) yapmış olduğu çalışmada görülmekle birlikte, matris dayanımını, agregaya yüzeyinde 9 MPa ve diğer bölgede 6 MPa olarak belirlemiştir. Aradaki farkın nedeni; agregaya yüzeyinde puzolanik aktiviteden dolayı matris yoğunluğu ve dayanımının artması olarak açıklanmıştır. Neville (1994) puzolanik aktivitenin, üretilen hafif betonların çekme, eğilme, basınç ve elastiklik modülü gibi mekanik ve su emme, ultrases ve birim ağırlık gibi bazı fiziksel özelliklerin de olumlu etkilere neden olduğunu belirtmiştir. Elde edilen deneysel çekme gerilmesi sonuçlarıyla basınç dayanımı arasında bir ilişkinin olduğu görülmüştür. Diğer araştırmacıların sonuçlarında olduğu gibi basınç dayanımının artmasıyla çekme dayanımında da bir artış oluşmuştur. Basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi belirlemek için elde edilen deneysel sonuçlar kullanılarak Şekil 4.4.4.1'deki görülen grafik çizilmiştir. Çekme dayanımı ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi yararlanılarak, çekme dayanımının basınç dayanımına bağlı olarak hesaplanmasında kullanılacak bir denklem elde edilmiştir. Bulunan bu ampirik formül denklem 4.4.4.1'de verilmiştir. Bu bağıntı sadece lif ve silis dumanı katkısız olan yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif beton için geçerlidir. Bhanja and Sengupta (2005) genelde betonun kalitesini belirlemek için basınç dayanımının belirlenmesinin yeterli olacağını belirtmişlerdir. Betonun diğer mekanik özelliklerinin ise basınç dayanımına bağlı ampirik formüllerle bulunmasını önermektedirler.

$$f_t = 0,4994 e^{0,038 f_c} \quad (4.4.4.1)$$

Farklı hafif agregaya kullanılarak üretilen normal ve yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımlarının basınç dayanımına bağlı olarak teorik olarak belirlenmesi için bir çok araştırmacı tarafından farklı ampirik formüller önerilmiştir. Basınç dayanımı testi

sonucu elde edilen basınç dayanım değerleri Rossignolo *et al.* (2003), Huan (2005) ve Choi *et al.* (2006) gibi araştırmacıların önermiş oldukları ampirik formülde yerine konarak çekme dayanım değerleri teorik olarak belirlenmiştir

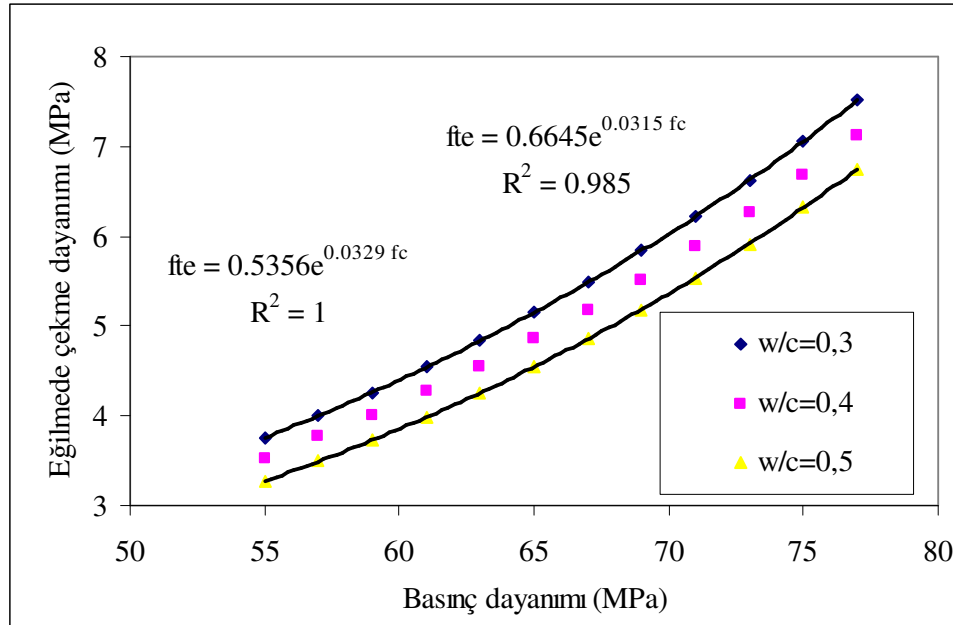


Şekil 4.4.4.1 Basınç ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Deneysel sonuçlarla teorik sonuçları ve perlit agregalı hafif betonlar ile diğer hafif betonları kıyaslamak için basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki grafik çizilmiştir. Düşük basınç dayanımında, endüyük çekme dayanım değeri, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonda elde edilmiştir. Basınç dayanımının artmasıyla perlit agregalı betonların çekme dayanımları artarak Şekil 4.4.4.1'de görüldüğü gibi Rossignolo *et al.* (2003), Huan (2005), Choi *et al.* (2006)'un bulmuş olduğu değerleri geçerek maksimum olmuştur. Rossignolo *et al.* (2003), Huan (2005), Choi *et al.* (2006) gibi araştırmacıların yapmış oldukları çalışmalarda, çekme dayanımındaki artışın, basınç dayanımındaki artışa oranına sabit kalırken, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda bu oran sabit kalmamıştır. Basınç dayanımının artmasıyla bu oranda artarak daha yüksek çekme dayanım değeri elde edilmiştir. Hafif betonlarda çekme dayanımı, belli değere kadar basınç dayanımının artmasıyla artmakta, belli değerden

