

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



HAFİFLEŞTİRİLMİŞ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN LİFLİ BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SELİM KORKMAZ

DOKTORA TEZİ

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

HAFİFLEŞTİRİLMİŞ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN LİFLİ BETONLARIN
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

SELİM KORKMAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SAMSUN
2020

Her Hakkı Saklıdır.

TEZ ONAYI

Selim KORKMAZ tarafından hazırlanan “**Hafifleştirilmiş Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonların Özelliklerinin İncelenmesi**” adlı tez çalışması 30/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman Dr. Öğr. Üyesi Fahri BİRİNCİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri

Başkan Prof. Dr. Celalettin BAŞYİĞİT
Süleyman Demirel Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Prof. Dr. Şemsettin KILINÇARSLAN
Süleyman Demirel Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



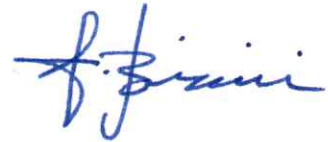
Üye Prof. Dr. Bilal CEMEK
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı



Üye Prof. Dr. Zeki KARACA
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye Dr. Öğr. Üyesi Fahri BİRİNCİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım. .../.../20...

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.



30/01/2020

Selim KORKMAZ

ÖZET

Doktora Tezi

HAFIFLEŞTİRİLMİŞ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN LİFLİ BETONLARIN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Selim KORKMAZ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fahri Birinci

Kendiliğinden yerleşen hafif ve lifli beton üretebilmek, beton teknolojisi bakımından kompozit malzeme üretim mantığına uygun davranabilmek demektir. Mukavemet özelliklerini geliştirirken işlenebilirliğe olumsuz etki eden liflerin, kendiliğinden yerleşebilen akışkan ve aynı zaman da betonun en olumsuz yanlarından biri olan ağırlığının da düşürüldüğü yeni bir hafif beton yapısı içinde kullanılması, yapı mühendisliği için önemli bir başarı olacaktır. Bu çalışmanın amacı ülkemizde bol miktarda bulunan pomza agregasını da kullanarak böyle bir betonun üretilmesidir. Çalışmada normal agrega ve Kayseri pomza agregası çeşitli oranlarda birleştirilerek ve içlerinde kısa ve uzun çelik lif ve sentetik lif kullanılarak 12 farklı beton serisi hazırlanmıştır. Bu beton serilerine, taze beton özelliklerini araştırmak amacıyla, birim hacim ağırlık, serbest yayılma ve T_{50} süreleri, J-halkası, V-hunisi ve L-kutusu deneyleri uygulanmıştır. Sertleşmiş beton deneylerinden ise, basınç, yarmada ve eğilmede çekme, betonarme kiriş numunelerde eğilmede çekme, ultrases geçiş hızı, yüksek sıcaklık, ısı iletkenlik katsayısı, ağırlıkça ve hacimce su emme ve beton donatı aderans deneyleri uygulanmıştır.

Çalışma sonucunda betonların hafifleştirilmesi durumunda kendiliğinden yerleşen betonların üretilbileceği ve farklı türde liflerin de bu beton içerisinde kullanılabilmesi gözlemlenmiştir. Betonların pomza kullanılarak hafifleştirilmesinin bazı mukavemet ve işlenebilirlik özellikleri üzerinde olumsuz etkisi olurken yalıtım, yangına dayanım ve aderans gibi özelliklere olumlu katkıları, liflerin de genel olarak mukavemet özelliklerini geliştirirken, işlenebilirliğe olan olumsuz etkileri karşılaştırmalı olarak belirlenmiş ve sunulmuştur.

Ocak 2020, 252 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, Hafifleştirilmiş beton, Pomza, Lifli beton, Taze beton, Sertleşmiş beton

ABSTRACT

Doctoral Dissertation

INVESTIGATION PROPERTIES OF FIBER REINFORCED LIGHTWEIGHT SELF COMPACTING CONCRETE

Selim KORKMAZ

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Fahri BİRİNCİ

Being able to produce self-compacting lightweight and fibrous concrete means being able to behave according to the logic of composite material production in terms of concrete technology. While improving the strength properties, the using fibers which affect workability of concrete negatively, in a new concrete composite that self compacting, have lightened and fluidity, will be an important achievement for structural engineering, and the aim of this study to produce this kind of concrete with pumice, which is a lot in Turkey. In this study, 12 different concrete series were prepared by combining normal aggregate and Kayseri pumice aggregate in various ratios and by using short and long steel fiber and synthetic fiber. In order to investigate the properties of fresh concrete on these concrete series, weight per unit volume, slump-flow, J-ring, V-box and L-box tests were carried out. In the other hand, compressive strength, splitting tensile and flexural tensile strength, flexural tensile strength in reinforced concrete beams, ultrasonic velocity test, high temperature, thermal conductivity coefficient, water absorption by weight and volume and concrete reinforcement bond strengths tests were carried out to control hardened concrete properties.

As a result of the study, it is seen that when of lightening of concrete, self compacting concrete can be produced and different fibers can be used in this concrete. Eventough lightening of concrete by using pumice has negative effects on some strength and workability properties, positive contributions to properties such as insulation, fire resistance and adherence and while improving the strength properties of the fibers in general, the negative effects on workability are presented in this study as comparatively.

January 2020, 252 pages

Key Words: Self-compacting concrete, Lightweight concrete, Pumice, Fiber concrete, Fresh concrete, Hardened concrete

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yapılmış bir Doktora tezi çalışmasıdır.