sonra basınç dayanımı artsada, çekme dayanımında bir artış oluşmamaktadır. Çünkü hafif betonlarda çekme dayanımı, iri hafif agreganın çekme dayanımı ile sınırlanmaktadır (Aitcin 1998). Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonlarda, çekme dayanımının basınç dayanımına oranının, basınç dayanımının artmasıyla artmasının nedeni; perlit agregasının puzolanik aktivite göstermesinden dolayı, agregaya yüzeyi ile temas eden matrisin dayanımının, diğer bölgedeki matris dayanımına göre daha yüksek olması ve agregaya yüzeyindeki boşlukların çimento matrisi ile dolarak, agreganın çekme dayanımını artırmasıdır. Al-Khait and Haque (1998) ise ürettikleri yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımlarını, basınç dayanımlarının %8,3 olarak belirlemişler. Chen and Liu (2004) ürettikleri yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımları, basınç dayanımlarının %8 ile %11 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Balendran *et al.* (2002) normal ağırlıklı yüksek dayanımlı betonların, yarmada çekme dayanımlarının, basınç dayanımının %3,9 ile %9 arasında değiştiğini göstermişlerdir. Bu durumun yüksek dayanımlı hafif betonlarda ise %6,5 ile %7 arasında değiştiğini söylemektedirler. Turanlı (2005) perlit agregası kullanarak ürettiği hafif betonun çekme dayanımını, basınç dayanımının %8,64 olarak belirlemiştir. Yapılan bütün çalışmalarda betonun basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasında bir ilişkinin olduğu görülmekle birlikte, aynı basınç dayanımına sahip betonların, farklı çekme gerilmesine sahip olabileceği görülmektedir. Bunun nedeni; betonun çekme gerilmesinin agregaya cinsine, şekline ve yüzey dokusuna, bağlayıcı miktarı ve cinsine, w/c oranına ve kür şekline bağlı olarak değişmesidir. Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların çekme dayanımları üzerinde farklı kürün etkisi, Çizelge 4.4.4.1, 2 ve 3'de görüldüğü gibi %3 ile %18 arasında değişmiştir. Karışımın w/c oranı düştükçe kürün etkisi azalmış, arttıkça artmıştır. Çekme dayanımın zamana bağlı değişimi ise basınç dayanımı ile benzerlik göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı üzerinde etkin olan faktörler, eğilmede çekme dayanımı üzerinde aynı şekilde etkili olmuştur. Şekil 4.4.4.2'de görüldüğü gibi elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonların eğilmede çekme dayanımları, karışımın w/c oranına ve basınç dayanımına bağlı olarak bir artış göstermiştir. Bütün karışımlarda agregaya oranı sabit olduğu için çekme dayanımındaki değişimin nedenleri; w/c oranı, bağlayıcı miktarı ve kür şeklidir. Kür şeklinin çekme dayanımları üzerindeki etkisi, basınç mukavemeti üzerindeki etkisinden daha fazla olduğu görülmüştür. Basınç ve yarmada çekme dayanımında olduğu gibi burada da

perlit agregasının yüzey dokusunun ve puzolanik aktivitesinin etkisi görülmüştür. Grafik şeklinin iç bükey olması, basınç dayanımının arttıkça eğilmede çekme dayanımında artacağına bir işarettir. Oysa; Aitcin (1998), Kayali *et al.* (2003), Chandra and Berntsson (2003) ve Anwar Hossain (2004) gibi bir çok araştırmacı, hafif betonların basınç ve çekme dayanımlarının, iri agreganın çekme dayanımı ile sınırlandırıldığını belirtmektedirler. Katkisız perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların eğilmede çekme dayanımları, Çizelge 4.4.4.1, 2 ve 3’de görüldüğü gibi yarmada çekme dayanımlarından yaklaşık %10 daha yüksek çıkmıştır. Bu farklılık, hafif agrega kullanarak yüksek dayanımlı hafif beton üreten diğer araştırmacılar tarafından da belirtilmektedir. Bu araştırmacılardan biri olan, Zheng *et al.*(2001) betonların eğilmede çekme dayanımının genelde yarmada çekme dayanımında daha büyük olduğunu ve bu farkın %35’ e kadar çıkabildiğini belirtmektedirler. Rossignolo *et al.* (2003) ise farkın %25 olduğunu söylemektedirler. Aitcin (1998) ise farkın, betonun monolitik özelliğinin artmasıyla azaldığını belirtmektedir.

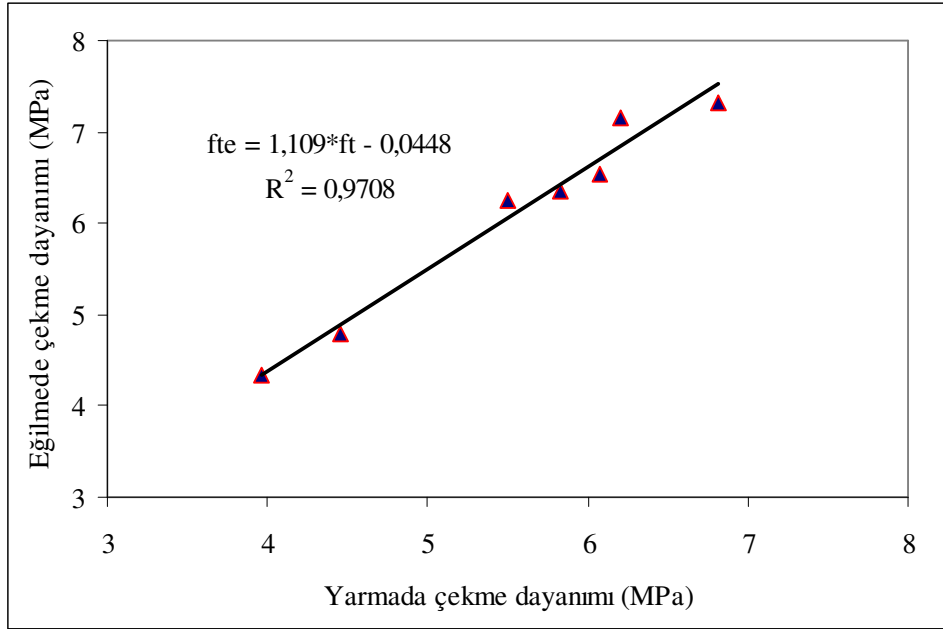


Şekil 4.4.4.2. Basınç ile eğilmede çekme dayanımı arasındaki ilişki

Yarmada çekme dayanımında olduğu gibi, eğilmede çekme dayanımını da basınç dayanımına bağlı olarak ampirik bir bağıntı ile belirlemek mümkündür. Yapılan deneysel sonuçlardan yararlanarak, eğilmede çekme dayanımının, basınç dayanımına bağlı olarak belirlenmesinde kullanılabilinecek denklem 4.4.4.2 ve 4.4.4.3’de verilen bağıntılar elde edilmiştir. W/C oranı 0,3 için denklem 4.4.4.2 ve w/c oranı 0,4 için ise denklem 4.4.4.3 kullanılabilir.

$$f_{te} = 0,6645 e^{0,0315 f_c} \quad (4.4.4.2)$$

$$f_{te} = 0,5356 e^{0,0329 f_c} \quad (4.4.4.3)$$



Şekil 4.4.4.3 Eğilme ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Betonların çekme dayanımları arasındaki ilişki Şekil 4.4.4.3’de görülmektedir. Şekil 4.4.4.3’ de görüldüğü gibi iki çekme dayanımı arasında ilişki doğrusala yakın bir ilişkiden oluşmaktadır. Bu iki çekme dayanımı arasındaki ilişkiden yararlanarak, hafif betonun çekme dayanımları teorik olarak denklem 4.4.4.4 ile belirlenebilir.

$$f_{te} = 1,109 f_t - 0,0448 \quad (4.4.4.4)$$

Perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların, teorik olarak eğilmede çekme dayanımını, basınç dayanımına bağılı olarak belirlemek için, elde edilen bu ampirik bağıntılar, Al-Khaiat and Haque (1998), Rossignolo *et al.* (2002) ve Kayali *et al.* (2003) gibi diğer araştırmacıların önermiş olduğu ampirik bağıntılar ile benzer sonuçları vermektedir.

Katkılı beton numunelerin ASTM C 78 ve C 496'ya göre belirlenen eğilmede ve yarmada çekme dayanım sonuçları Çizelge 4.4.4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4.4.4. Lif ve silis dumanı katkılı karışımların çekme dayanım sonuçları

Numune No	Yarmada çekme dayanımı (MPa)		Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	
	28 Gün	60 Gün	28 Gün	60 Gün
1	7,88	8,98	7,30	8,00
2	7,86	9,41	8,45	9,00
3	7,88	8,47	7,00	7,23
4	8,20	8,88	7,88	7,98
5	7,24	8,00	7,60	7,90
6	6,40	6,90	6,03	6,88
7	10,0	11,0	10,7	10,9
8 (Kont.Bet.)	6,53	8,26	7,80	8,88

Çizelgedeki sonuçlardan da görüldüğü gibi karışımlara çelik lif ve silis dumanının katılması, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların hem eğilme, hemde yarmada çekme dayanımlarında büyük bir artışa neden olmuştur. Silis dumanının katılması betonun çekme dayanımlarında %20 'ye varan artış sağlarken, aynı zamanda Şekil 4.4.4.4'de görüldüğü gibi betonun gevrek davranışını da artırmıştır. Lif ise, betonun hem çekme dayanımlarında %70'e varan bir artış, hem de Şekil 4.4.4.5'de görüldüğü gibi betonun aşırı sünek davranmasını sağlamıştır.



Şekil 4.4.4.4. Lifsiz betonda eğilmede çekme dayanım deneyi sonrası görünüm

Lifli betonun, lifsiz betona göre daha sünek davranmasının nedeni; lifin betona gelen enerjinin bir kısmını yutması ve kalan kısmını da çatlak olmayan bölgelere naklederek çatlağın ani büyümesini önlemesidir. Lif aynı zamanda normal agregalı betondaki agregaya gibi çatlak sınırlayıcı olarak davranmanın yanı sıra, çatlağın oluşum ve büyümesini de geçiktirmektedir. Lifin bu etkileri matrisin kalitesine bağlı olarak değişmekte ve matris kalitesi arttıkça, lifin olumlu etkisinde artmaktadır. Matrisin lifli betonların davranışına sağladığı olumlu etki, bu çalışmada görülmüştür. Çizelge 4.4.4.4'de görüldüğü gibi en yüksek çekme dayanımına lif ve silis dumanının birlikte kullanıldığı 7 nolu numunede ulaşılmıştır.



Şekil 4.4.4.5. Lifli betonda eğilmede çekme dayanım deneyi sonrası görünüm

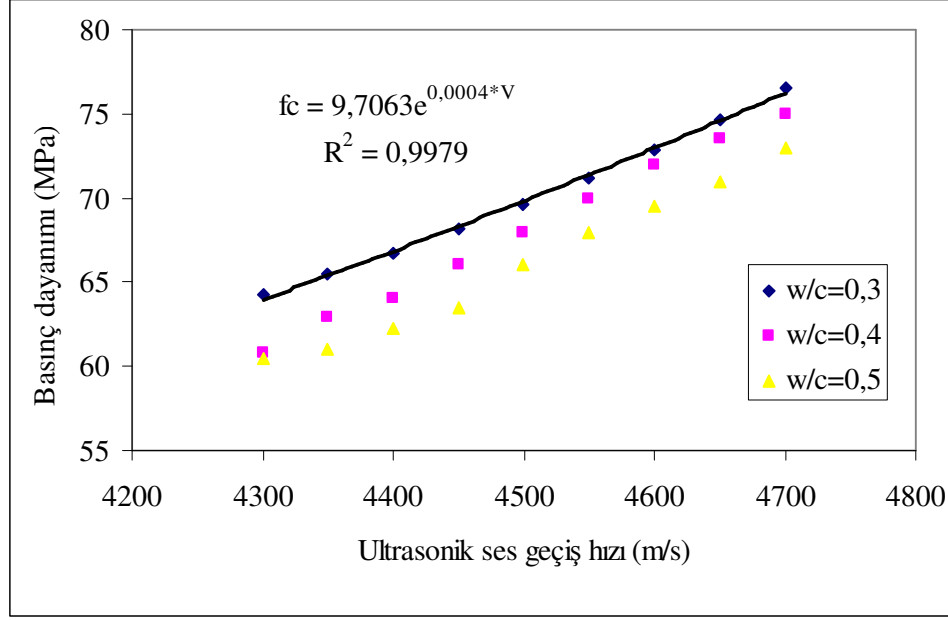
Lifin katılmasıyla aynı betonun yarmada çekme dayanımında %9 ile %78 ve eğilmede çekme dayanımı ise %9,6 ile %90 arasında bir artışın olduğunu belirtmişlerdir. Lifin katılması ile çekme dayanımlarında hem normal ağırlıklı, hem de hafif betonlarda %100'e varan bir artışın olduğunu belirlemişlerdir. Kayali *et al.* (2003) Yüksek dayanımlı hafif betonların yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımını, basınç dayanımının %9,7 ile %7,8 arasında değiştiğini, karışıma çelik lifin katılması ile %118 ile %80 lik bir artışın olduğunu belirtmişlerdir. Lifin katılması, yüksek dayanımlı hafif betonlarda ani ve gevrek kırılmayı, lifin enerjinin bir kısmını yutması ve kalan kısmını da çatlak olmayan bölgelere naklederek çatlağın ani büyümesini önleyerek, önlemektedir. Chen and Liu (2004) ürettikleri hafif betonların birim ağırlıkları 1400 ile 2000kg/m³ arasında değiştiğini, çekme dayanımları basınç dayanımının %8 ile %11 arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Lifin betonların çekme dayanımlarında %25 'lik bir artışa neden olduğunu belirlemişlerdir.