Uzun zaman alan bu çalışmanın tamamlanması esnasında birçok kişinin yardımını ve desteğini gördüm. Bunlardan; çalışmanın her aşamasında büyük katkıları olan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fahri BİRİNCİ'ye teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen, fikirleri ile rehberlik eden Prof. Dr. Bilal CEMEK, Prof. Dr. Zeki KARACA ve Doç. Dr. Kemal HACİEFENDİOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarım boyunca deneylerimin yapılmasında yoğun emek harcayan arkadaşlarım, Dr. Emre ALPASLAN, Sayın İsa ÖZCAN, Sayın Yaşar Can İÇSOY, Sayın Oğuzhan YÜCEER, Sayın Hüseyin BÜLBÜL, Sayın Muhammed Taha IŞIK, Sayın Sabri Can KAYA ve Sayın Kaan Taha KESKİN'e teşekkür ederim.

Deney malzemelerinden çelik liflerin temini için katkılarını esirgemeyen Bekaert Anonim Şirketine, sentetik lifler ve kimyasal katkıların tedarikçisi Sika Yapı Kimyasalları Anonim Şirketine de ayrıca teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini ömrüm boyunca hiç eksiltmeyen annem Gülüzar KORKMAZ ve babam Cemal KORKMAZ'a, bu çalışma yoğunluğu nedeniyle zaman ayıramadığım, eşim Fendiye ve oğullarım Talha Batur, Abdullah Sadi'ye hem sabır hem de fedakarlıkları nedeniyle teşekkür ederim.

Ocak 2020, Samsun

Selim KORKMAZ

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON (KYB)	15
3.1. Tanımı ve Literatür İsimlendirmeleri	15
3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tarihsel Gelişimi	15
3.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları	16
3.4. Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Geleneksel Beton Kıyaslaması	17
3.4.1. Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre üstünlükleri	17
3.4.2. Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre sakıncaları	20
3.5. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Bileşenleri	21
3.5.1. Kullanılan agrega	21
3.5.2. Kullanılan toz madde (filler)	22
3.5.3. Kullanılan çimento	24
3.5.4. Kullanılan kimyasal katkı	24
3.5.5. Kullanılan su	25
3.6. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tasarımı	25
3.6.1. KYB'nun tasarımında uygun oranlar	25
3.6.2. Taze betonun işlenebilme özelliği	27
3.6.3. Doldurma yeteneği	27
3.6.4. Ayrışmaya karşı direnç	27
3.6.5. Geçiş yeteneği	28
3.7. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	29
3.7.1. Basınç dayanımı	29
3.7.2. Çekme dayanımı	30
3.7.3. Aşınma dayanımı	31
3.7.4. Erken dayanım	31
3.7.5. Donatı aderansı	31
3.7.6. Büzülme ve sünme	31
3.7.7. Boşluk yapısı	33
3.7.8. Elastisite modülü	34
3.7.9. Geçirimsizlik	34
3.7.10. Donma çözülme direnci	35
3.8. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Deneyler	35
3.8.1. Serbest yayılma deneyi	35
3.8.2. V-hunisi deneyi	37
3.8.3. L-kutusu deneyi	38
3.8.4. U-kutusu deneyi	39
3.8.5. Doldurma kutusu deneyi	40

3.8.6. J-halkası deneyi.....	41
3.8.7. Orimet deneyi.....	42
3.8.8. Elek ayrışma deneyi	42
3.8.9. Taze birim ağırlık ve hava miktarı tayini	44
4. HAFİF VE LİFLİ BETONLAR.....	45
4.1. Hafif Betonların Çeşitli Kaynak ve Standartlarda Tanımları	45
4.2. Hafif Betonun Tarihsel Gelişimi	46
4.3. Hafif Betonların Sınıflandırılması ve Üretme Yöntemleri.....	48
4.3.1. Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar.....	48
4.3.2. Basınç dayanımına göre hafif betonlar	49
4.3.3. Birim hacim ağırlığına göre hafif betonlar.....	50
4.4. Hafif Beton ve Geleneksel Beton Kıyaslaması	52
4.4.1. Hafif betonun üstünlükleri	53
4.4.2. Hafif betonun sakıncalı yönleri	53
4.5. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar ve Özellikleri.....	53
4.5.1. Pomza.....	55
4.5.2. Diatomit	57
4.5.3. Tüf.....	58
4.5.4. Lav cürufu	59
4.5.5. Genleştirilmiş kıl.....	59
4.5.6. Genleştirilmiş perlit.....	61
4.5.7. Genleştirilmiş vermikülit	62
4.5.8. Yüksek fırın cürufu	62
4.5.9. Uçucu kül	63
4.5.10. Organik kökenli hafif agregalar.....	63
4.6. Hafif Betonlarda Karışım Oranları ve Betonun Hazırlanması	63
4.7. Hafif Betonun Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri	65
4.7.1. Taze birim ağırlık.....	65
4.7.2. İşlenebilirlik	65
4.7.3. Hava miktarı.....	66
4.7.4. Hafif betonların birim ağırlıkları.....	66
4.7.5. Hafif betonların basınç ve çekme dayanımları.....	67
4.7.6. Hafif beton elastisite modülü ve poisson oranı	68
4.7.7. Hafif beton su emmesi	69
4.7.8. Hafif betonun ısı özellikleri	70
4.7.9. Hafif betonun akustik özellikleri.....	72
4.7.10. Hafif betonun yangına dayanımı	72
4.7.11. Hafif betonunun aşınma direnci	73
4.7.12. Hafif beton ve donatı aderansı.....	73
4.7.13. Hafif beton donma-çözülme dayanıklılığı.....	73
4.8. Betonda Kullanılan Lifler ve Lifli Betonlar	74
4.8.1. Lifli betonun tarihçesi ve çeşitleri.....	74
4.8.2. Çelik lifler	75
4.8.3. Cam lifler	77
4.8.4. Polimer lifler	77
4.8.5. Karbon lifler	78
4.8.6. Asbest lifler	78
4.8.7. Kullanılan bitkisel ve diğer lif çeşitleri.....	79
4.8.8. Liflerin mekanik parametreleri	79
4.9. Lifli Betonların Genel Özellikleri	80