4.4.5. Yüksek dayanımlı perlit agregalı hafif betonların ultrases değerleri

Betonun kalitesini belirlemede kullanılan tahriplice yöntemlerin pahalı, zaman alıcı ve elamanda zayıflatma oluşturmamasından dolayı, beton kalitesini belirlemede kısa zamanda yapılan tahripsiz yöntemler tercih edilmektedir. Özellikle deprem öncesi hazırlık ve deprem sonrası yapıların onarım ve güçlendirilmeleri için, yapıların çok hızlı ve tahripsiz olarak beton kalitelerinin belirlenmesi bu tip tahripsiz yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Normal betonlarda basınç dayanımı ile ultrasonik ses geçiş hızı arasındaki ilişkiyi belirlemek için çalışmalar yapılmış ve bir ampirik bağıntı elde edilmiştir. Bu ilişki agrega tane boyutu, yapısı ve benzeri bir çok değişkene bağılı olarak değişsede, yinede %80 ile %85'e varan bir yaklaşık sonuç vermektedir (Neville 1994). Bu ampirik bağıntılar hafif betonlara uygulanamaz. Çünkü hafif agrega ile normal agreganın ultrases değerleri oldukça farklılık göstermektedir. Hatta bu değerler hafif agregadan, hafif agregaya büyük değişiklikler göstermektedir.

Al-Akhars (1995) w/c oranının, ses geçiş hızı üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını belirtmektedir. Fakat Saad (2005) ise w/c oranının sesin beton içerisindeki geçiş hızı üzerinde oldukça etkili olduğunu, bu oranın artmasıyla ultrases geçiş hızının düştüğünü belirtmektedir. Bunun nedenini w/c oranının artmasıyla beton içerisindeki boşluk oranının artması olarak açıklamaktadırlar. Bu çalışmada elde edilen ultrases değerleride Saad'ın belirttiği gibi w/c oranına bağılı olarak değişim göstermiştir. Şekil 4.4.5.1'de görüldüğü gibi w/c oranının artmasıyla ultrases geçiş hızında azalma, azalmasıyla da bir artma oluşmuştur. Yine Şekil 4.4.5.2'de görüldüğü gibi kür şeklinin üretilen hafif betonların basınç dayanımı ve ultrases değeri üzerinde çok fazlada olmasada bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bunun nedeni; kür şeklinin, hidrasyon oluşumu ve gelişimini etkileyerek beton içerisinde oluşabilecek boşluk boyutu ve sayısı üzerinde etkili olmasıdır. Elde edilen sonuçlar üzerinde kür şeklinin önemli bir etkisinin olmadığı, bunun nedeni; karışımda kullanılan perlit agregasının, karışımdan önce bir ön ıslatmaya tabi tutulmuş olmasıdır. Karışım öncesi ve karışım sırasında iri agregalar tarafından emilen su, zamanla ortama verilerek kür için gerekli olan nemi

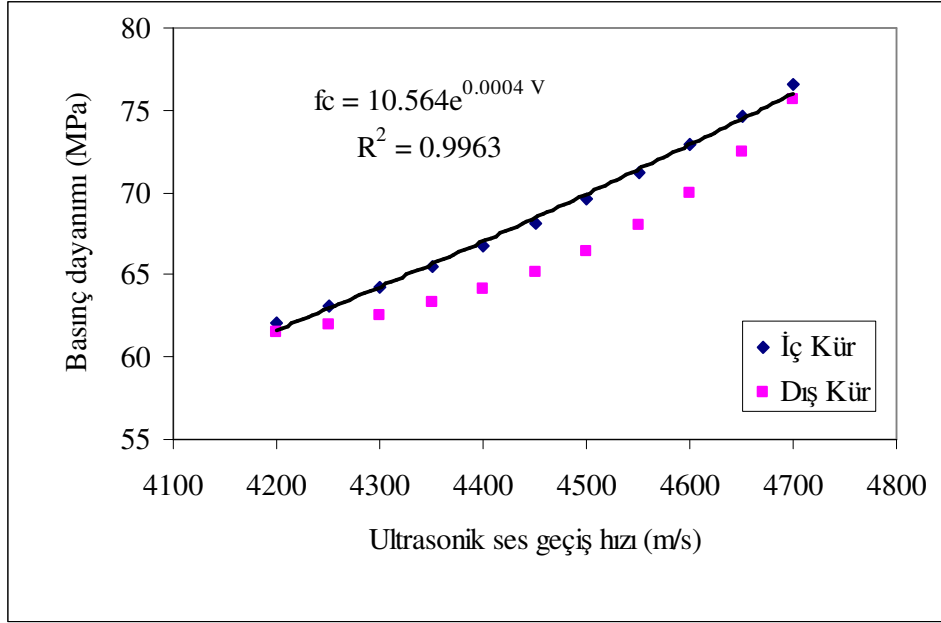
sağlamaktadır. Bu da hafif agregalı betonlarda kür etkisini, normal betonlara göre azaltmaktadır.



Şekil 4.4.5.1. Ultrasonik ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki

Normal betonlarda agrega çapının artmasıyla geçiş hızı artarken, hafif betonlarda bu durumun tam tersi olmaktadır. Bunun nedeni; hafif agregalarda agrega boyutunun büyümesiyle agrega içerisindeki boşluk çapı ve miktarında artış oluşması, normal betonlarda ise agrega çapının artmasıyla, ses iletimi agregaya göre daha düşük olan çimento matrisinin boyutu ve miktarının azalmasıdır.

Neville (1994) betonda kür süresi ve şeklinin ses geçiş hızı üzerinde etkili olduğunu ve kür süresinin artmasıyla geçiş hızının da arttığını belirtmektedir. Bunun nedenini; zamanla çimentonun hidratasyonu ile boşlukların azalması ve küçülmesi olarak açıklamaktadır. Perlit agregası üzerinde yapılan ultrases deneyinde, agrega içerisinde ultrasonik ses geçiş hızı 3628 m/s olarak ölçülmüştür. Farklı yönlerde yapılan ölçümlerde çok azda olsa bir fark görülmüştür. Bunun nedeni; agrega içerisinde bulunan boşluk şekli ve agreganın iç yapı özelliğinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4.5.2. Ultrasonik ses geçiş hızı ile basınç dayanımı arasındaki bağıntı

Çizelge 4.4.5.1’de görüldüğü gibi, üretilen yüksek dayanımlı perlit agregalı katkısız hafif betonların ultrases değerleri 4240 ile 4700 m/s arasında , silis katkılı betonlarda 5100 m/s ve lif katkılı betonlarda 5690 m/s olarak ölçülmüştür. Karışıma silis dumanının katılması diğer özelliklerde olduğu gibi betonun ultrasonik ses geçiş hızı üzerinde olumlu bir etki yapmıştır. Bu olumlu etkinin nedenleri; silis dumanının çimento tanesine göre oldukça küçük boyutta olmasından dolayı boşlukları doldurması ve çimentonun hidretasyonu sonucu ortaya çıkan serbet kireç (Kalsiyum silikat hidratı) ile reaksiyona girerek matris içerisindeki boşlukları azaltmasıdır. Neville (1994) normal agregalı betonları ultarsonik ses geçiş hızına göre aşağıdaki şekilde sıralamıştır.