4.9.1. Lifli betonların çeşitleri ve kullanım avantajları.....	80
4.9.2. Çelik lifli betonlar	80
4.9.3. Polipropilen lifli betonlar	86
4.9.4. Cam lifli betonlar	86
4.9.5. Karma lif donatılı betonların genel özellikleri	86
4.9.6. Lifli betonların üstünlükleri	87
4.9.7. Lifli betonların hazırlanma ilkeleri ve yerleştirilmesi.....	87
4.9.8. Çelik lifli betonlara ait özel karışım kuralları	88
4.9.9. Çelik lifli beton için malzemeler ve kullanım kuralları	88
4.9.10. Çelik liflerin betonlara karıştırılması.....	89
4.9.11. Polipropilen lifin beton içinde oranı ve betona karıştırılması	89
4.9.12. Lifli betonların kontrol kuralları.....	90
4.10. Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri	90
4.10.1. Lifli betonların basınç dayanımları	90
4.10.2. Lifli betonların eğilme dayanımları.....	91
4.10.3. Lifli betonların enerji emme kapasitesi (tokluk özellikleri).....	91
4.10.4. Lifli betonların kesme dayanımları	93
4.10.5. Lifli betonların darbe dayanımları.....	93
5. MATERYAL VE YÖNTEM	95
5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	96
5.1.1. Çimento	96
5.1.2. Viskozite artırıcı olarak uçucu kül	97
5.1.3. Silis dumanı.....	99
5.1.4. Agregalar.....	100
5.1.5. Karışım suyu	102
5.1.6. Kullanılan kimyasal katkı	102
5.1.7. Kullanılan lifler (elyaf)	104
5.2. Beton Karışımları ve Seriler.....	106
5.3. Deneylerin Yapıldığı Laboratuvarlar ve Yapılan Deneyler	109
5.4. Betonların Hazırlanması.....	110
5.5. Taze Beton Deneyleri.....	111
5.5.1. Taze birim hacim ağırlık	111
5.5.2. Serbest yayılma deneyi	112
5.5.3. J-halkası deneyi.....	112
5.5.4. V-hunisi deneyi	113
5.5.5. L-kutusu deneyi.....	113
5.6. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneyler.....	114
5.6.1. Basınç dayanımı deneyleri	116
5.6.2. Yarmada çekme dayanımı	117
5.6.3. Eğilmede çekme dayanımı	118
5.6.4. Betonarme kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımları.....	119
5.6.5. Beton-donatı aderans deneyi	121
5.6.6. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emme oranları	123
5.6.7. Beton serilerinin yüksek sıcaklık dayanımları	124
5.6.8. Beton serilerinin ultrases ölçümleri	125
5.6.9. Beton serilerinin ısı iletkenlik katsayıları	126
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	129
6.1. Taze Beton Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları.....	129
6.1.1. Taze beton birim hacim ağırlığı	129
6.1.2. Taze beton serilerinin serbest yayılma deneyleri ve T ₅₀ süreleri	131

6.1.3. Taze beton serilerinin J-halkası sonuçları	135
6.1.4. Taze beton serilerinin V-hunisi deneyi sonuçları.....	139
6.1.5. Taze beton serilerinin L-kutusu deney sonuçları	140
6.2. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneylerin Sonuçları	142
6.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	143
6.2.2. Serilerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	149
6.2.3. Serilerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları	157
6.2.4. Betonarme kiriş numunelerde eğilmede çekme dayanımı sonuçları.....	166
6.2.5. Serilerin ultrases geçiş hızları	173
6.2.6. Beton serilerinin yüksek sıcaklık dayanımları	178
6.2.7. Beton serilerinin ısı iletkenlik katsayıları	188
6.2.8. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emmeleri	193
6.2.9. Beton serilerinin beton-donatı aderans deneyi.....	197
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	207
7.1. Sonuçlar.....	207
7.1.1. Taze beton deneylerine ait sonuçlar	207
7.1.2. Sertleşmiş beton deneylerine ait sonuçlar	209
7.2. Öneriler.....	214
KAYNAKLAR	215
ÖZGEÇMİŞ	231

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

μm	Mikrometre
$f_{ck,sil}$	Silindir numune karakteristik basınç dayanımı
$f_{ck,küp}$	Küp numune karakteristik basınç dayanımı
σ_{ec}	Eğilmede çekme dayanımı
P	Kırılma yükü
L	Mesnetler arası kiriş uzunluğu
L_s	Silindir numune boyu
d	Kiriş kesiti yüksekliği
b	Kiriş kesiti eni
τ	Aderans gerilmesi
F_k	Aderans kuvveti
\emptyset	Donatı çapı
l	Beton içinde kalan aderans boyu
τ_{nz}	Normalleştirilmiş aderans gerilmesi
f'_c	Beton basınç dayanımı
W_a	Ağırlıkça su emme
M_1	Suya doymun numune ağırlığı
M	Etüv kurusu ağırlığı
W_h	Hacimce su emme
V	Numune hacmi
U	Ultrases geçiş hızı
L_x	Numunede dalga gönderilen yüzeyler arası mesafe
t	Ultrases geçiş süresi
H_2	L-kutusu yatay kol ucunda ölçülen beton yüksekliği
H_1	L-kutusu yatay kol sonunda ölçülen beton yüksekliği
L_M	Lif minimum etki uzunluğu
L_C	Lif kritik uzunluğu
τ_l	Lif yüzeysel aderans mukavemeti
σ_{fl}	Lif mukavemeti
D_l	Lif çapı
s	Boşluk oranı
I	Tokluk indeksi
z	Lifin hacimsel yüzdesi
σ_{yc}	Yarmada çekme dayanımı
D	Silindir numune çapı
(K)	Kontrol betonu
(Kkl)	Kontrol betonu kısa lifli
(K2NP)	Hacimce iki birim normal bir birim pomza agregalı beton
(K2NPkl)	Hacimce iki birim normal bir birim pomza agregalı kısa lifli beton
(KNP)	Hacimce yarı yarıya pomza ve normal agregalı beton

(KNPkl)	Hacimce yarı yarıya pomza ve normal agregalı kısa lifli beton
(KNPul)	Hacimce yarı yarıya pomza ve normal agregalı uzun lifli beton
(KN3P)	Hacimce bir birim normal, üç birim pomza içeren beton
(KN3Pkl)	Hacimce bir birim normal, üç birim pomza içeren kısa lifli beton
(KP)	Pomzalı beton
(KPkl)	Pomzalı kısa lifli beton
(KPsl)	Pomzalı sentetik lifli beton
C	Beton sınıfını gösteren ifade
dB	Desibel
S/Ç	Su miktarının çimento miktarına oranı
B	Eski beton sınıfı gösterimi
dk	Dakika
T ₅₀	Serbest yayılmada 50 cm'lik çapa varma süresi
D ₁	X yönünde beton yayılması
D ₂	Y yönünde beton yayılması
@	Aralık sayısını ifade eden gösterim
Δh _x	J-halkası deneyinde X yönünde beton seviyesinin halka seviyesinden düşüklüğü
Δh _y	J-halkası deneyinde Y yönünde beton seviyesinin halka seviyesinden düşüklüğü
S	Hafif beton sınıflaması
kN	Kilonewton
T ₂₀₀	L-kutusu için 200 mm'lik uzaklığa betonun akma süresi
T ₄₀₀	L-kutusu için 400 mm'lik uzaklığa betonun akma süresi
W/mK	Isı iletkenlik hesap değeri

KISALTMALAR

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
ASTM	Amerikan Test ve Standart Oluşturma Birliği
CANMET/ACI	Uluslararası Bir Konferans Adı
CEM	Çimento
DIN	Alman Standart Enstitüsü
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EFNARC	Avrupa Özel Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu
EN	Avrupa Birliği Standartlar
GB	Geleneksel Beton
HÜBTÜAM	Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi
KYB	Kendiliğinden Yerleşen Beton
KYHB	Kendiliğinden Yerleşen Hafif Beton
LC	Hafif Beton

MPa	Mega Paskal
GPa	Çiga Paskal
MTA	Maden Tetkik Arama
RILEM	The International Union of Laboratories and Experts in Construction Material, Systems and Structures
SF	EFNARC'a göre kendiliğinden yerleşebilen betonların serbest yayılma çaplarına göre sınıflandırılması
SLC	Kendiliğinden Seviyelenen Beton
SCC	Kendiliğinden Yerleşen Beton
TMMOB	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
VAK	Viskozite artırıcı kimyasal katkı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. KYB elde edilmesi için genel yaklaşım.....	26
Şekil 3.2. Plastik büzülme karşılaştırması	33
Şekil 3.3. Kuruma büzülmesi karşılaştırması.....	33
Şekil 3.4. Serbest yayılma deney düzeneği ve ortalama çap ölçümü.....	36
Şekil 3.5. V-hunisi deney düzeneği.....	37
Şekil 3.6. L-kutusu deney düzeneği	38
Şekil 3.7. U-kutusu deney düzeneği.....	39
Şekil 3.8. Doldurma kutusu deney düzeneği.....	40
Şekil 3.9. J-halkası deney düzeneği	41
Şekil 3.10. Orimet deney aparatı.....	42
Şekil 3.11. Elek ayırışma deneyi aparatları uygulanması	43
Şekil 3.12. Hava miktarı ölçüm cihazı	44
Şekil 4.1. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 1	46
Şekil 4.2. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 2	46
Şekil 4.3. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 3	47
Şekil 4.4. Hafif betonların sınıflandırılması.....	50
Şekil 4.5. Pomzanın genel görünüşü	57
Şekil 4.6. Kayaç halinde diyatomit	57
Şekil 4.7. Çubuk şekilli bir diyatomitin görünüşü	58
Şekil 4.8. Tüfün genel görüntüsü	59
Şekil 4.9. Genleşmiş kil agregasının genel görünümü.....	60
Şekil 4.10. Genleştirilmiş kil agrega ile inşa edilmiş köprü	61
Şekil 4.11. Genleştirilmiş perlit	61
Şekil 4.12. Hafif ve normal agregalı betonda çatlak oluşma bölgeleri	67

Şekil 4.13. Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti	68
Şekil 4.14. Çimento, agrega ve betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi.....	69
Şekil 4.15. KYB'larda ısı iletkenlik ile kuru birim ağırlık ilişkisi.....	71
Şekil 4.16. Beton için kullanılan çelik lif çeşitleri	76
Şekil 4.17. Çelik liflerin enkesit biçimleri	76
Şekil 4.18. Çelik lifin çatlama anında betonu koruması	81
Şekil 4.19. Çelik lifli normal dayanımlı beton basınç-şekil değiştirme.....	82
Şekil 4.20. Çelik lifli yüksek dayanımlı betonda basınç-şekil değiştirme.....	83
Şekil 4.21. Lif miktarının eğilme dayanımına etkisi.....	84
Şekil 4.22. Lif boy değişiminin eğilme dayanımına etkisi	85
Şekil 4.23. Lif geometrisinin eğilme dayanımına etkisi	85
Şekil 4.24. Lif miktarı, dağılımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisi	91
Şekil 4.25. Tokluk indekslerinin hesabında kullanılan yük-sehim eğrisi	92
Şekil 4.26. Lif çeşidi ve narinliğe göre tokluk.....	93
Şekil 5.1. Normal agregaya ait granülometri eğrisi ve sınır değerler	101
Şekil 5.2. Beton karışımlarında kullanılan lif çeşitleri.....	105
Şekil 5.3. Laboratuvarlara ait bazı fotoğraflar	110
Şekil 5.4. Birim hacim ağırlık deney aleti	112
Şekil 5.5. Serbest yayılma çapı ölçümü	112
Şekil 5.6. J-halkası deneyi.....	113
Şekil 5.7. V-hunisi aleti ve deneyin uygulanışı	113
Şekil 5.8. L-kutusu aleti ve deneyin uygulanışı	114
Şekil 5.9. Deney numunelerinin şekli ve boyutları	115
Şekil 5.10. Kalıplara yerleştirilmiş ve kür havuzunda bazı beton numuneler	115
Şekil 5.11. Beton basınç ve kiriş eğilme deney aleti	116
Şekil 5.12. Yarmada çekme deneyi (silindir numune).....	117