- $V < 2000$ m/s çok kötü beton
- $2000 < V < 3000$ m/s zayıf beton
- $3000 < V < 3500$ m/s orta sınıf beton
- $3500 < V < 4500$ m/s iyi beton
- $4500 < V$ çok iyi beton

Yukarıdaki bilgiler dikkate alındığında, ölçülen ultrasonik ses geçiş hızları yüksek dayanımlı hafif bir beton için bile oldukça yüksek değerlerdir.

Çizelge 4.4.5.1. Üretilen betonların ultrasonik ses geçiş hızı

Num. No	Bağlayıcı miktarı kg/m ³	w/c	İç kür	Dış kür
			Geçiş hızı (m/s)	Geçiş hızı (m/s)
A	500	0,4	4400	4300
B	550	0,4	4450	4350
C	600	0,4	4520	4440
D	650	0,4	4600	4510
E	450	0,4	4350	4270
H	550	0,3	4500	4470
I	600	0,3	4630	4600
K	650	0,3	4700	4650
M	500	0,3	4390	4360
N	450	0,3	4310	4200
O	650	0,5	4510	4470
P	600	0,5	4490	4450
S	500	0,5	4430	4400
T	450	0,5	4240	4150
2			5480	-
3			5690	-
4			5260	-
5	600+50 kg Silis Dumanı	0,3	5125	-
6			5000	-
8	650 (Kontrol Betonu)	0,3	5100	-

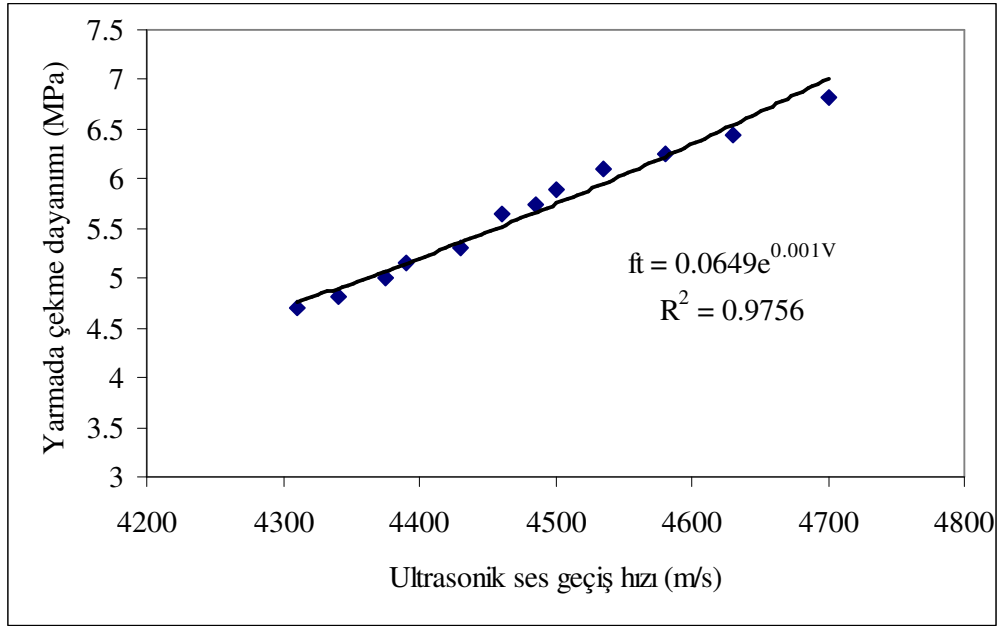
Kontrol betonu üzerinde yapılan ultrases ölçümleri sonucunda, ultrases geçiş hızı 5100 m/s olarak ölçülmüştür. Bu betonun agregası üzerinde yapılan ölçümlerde, ultrases geçiş hızı 8800 m/s olarak ölçülmüştür. Normal betonların ultrases değerleri, üretildikleri agregaların ultrases değerinden küçük olurken, hafif agregalı betonlarda bu durumun tersi oluşmaktadır. Bunun nedeni, çimento matrisinin ultrases geçiş değerinin normal ağırlıklı agreganın ultrases geçiş değerinden küçük olması ve hafif agreganın

içerisindeki boşlukların bir kısmı ile yüzeydeki boşlukların tamamının çimento hamuru ile doldurulmasıdır.

Şekil 4.4.5.2'den yararlanarak, betonun basınç dayanımını, Şekil 4.4.5.3'den yararlanarak da betonun yarmada çekme dayanımını, teorik olarak ultrasonik ses geçiş hızına bağlı olarak belirlemek için ampirik bağıntılar elde edilmiştir.

$$f_c = 10,564 e^{0,0004 V} \quad (4.4.5.1)$$

$$f_t = 0,0649 e^{0,001 V} \quad (4.4.5.2)$$



Şekil 4.4.5.3. Ultrasonik ses geçiş hızı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki

Yarmada çekme dayanımını belirlemek için elde edilen denklem 4.4.5.2 ile Sofrenleo and Tokashi (2006)'nın önermiş olduğu denklem 4.4.5.3 ile benzer sonuçlar vermektedir.

$$f_t = 1,1054 e^{0,0003222 V} \quad (4.4.5.3)$$

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1.Sonuç

Perlit agregası ile farklı w/c oranı, bağlayıcı miktarı, granülometri ve katkı kullanarak üretilen betonlar üzerinde yapılan test ve deneyler sonucu elde edilen bulgular aşağıya çıkarılmıştır.

1-Perlit agregası kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretmek mümkündür. Burada agregası maksimum çapı 12,5 mm geçmemeli ve ince agregası miktarı en az %50 olmalıdır.

2-Perlit agregası ile yüksek dayanımlı beton üretebilmek için 0,3 w/c oranında 450 kg, daha yüksek w/c oranında ise en az 500 kg bağlayıcı ve işlenebilirliği sağlamak için yüksek oranda (%1,5) akışkanlaştırıcı kullanımı gerekmektedir.

3-100 ile 200 mm' lik çökme değerleri betonun işlenebilirliği için yeterli olduğu görülmüştür.

4-w/c oranı üretilen bütün betonların mekanik özellikleri üzerinde etkili olmuştur. Bu değerin artmasıyla mekanik özelliklerde bir düşme, azalmasıyla bir artma gözlemlenmiştir.

5-Beton, dayanımını iri agregasının dayanımını kaybetmesiyle oluşmuştur. Bu durum kırılma yüzeylerinde hem basınç hem de çekme durumunda gözlemlenmiştir.

6-Eğilme ve çekme dayanımları normal betona göre daha yüksek çıkmıştır.

7-Farklı kür şeklinin, mekanik özellikler üzerinde önemli bir fark oluşturmadığı görülmüştür.