Şekil 5.13. Prizmatik kirişe ait deney geometrisi.....	118
Şekil 5.14. Prizmatik kiriş üzerinde eğilmede çekme deneyi	119
Şekil 5.15. Prizmatik küçük kiriş içerisinde donatı düzeni.....	120
Şekil 5.16. Betonarme küçük kirişlerin laboratuvar ortamında üretimi.....	120
Şekil 5.17. Beton-donatı aderans deneyine ait resimler.....	122
Şekil 5.18. Deneyde kullanılan fırın	124
Şekil 5.19. Ultrases deney aleti	126
Şekil 5.20. Isı iletkenlik için kullanılan alet ve numuneye bağlanan kablolar ve numuneler.....	127
Şekil 6.1. Serilerin taze birim hacim ağırlık değişimi.....	130
Şekil 6.2. Yapılmış bir serbest yayılma deneyi	133
Şekil 6.3. Beton serilerine ait ortalama serbest yayılma çapı	134
Şekil 6.4. Serilere ait T_{50} süreleri	134
Şekil 6.5. Serilere ait serbest yayılma çapı T_{50} süresi değişimi	135
Şekil 6.6. Beton serilerinin Serbest yayılma ve J-halkası değerleri.....	137
Şekil 6.7. Beton serilerin J-halkası iç-dış yükseklik farkı.....	137
Şekil 6.8. Beton serilerin V-hunisi boşalma süresi	140
Şekil 6.9. Bloklanmayan beton serilerin L-kutusu H_2/H_1 sonuçları.....	142
Şekil 6.10. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük küp basınç dayanımları.....	144
Şekil 6.11. Serilerin hacimce pomza oranına göre 28 günlük basınç dayanımı	145
Şekil 6.12. 1 nolu kontrol betonu dayanımı % 100 kabul edildiğinde diğer serilerin yüzde dayanımları	146
Şekil 6.13. Serilerin 28 günlük basınç kayıpları ile ağırlık kayıpları ilişkisi.....	147
Şekil 6.14. Basınç deneyinden bazı fotoğraflar	149
Şekil 6.15. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları.....	151
Şekil 6.16. Beton serilerinin 28 günlük küp basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımlarının birlikte gösterimi	152
Şekil 6.17. Yarmada çekme deneyinde, ayrılan ve bütün kalan numune örnekleri .	153

Şekil 6.18. Beton serilerinin yarmada çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı grafiği.	154
Şekil 6.19. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımları.....	158
Şekil 6.20. Beton serilerinin 28 günlük basınç ve eğilmede çekme dayanımları ...	160
Şekil 6.21. Beton serilerinin yarmada ve eğilmede 28 günlük çekme dayanımları.	161
Şekil 6.22. Serilerin eğilmede çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı grafiği.....	162
Şekil 6.23. Eğilmede çekme dayanımı deneyine ait bazı fotoğraflar.....	166
Şekil 6.24. Donatılı ve donatısız kirişlerin en büyük kırılma yükleri grafiği	167
Şekil 6.25. Donatısız kirişlere göre donatılı kirişlerin kırılma yükü artış yüzdeleri	168
Şekil 6.26. Donatılı kirişlerde eğilmede çekme deneyi sonrası çatlaklar	168
Şekil 6.27. Serilere ait ultrases hızlarının grafikte gösterimi	174
Şekil 6.28. Serilere ait ultrases hızlarının, kuru birim ağırlık ve 28 günlük küp basınç dayanımı ile ilişkisi	176
Şekil 6.29. Serilerin ultrases hızları ile 28 günlük küp basınç değerleri ilişkisi	177
Şekil 6.30. Serilere ait ultrases hızları ile kuru birim ağırlık arasındaki ilişki.....	178
Şekil 6.31. Serilere ait 20, 200, 500 ve 900 °C’de elde edilen basınç değerlerinin grafik gösterimi	179
Şekil 6.32. Serilerin 20 °C basınç dayanımları esas alınarak, 200, 500 ve 900 °C’deki basınç dayanımı oranlarının grafik gösterimi.....	181
Şekil 6.33. Sıcaklıklar sonunda oluşan ağırlık kayıplarının yüzdesi grafik olarak..	184
Şekil 6.34. Şekil, hacim ve renk değişimine uğrayan ve yüzeylerinde çatlaklar oluşmuş beton serilerinin fotoğrafları	187
Şekil 6.35. Beton serilerinin ısı iletkenlik değerleri grafiği.....	189
Şekil 6.36. Beton serilerinin ısı iletkenlik değerleri ile kuru birim ağırlık ilişkisi...	190
Şekil 6.37. Serilerine ait ısı iletkenlik değerleri ile kuru birim ağırlık istatistiksel ilişkisi	191
Şekil 6.38. Isı iletkenlik katsayısı ile 28 günlük küp basınç dayanımı ilişkisi	192
Şekil 6.39. Isı iletkenlik katsayısı ile ultrases hızı ilişkisi.....	192
Şekil 6.40. Beton serilerinin su emme oranlarının grafik gösterimi	194
Şekil 6.41. Beton serilerinin ağırlıkça su emme ile kuru birim ağırlık ilişkisi grafik olarak.....	196

Şekil 6.42. Beton serilerinin ağırlıkça su emme ile kuru birim ağırlık ilişkisi	197
Şekil 6.43. Beton serilerinin basınç dayanımı ile aderans dayanımı grafiği.....	198
Şekil 6.44. Beton aderans ve basınç dayanımları arasındaki ilişki	202
Şekil 6.45. Beton aderans deneyinde bazı serilere ait fotoğraflar.....	203



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. KYB kullanımının fabrika içi çalışma koşullarına etkisi.....	18
Çizelge 3.2. Prefabrike olarak üretilen, aynı basınç dayanımına sahip geleneksel betonla KYB arasında toplam maliyet karşılaştırması.....	18
Çizelge 3.3. Toplam hacimdeki kum oranı artışının kendiliğinden yerleşen betonun yayılma çapı ve basınç dayanımına etkisi	22
Çizelge 3.4. Öngörülen dayanım ile elde edilen KYB dayanımları arası ilişki	30
Çizelge 3.5. Karışım dizaynı ve taze beton deney sonuçları	32
Çizelge 3.6. Deney yöntemleri ve niteliği.....	43
Çizelge 3.7. Kendiliğinden yerleşebilirlik deneylerinin sınır değerleri	44
Çizelge 4.1. TS EN 206-1'e göre hafif beton basınç dayanımları	49
Çizelge 4.2. Birim ağırlık ve dayanıma göre hafif betonlarda sınıflandırma.....	51
Çizelge 4.3. İşlevlerine göre hafif beton sınıflandırılması.....	51
Çizelge 4.4. Farklı hafif agregalar ve bu agregalarla üretilmiş beton özellikleri	52
Çizelge 4.5. Dört farklı hafif beton çeşidinin mekanik özellikleri	52
Çizelge 4.6. Asidik ve bazik pomza genel kimyasal bileşenleri	56
Çizelge 4.7. Çeşitli hafif agregaların yoğunlukları	66
Çizelge 4.8. Farklı agregalı bazı hafif beton türlerinin ağırlıkça su emme oranları ..	70
Çizelge 4.9. Çeşitli betonlara ait ısıl genleşme katsayısı	72
Çizelge 4.10. Bazı liflere ait fiziksel özellikler	79
Çizelge 4.11. Betonda bulunması gereken ince malzeme miktarı	88
Çizelge 4.12. En büyük agrega tane çapına göre kullanılacak maksimum lif miktarları	89
Çizelge 4.13. Kullanılacak polipropilen lif dozajları	90
Çizelge 4.14. Tokluk indekslerinin değerlendirme kriterleri	93
Çizelge 5.1. Betonda kullanılan çimentoya ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler ..	97
Çizelge 5.2. Çayırhan termik santrali uçucu kül özellikleri	98

Çizelge 5.3. Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri	98
Çizelge 5.4. Çayırhan uçucu külünün puzolanik aktivite endeksi	99
Çizelge 5.5. Silis dumanı kimyasal analizi	99
Çizelge 5.6. Silis dumanı fiziksel özellikler	99
Çizelge 5.7. Kullanılan normal agreganın fiziksel özellikleri.....	100
Çizelge 5.8. Normal agregaya ait elek analizi sonuçları.....	101
Çizelge 5.9. Kayseri pomza agregası ile normal agreganın değerleri ve karşılaştırma	102
Çizelge 5.10. Sika ViscoCrete Hi-Tech 18 ve Sika AER katkılarının bazı teknik özellikleri	103
Çizelge 5.11. Beton karışımında kullanılan lif özellikleri	104
Çizelge 5.12. Beton karışımlarında kullanılan malzeme hacimce (%)	107
Çizelge 5.13. Serilerin içerdiği agrega, lifler ve isimlendirme	109
Çizelge 5.14. Sertleşmiş deney numunelerinin şekli ve boyutları	116
Çizelge 5.15. Ultrases hızıyla beton kalitesi arasındaki ilişki.....	125
Çizelge 6.1. Taze betonların ölçülen birim hacim ağırlıkları.....	130
Çizelge 6.2. Beton serilerinin ortalama serbest yayılma değerleri ve T ₅₀ süreleri...	133
Çizelge 6.3. J-halkası çember iç-dış beton yükseklik farkları ve bloklanma.....	136
Çizelge 6.4. Beton serileri için ölçülen V-hunisi değerleri.....	139
Çizelge 6.5. Beton serileri için ölçülen L-kutusu değerleri	141
Çizelge 6.6. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımları.....	143
Çizelge 6.7. Serilerin ağırlık kaybı ile 28 günlük basınç dayanım kaybı ilişkisi	147
Çizelge 6.8. Serilere ait 7 ve 28 günlük yarmada çekme deneyi için sonuçlar.....	150
Çizelge 6.9. Serilerinin yarmada çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı	154
Çizelge 6.10. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilen diğer lifli serilerin ağırlık ve yarmada çekme dayanımı değişimi.....	156
Çizelge 6.11. Serilere ait 7 ve 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonuçları.....	158
Çizelge 6.12. Serilerin eğilmede çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı	161