8-Gerilme deformasyon eğrisinden, dayanımın artmasıyla sünekliğin azaldığı, azalmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Aynı dayanıma sahip normal agregalı betonlara göre iki kat daha fazla birim deformasyon göstermiştir. Elde edilen deformasyon değerleri, diğer araştırmacılar tarafından farklı hafif agregası kullanılarak elde edilen yüksek dayanımlı hafif betonun değerlerine göre %50'ye varan oranda daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

9-Perlit agregasıyla üretilen yüksek dayanımlı hafif betonların, normal betonlara göre %20-25 daha hafif .

10-Kuruma rötre değerleri %0,047 ile %0,055 arasında değişmiştir. Bu değerler normal agregalı ve diğer hafif betonlara göre oldukça düşüktür.

11-Ultrasonik ses geçiş hızları 4310 ile 5100 m/s arasında ölçülmüştür. Bu değer normal agregalı bir beton için bile oldukça yüksek bir değerdir. Bu sonuçlar iç yapıda boşluk ve çatlağın oluşmadığına işaret etmektedir.

12-Çelik lifin katılması üretilen betonların basınç dayanımları üzerinde pek fazla bir etki yapmamıştır. Fakat çekme ve eğilme dayanımları üzerinde %70'e varan oranda artışa neden olmuşlardır. Lif aynı zamanda betonun sünek davranmasında büyük katkı sağlamıştır.

13-Silis dumanı katılması, betonun basınç, çekme ve elastiklik modüllerinde önemli oranda artışa neden olmuştur. Fakat silis dumanı aynı zamanda betonun gevrekliğini artırmıştır.

14-Normal betonlara göre ortalama %50 ve yüksek dayanımlı normal agregalı betona göre ise %200 daha iyi ısı yalıtımına sahip olduğu belirlenmiştir.

15-Farklı kürün, betonun hem mekanik hem de fiziksel özellikleri üzerinde pek fazla etkisinin olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni'de; iri hafif agregaların karışım öncesi ve karışım sırasında emdikleri suyu zamanla ortama vererek kür ihtiyacını azaltmasıdır.

16-Üretilen betonların küp basınç dayanımları 60 ile 110 MPa ve çekme dayanımları 4 ile 11 MPa arasında değişmiştir. Çekme-basınç dayanım oranı normal betonlara göre daha yüksek çıkmıştır.

17-Betonların statik elastiklik modülleri 17 ile 25 GPa ve dinamik elastiklik modülleri ise 22 ile 35 GPa arasında değişmiştir. Sonuçlar, diğer araştırmacıların farklı agrega kullanarak ürettikleri yüksek dayanımlı hafif betonların sonuçlarıyla benzerlik göstermiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonun bir çok mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda bu betonların,

- Donma çözülme dayanıklılıkları,
- Yangın dayanıklılıkları ,
- Klor difüzyonu,
- Asitli ortamlara dayanıklılıkları,
- Donatı adreansı,

gibi özelliklerinin belirlenmesi için çalışmalar yapılarak, perlit agregalı yüksek dayanımlı hafif betonların yüksek performanslı hafif beton sınıfına girip girmediği belirlenmelidir. Perlit agregası kullanılarak üretilen beton ile 2006 yılında Erzincanda dört adet betonarme bina inşa edilmiştir. Erzincanın birinci derece deprem bölgesi olması ve aynı zamanda beton üretiminde kullanılan agregasının, yüksek oranda alkali-agrega reaksiyonu oluşturacak aktif silise sahip olması, bu bölgede perlit agregasının betonarme betonunda kullanımı zorunlu hale getirilmelidir. Perlitin betonda sağladığı avantajlardan dolayı Türkiye genelinde kullanımında yaygınlaştırılmalıdır. Özellikle betonda alkali-agrega reaksiyonunun çok hızlı geliştiği deniz yapıları ve nemli bölgelerde perlit agregalı beton kullanımı artırılmalıdır. Perlit agregası kullanılarak beton üretiminde maksimum agregada boyutuna (D_{max}), w/c oranına ve agregada granülometrisine dikkat edilmelidir. Karışımlarda yüksek dayanıma sahip katkısız çimento kullanılmalıdır. Bu agregada ile beton üretimi, normal ağırlıklı (Geleneksel) agregayla beton üretimine göre daha çok dikkat ve teknik bilgi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Aitcin, P.C., 1998. High-Performance Concrete. E and FN SPON, 650p, London and Newyork
- Al-Akhras, N., 1995. Characterization and Deterioration Detection of Portland Cement Concrete Using Ultrasonic Waves. PhD Dissertation Civil Engineering Depertmant, Virginia Polytechnic University, USA.
- Al-Khaiat, H. and Haque, M.N., 1998. Effect of Initial Curing on Early Strength and Physical Properties of Lightweight Concrete. Pergoman Cement and Concrete research(28), 859-866p
- Al-Amoudi, O.S.B., Abiola, T.O. and Maslehuddin, M., 2005. Effect of Superplasticer on Plastic Shrinkage of Plain and Silica Fume Cement Concretes. Construction and Building Materials (19), 700-706p.
- Anonymous, ASTM C 330, Spesification for lightweight Aggregates for Structural Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 127, Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, Annual Book of ASTM Standarts, 2002
- Anonymous, ASTM C 128, Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standarts, 2002
- Anonymous, ASTM C 29, Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 192, Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 567, Test Method for Density of Structural lightweight Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 138, Test Method for Density(Unit Weight), Yield andA ir Content of Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 642, Test Method for Density, Absorption and Voids, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 39, Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 617, Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 469, Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete Compression , Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 496, Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 78, Test Method for Flexural Strength of Concrete(Using Simple Beam with Third Point Loding), Annual Book of ASTM Standarts, 2002
- Anonymous, ASTM C 157, Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 597, Test Method for Pulse Velocity Trough Concrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anonymous, ASTM C 642, Test Method for Density, Apsorption and Voids in HardenedConcrete, Annual Book of ASTM Standarts, 2002.
- Anwar Hossain, K.M., 2004. Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete. Cement and Concrete Research, 34, 283-291p