Çizelge 6.13. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilen diğer lifli serilerin ağırlık ve eğilmede çekme dayanımı değişimi	163
Çizelge 6.14. Serilere ait 28 günlük eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanım oranları.....	165
Çizelge 6.15. Donatısız ve donatılı üretilen prizmatik kirişlere ait 28 günlük kırılma yükü	167
Çizelge 6.16. Aynı karışımli donatılı ve donatısız lifsiz seriler esas alındığında, üretilen lifli serilerin kırılma yükü değişimi.....	170
Çizelge 6.17. Serilere ait kuru birim hacim ağırlıklar, 28 günlük küp basınç dayanımları ve ultrases hızları.....	174
Çizelge 6.18. Serilere ait 20, 200, 500 ve 900 °C’de elde edilen basınç değerleri ..	179
Çizelge 6.19. Serilerin 20 °C basınç dayanımlarına göre 200 °C, 500 °C ve 900 °C’deki basınç dayanımları oranları	181
Çizelge 6.20. Sıcaklıklar sonunda oluşın ağırlık kayıplarının yüzdesi	184
Çizelge 6.21. Serilere ait kuru birim hacim ağırlıklar, 28 günlük küp basınç dayanımları ve ölçülen ısı iletkenlik hesap değerleri	188
Çizelge 6.22. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emme oranları	194
Çizelge 6.23. Beton serilerinin basınç dayanımı ve aderans dayanımı.....	198
Çizelge 6.24. 1. Serinin (K) aderans ve basınç dayanımı %100 kabul edildiğinde diğer serilerin yüzde olarak değişimleri	200
Çizelge 6.25. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilmiş diğer lifli serilerin aderans ve basınç dayanımı değişimi	201

1. GİRİŞ

Yapı malzemeleri fonksiyonel, estetik, ekonomik ve emniyetli olma kavramlarının sınırladığı geniş alanda sürekli bir gelişim ve ilerleme göstermelidir, bu sayede yapı teknolojileri çağın gereklerine uygun olarak kendini yenileyip güncelleyebilecektir. Yapı malzemesi denilince en başta akla gelen betonun, bazı istenmeyen olumsuz yönlerini, olumluya çevirme amacıyla süregelen çalışmalar hep devam edecektir. Agregası, çimento, su ve gerekli görülen çeşitli katkı maddelerinin birleştirilmesiyle üretilen beton, bazen içinde bulunan malzemelerin değiştirilmesi, bazen de bu malzemelerin oranlarının değiştirilmesi veya çoğu zaman da ilave edilen katkı maddelerinin değişim ve gelişimi sayesinde daha kullanışlı bir malzeme haline getirilmek istenmektedir.

Geleneksel betonun taze iken işlenebilir olması yani homojen kalarak taşınabilmesi, hazırlanan kalıplara kolayca yerleştirilebilmesi ve sıkıştırılabilmesi gerekir. Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB); geleneksel betonun yerleştirme sorun ve sakıncalarını çözmeyi hedefleyen bir çalışma sonucunda üretilmiş, yüksek performanslı kabul edilen bir betondur (Okamura, 1997; Sahmaran vd, 2005). Günümüzde geleneksel beton kalıplara yerleştirilirken emek ve enerji isteyen farklı vibrasyon yöntemleri kullanılmakta, buna rağmen yerleştirme sorunlarının önüne tam olarak geçilememektedir. Kalifiye işçilikte yaşanan eksiklik, donatı aralığının sıklığı, kalıpların dar yapısı ve betondaki kalitesizlik gibi nedenler, betonu yerine uygun bir şekilde yerleştirmeye engel teşkil etmektedir. Bu konuda yaşanan sorunları çözmek için 1980’li yıllarda kimya ve polimer endüstrisi için çalışan Japon bilim insanları etkili beton akışkanlaştırıcı malzemeler üretmişlerdir. Üretilen bu güçlü akışkanlaştırıcılar sayesinde kendi ağırlığı nedeniyle akarak yerine yerleşebilen, sıkıştırma için ilave enerjiye gerek duymayan, segregasyon ve terleme gibi problemleri de olmayan, adına “kendiliğinden yerleşen beton” denilen bir betonun üretimine imkan sağlamışlardır (Okamura ve Ouchi, 1999; Yardımcı, 2007).

Güçlü işlenebilir yapısı ile KYB vibrasyon istemediğinden, daha hızlı, daha az işçi kullanılarak ve gürültüsüz yerleşime imkan sağlar. KYB’lar üretilirken, beton içinde kullanılacak agreganın hem en büyük tane çapının, hem de iri agregası

miktarının sınırlandırılması ve etkili süper akışkanlaştırıcıların kullanılması, tasarımının bir gerekliliğidir (Gaimster ve Dixon, 2003). KYB'lar üretilirken malzeme ve tasarım ilkelerinin değişiklik göstermesine ilave olarak, betonun özellikle taze halinin kontrolü için gerekli farklı deneylere de ihtiyaç vardır (Felekoğlu vd, 2004).

Geleneksel betonların en olumsuz yanlarından biri de kendi ağırlıklarıdır. Bu olumsuzluğu gidermek amacıyla üretilen hafif betonlar, zati ağırlıkları, geleneksel betonlara oranla daha düşük olan özel bir beton çeşididir (Kurt, 2009). TSE EN 206-1'de hafif beton tanımı, toplam agreganın hepsi veya bir miktarının hafif agregaya kullanılarak üretildiği, 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında kuru birim hacim ağırlığı olan betondur, şeklindedir (TSE EN 206-1, 2000). Hafif beton; geleneksel agregaya yerine hafif agregaya kullanılarak veya sadece geleneksel iri agregayı kullanarak üretilebildiği gibi, bağlayıcı çimento hamurunun geliştirilmesiyle de elde edilebilmektedir. Hafif agregaya diye tanımlanan agregalardan bir kısmı volkanik tüf, volkanik cüruf, pomza gibi doğal malzemeler, bir kısmı da geliştirilmiş kil, geliştirilmiş perlit, geliştirilmiş şist, geliştirilmiş vermikülit, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi yapay agregalardır. Ayrıca tahıl taneleri gibi bazı organik maddelerden de hafif agregalar mevcuttur (Demirboğa, 1999).