- Babu, D.S., Babu, K.G. and Wee, T.H., 2005. Properties of Lightweight Expanded Polystyrene Aggregate Concretes Containing Fly Ash. *Cement and Concrete Research* (35), p1218-1223.
- Bai, Y., Darcy, F. and Basheer, P.A.M., 2005. Strength and Drying Shrinkage Properties of Containing Furnace Ash as Fine Aggregate. *Construction and Building Materials* (19), p691-697.
- Balendran, R.V., Zhou, F.P., Nadeem, a., and Leung, A.Y.T., 2002. Influence of Steel Fibres on Strength and Ductility of Normal and Lightweight High Strength Concrete. *Pergamon, Building and Environment* (37), 1361-1367p .
- Bentur, A., Igaroshi, S., and Kovler, K., 2001. Prevention of Autogenous Shrinkage in Highstrength Concrete by International Curing Using Wet Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Research* (31), 1587-1591p.
- Blanco, F., Garcia, P. , Mateos, P. and Ayala, J., 2000. Characteristics and Properties of Lightweight Concrete Manufactured with Conespheres. *Cement and Concrete Research* (30), 1715-1722 p
- Bremner, T.W. and Holm, T.A., 1995. High Performance Lightweight Concrete Areview. *ACI SP-154, 750, 1-19p.*
- Berra, M. and Ferrara, G., 1990. Normal Weight and Total Lightweight High Strength Concretes. *ACI SP* (121), 215-238p.
- Cerny, R., Kunca, A., Tydlitat, V., Dichalova, J. and Rovnanikova, P., 2006. Effect of Pozzalanic admixtures on Mechanical Thermal and Hygric Properties of Lime Plasters. *Construction and Building Materials* (20). 849-857p.
- Chandra, S. and Berntsson, L., 2003. *Lightweight Aggregate Concrete*. 430p Noyes Publications. U.S.A
- Chang, T.P., Lin, H.C. and Chang, W.T., 2006. Engineering Properties of Lightweight Aggregate Assessed by Stres Wave Propogation Methods. *Cement and Concrete Composites* (28), p57-68.
- Chao-Lung, H and Meng-Feng, H., 2005. Durability Properties and Performance of Self-Consolidating Lightweight Concrete. *Science and Direct –Construction and Materials*, 19, 619-626P.
- Chen, B. and Liu, J., 2004. Contribution of Hybrid Fibers on The Properties of High Strength Lightweight Concrete Having Good Workability. *Science and Direct-Cement and Concrete Research*, 35, 913-917p
- Chen, H.J., Yen, T. and Huang, Y.L., 1999. Determination of the Dividing Strength and its relation to the Concrete Strength in Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Composites* (21), p29-37.
- Chia, K.S. and Zhang, M.h., 2002. Water Permeability and Chloride Penetrability of High Strength Lightweight Aggregate Concrete. *Pergoman-Cement and Concrete Research* (32), 639-645p.
- Demirboğa, R., Türkmen, İ. and Karakoç, M.B., 2007. Thermo-mechanical Properties of Concrete Containing High-volume Mineral Admixtures. *Building and Environment* (42), 349-354p.
- Demiröz, E., Tosun, H. and Öztürk, A. 1994. *Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton*. DSİ Yayın No: MLZ-878. Ankara
- Dhir, K., Mays R.G.C. and Chua, H.C., 1984. Lightweight Structural Concrete with Aglite Aggregate, 6(4), 249-261p
- Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M. and Erdoğan, T.Y., 2007. Use of Perlite as a Pozzolan in Producing Blended Cements, *Science-Direct Cement and Concrete Composites* (29), 13-21p
- Erdoğan, T.Y., 1995, *Beton Olouşturan Malzemeler-Agregalar*, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul.
- Erdoğan, T.Y., 2003. *Beton*. METU Pres, 741p, Ankara.
- Ersoy, U., Atımtay, E., 1978. *Betonarme Temel ilkeler ve Hesap Yöntemleri*. Güven Kitapevi Yayınları, 300p, Ankara

- Faust. T. and Gert König, E.H., 1997. Stres-Strain Curves of High Strength Lightweight Concrete. LACER, 2, 103-109p
- Faust. T. and Gert König, E.H., 1998. High Strength Lightweight-Aggregate Concrete. 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, 1-8p, Budapest.
- Friedemann, K. and Krumbach, R. And Seyfarth, K., 1999. High-Strength Concrete Durability Investigation by Using The CDF test. LACER No:4, 97-112p.
- Gao, J., Sun, W. and Morino, K., 1997. Mechanical Properties of Steel Fiber Reinforced High Strength Lightweight Concrete. Elsevier Cement and Concrete Composites Volume(19), 307-313p.
- Gambhir, M.L., 1986. Concrete Technology, Tata McGraw-Hill, New Delhi, p3-27
- Gündüz, L. and Uğur, I., 2005. the effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/ Cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using any Admixtures. Cement and Concrete Research Volume (35), 1859-1864p
- Hoff, G.C., 1990. High-Strength Lightweight Aggregate Concrete. ACI SP(121), 619- 644 p.
- Hüsem, M. , 1995. Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalardan Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırılması. Doktora Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hwang, C.L. and Hung, M.F., 2005. Durability Design and Performance of Self-consolidating Lightweight Concrete. Construction and Building Materials Volume (19), 1200-1207p.
- Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B., 2003. Some Characteristics of High Strength Fiber Reinforced Lightweight Aggregate Concrete. Science and Direct- Cement and Concrete Composites (25), 207-213p
- Kayali, O. and Zhu, B., 2004. Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Lightweight Aggregate High Strength Fly Ash Concrete. Construction and Building Materials (19), 327-336p.
- Kayali, O., 2005. Flashag New Lightweight Aggregate for High Strength and Durable Concrete. Submitted for Consideration in the 2005 World of Coal Ash, 1-19p Lexington
- Khan, M.I., 2002. Factors Effecting the Thermal Properties of Concrete and Applicability of its Prediction Models. Pergamen Building and Environment (37), 607-614 p
- Kılıç, A., Atiş, C.D., Yaşar, E. and Özcan, F., 2003. High Strength Lightweight Concrete made With Scoria Aggregate Containing Mineral Admixture. Science and Direct Cement and Concrete Research, 33, 1595-1599p.
- Kim, K.H., Jeon, S.E., Kim, J.K. and Yang, S., 2003. An experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete. Pergoman, Cement and Concrete Research (33), 363-371p
- Li, Z., Lara, M.A.P. and Bolander, J.E., 2006. Restraining Effects of Fibers During Non-Uniform Drying of Cement Composites. Science and Direct- Cement and Concrete Research, 36, 1643-1652p
- Malhotra, V.M., 1990. Properties of High Strength Lightweight Concrete Incorporating Fly Ash and Silica Fume. ACI SP-121, 645-666p.
- Mladenovic, A., Suput, J.S., Ducman, V. and Skapin, A.S., 2004. Alkali-Silica Reactivity of Some Frequently used Lightweight Aggregates. Science and Direct- Cement and Concrete Research, 34, 1809-1816p
- Morabito, P., 1989 . Measurement of the Thermal Properties of Different Concrete. HighTemp. High Pres (21), 51-59p
- Moon, H.Y. and Shin, K.J., 2005. Frost Attack Resistance and Steel Bar Corrossion of Antiwashout Underwater Concrete Containing Mineral Admixtures. Construction and Building Materials, 1-11p.

- Nassif, H., Najm, H. and Suksawang, N., 2005. Effect of Pozzolanic materials and Curing Methods on the Elastic Modulus of HPC. *Cement and Concrete Composites* (27) p661-667
- Neville, A.M., 1997. Aggregate bond and Modulus of Elasticity of Concrete. *ACI Materials Journal*(94), 71-75p
- Neville, A.M., 1994. *Properties of Concrete*. Jhon Wiley and Sons.inc . Fourth edition, 800p, New York.
- Neville, A.M., 1988. *Properties of Concrete*. Jhon Wiley and Sons.inc. Third edition, 779p, New York.
- Novokshchenov, V. and Whitcomb, W., 1990. How to Obtain High Strength Concrete Using Low Density Aggregate. *ACI SP-121*, 683-700p.
- Özışık, G., 1998. *Beton*. İsnatbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü. 250S, İstanbul.
- Paillere, A.M, Buil, M. and Serana, J.J., 1998. Effect of Fiber Addition on the Autogenous Shrinkage of Silica Fume Concrete, *ACI Materials Journal* 86(2), 139-144p
- Poon, C.S., Kou, S.C. and Lam, L., 2006. Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete. *Construction and Building Materials* (20), 858-865p.
- Rossignolo, J.A., Agnesini, M.V.C. and Movais, J.A., 2003. Properties of High Performance LWCA for Precast Structures with Brazilian Lightweight Aggregates. *Cement and Concrete Composites* (25), p77-82.
- Saad A., Abo-Qudais., 2005. Effect of Concrete Mixing Parameters on Propagation of Ultrasonic Waves. *Science and Direct –Construction and Materials*(19), 257-263p.
- Scheer, S. and Curbach, M., 2002. in 6th Symposium on Utilization of High Strength /High Performance Concrete. Leipzig Bd.2, 1355-1366p.
- Slate, F.O., Nilson A.H. and Martinez, S., 1991. Mechanical Properties of High Strength Lightweight Concrete. *ACI Journal* (88) 240-270p
- Smadi, M. and Migdady, E., 1990. Properties of High Strength Tuff Lightweight Aggregate Concrete. *Science and Direct- Cement And Concrete Composites*, 13(2), 129-135 p
- Shimazaki, M., Hatanakai, S. and Tanigawa, Y., 1994. Compressive Failure and Toughness of High Strength Concrete Made with Lightweight Aggregate. *Proceeding of the Japon Concrete Institute* (161), 657-662p
- Short, A. and Kinniburgh., 1978. *Lightweight Concrete*. Applied Science Publishers Ltd, 443p, London, U.K.
- Swamy, R.N. and Lambert, G.H., 1981. the Microstructure of lytag aggregates. *International journal, Cement and Composite* (4), 273-282p
- Tamasawa, F., Noguchi, T. and Onoyama, K., 1990. Investigation of Fundamental Mechanical Properties of High-Strength Concrete. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting of Architectural Institute of Jaban*, 497-498p.
- Topçu, İ.B., 1997. Semi Lightweight Concretes Produced by Volkanik Slags. *Pergoman Cement and Concrete Research*(27), 15-21p
- Turanlı, L., 2005. ER-PER Madencilik ve Müteahhitlik San.Tic.Ltd.Şti. Tarafından Üretilen Erzincan Mollaköy Perlit Agregasının Taşıyıcı Beton Yapımında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Proje Kod No: 2005-03-03-2-77. ODTÜ, Ankara.
- Uysal, H., Demirboğa, R., Şahin, R. ve Gül, R., 2004. the effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the thermal Conductivity and Density of Concrete. *Pergoman Cement and Concrete Research*(34), 845-848p
- Yun, B., Ratiyah, İ. and M.Basheer, P.A., 2004. Properties of Lightweight Concrete Manufactured With Flay Ash, Furnace Bottom and Laytag. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. 77-88p.

- Yanai, S., Sakata, N., Watanabe, K. and Nobuta, Y., 1999. Development of Self Compacting Concrete Using High Performance Lightweight Aggregate. Kajima Corporation Annual Report Vol.47, 40-60p.
- Yaşar, E., Atış, C.D. and Kılıç, A., 2004. High Strength Lightweight Concrete Made With Ternary Mixtures of Cement-Fly Ash-Silica Fume and Scoria as Aggregate. Turkish Journal Eng. Env. Sci. 28, p95-100
- Zhang, M.H. and Gjorj, O.E., 1991. Mechanical Properties of High Strength Lightweight Concrete. ACI Materials Journal-88(3), 700, 240-247.
- Zhang, M.H. and Gjorj, O.E., 1990. Microstructure of Interfacial Transition Zone between Lightweight aggregate and Cement matrix. Cement and Concrete Research(20), p610-618.
- Zheng, W., Kwan, A. K. H. and Lee, P.K.K., 2001. Direct Tension Test of Concrete. ACI Material Journal (98), p 63-71.
- Wang, H.Y. and Tsai, K.C., 2006. Engineering Properties of Lightweight Aggregate Concrete Made From Dredged Silt. Science and Direct- Cement and Concrete Composites(28), 481-485 p
- Wasserman, R. and Bentur, A., 1996. Interfacial Interactions in Lightweight aggregate Concretes and Their Influence on the Concrete Strength. Science and Direct- Cement and Concrete Composites, 18(1), 67-76 p
- Weber, S. and Reinhard, H.W., 1997. A New Generation of High Performance Concrete With Autogenous Curing. Elsevier-Advn Cem Bas Mat, 6, 59-68p.
- Weigler, H. and Karl, S., 1980. Structural Lightweight Aggregate Concrete with Reduced Density Lightweight Aggregate Foamed Concrete. Cement and Composites (2), p 101-104.
- Wilson, H.S. and Malhotra, V.M., 1998. Development of High Strength Lightweight Concrete for Structural Applications. Science and Direct-International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 10(2), 79-90p.

ÖZGEÇMİŞ

1966 yılında Sivasın-Kangal ilçesinde doğdu. İlk öğretimini Kangalda, orta öğretimini Güründe ve liseyi Sivasta tamamladı. 1986 yılında ODTÜ inşaat mühendisliğini kazandı ve 1991 yılında buradan inşaat mühendisi ünvanı ile mezun oldu. 1992 yılında Atatürk Üniversitesi Erzincan Meslek Yüksekokulun'da öğretim görevlisi olarak çalışmaya başladı. 1994 yılında eğitim amaçlı İngilterede 8 ay kaldı. 1997 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yüksek lisansını tamamladı. Aynı yıl doktora eğitimine başladı. Evli ve üç çocuk babasıdır.