Sertleşmiş betonun hafif olması, istenen bir özelliktir ve bu nedenle Hafif Betonlar (HB) özellikle gelişmiş ülkelerde son 40 yıldır taşıyıcı elemanlarda kullanımı tercih edilen yaygınlaşmış bir beton türüdür (Gönen, 2009; Kaldı, 2011). Betonların hafif üretilmesi yapının kendi ağırlığının azalması anlamına geldiğinden, depremde oluşacak dinamik etkiler bu sayede küçülecek ve yapı depreme karşı daha dayanıklı bir hal alacaktır. Ağırlığı azalan yapının taşıyıcı eleman boyutlarının küçülmesi, aynı zaman da yapı maliyetinin de azalmasına imkan sağlayacaktır. Deprem kuşağında yer alan ülkemiz kaliteli ve bol miktarda bulunan hafif agregaya yataklarına sahip iken, bu agregaya kaynaklarının betonarme yapılarda ve hafif beton üretiminde yeterli olarak kullanılmaması düşündürücüdür (Karaca, 1996).

Yapılarda geleneksel beton yerine hafif betonların kullanılması, ısı ve ses yalıtımı bakımından iyi olması nedeniyle bir gerekliliktir (Hüsem ve Durmuş, 1995). Bu konuda yapılmış bir çalışmada hafif betonların hem yalıtım amaçlı hem de taşıyıcı olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada hafif betonların geleneksel betonlara göre donma çözülme karşı daha dayanıklı olduğu, günlük

sıcaklık farkının yüksek olduğu yerlerde kullanılabilceği de ortaya konulmuştur (Gül ve Türkmen, 1998).

Türkiye'nin hafif beton yapımında kullanılan doğal hafif agregaya kaynakları açısından zenginliği, konuya verilmesi gereken önemi daha da artırmaktadır. Özellikle Kayseri, Nevşehir, Bitlis, Van, Ağrı ve Kars bölgeleri başta olmak üzere Türkiye genelinde yaklaşık 2.8 milyar metreküp (görünür-muhtemel-mümkün) pomza kaynağı olduğu bilinmektedir (TMMOB, 1989). Türkiye'deki perlit yataklarının 8 milyar ton civarında olduğu ve bunun 4.5 milyar tonunun Kars, Erzurum illeri sınırları içinde kaldığı, Doğu Anadolu Bölgesi toplam olarak düşünüldüğünde bunun 6.5 milyar ton civarına ulaştığı bilinmektedir (MTA, 1985). Bu nedenle ülkemiz için bu agregaların kullanılmasının ekonomiye sağlayacağı fayda çok önemlidir, ancak bu agregaların kullanımı diğer ülkelerle kıyaslandığında yok denecek kadar azdır. Bunun gerçek nedeninin, bu agregalarla üretilen hafif betonların özelliklerinin yeterince bilinmiyor olmasıdır (Demirboğa, 1999).

Hafif betonların olumlu yanları olduğu gibi işlenebilme problemleri ve basınç dayanımlarının düşüklüğü en büyük dezavantajlarıdır (Gönen, 2009). Hafif betonlar daha kuru kıvamlı bir görünüm arzettiğinden, yerine yerleştirilirken, geleneksel betondan daha büyük bir vibrasyon enerjisi istemektedir. Hafif betonlarda vibratör kullanımından kaçınmak gerekir, çünkü çimento hamuruna göre daha hafif olan agregalar vibratör kullanınca beton yapısı içinde daha fazla ayrışma eğilimi gösterecek ve yüzeye toplanacaktır. Birçok olumlu yönü olan hafif betonların kendiliğinden yerleşen beton şeklinde tasarımı olumsuz yönlerini giderecek, dayanım ve dayanıklılığı yüksek, işlenebilirliği iyi bir beton üretilmesine imkan sağlayabilecektir (Kurt, 2009). KYB taze halde süspansiyon davranışı göstermektedir, bu durumda hafif agregaların bu süspansiyon içindeki davranışlarının ve agregaya tip ve miktarının optimizasyonunun incelenmesi, başarılı hafif KYB üretimi için gereklidir. Hafif agregalı betonlar, yüksek oranda su kullanımı gerektirdiği için, segregasyona uğradığı ve yerine yerleştirmede vibrasyon kullanımı gerektirdiği için, kendiliğinden yerleşen beton yapısıyla üretilmesi bu olumsuzlukları giderebilecek çözümler sağlayabilir (Kurt, 2009). Hafif KYB üretirken oluşacak en önemli sorunlar ise kendiliğinden yerleşebilmeyi sağlamak için gerekli yüksek oranda toz maddenin birim hacim ağırlığı artırması ve hafif

agregaların çok yüksek su tutma kapasitesinin tasarımda doğuracağı sıkıntılardır (Akkaya vd, 2002; Dehn, 2002; Felekoğlu, 2003).

KYB’da hafif agregaların kullanımı ile Kendiliğinden Yerleşen Hafif Betonlar (KYHB) üretilebilir. Bu betonların birim hacim ağırlığı %25 azalırken, mukavemetleri sadece %15 azalır. Ancak bunun yanısıra ısı yalıtımının artması, iç küreleme oluşturması ve yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı bir beton oluşu kendiliğinden yerleşen hafif betonu tercih edilebilir bir beton türü yapar (Gönen, 2009). Kendiliğinden yerleşen hafif betonun kullanılması ile sıkıştırma problemi ortadan kalkabilecek ve yetersiz kürden oluşacak dayanım ve dayanıklılık kayıpları en aza indirgenmiş olacaktır. Bu tür bir betonun hafiflik ve kendiliğinden yerleşebilirlik özelliği, deprem bölgeleri yapıları için ve ayrıca prefabrike yapı elemanları için vazgeçilmez olabilir (Gönen, 2009).

Betona liflerin ilavesiyle dayanımı yüksek, çatlamayan, sünek ve şekil değiştirme yeteneği geliştirilmiş bir beton yapısı elde edilebilir. Farklı lifler, beton yapıları içinde kullanıldığında betona çok farklı değişimler sunmaktadırlar. Bazı lifler, polipropilen lifler gibi, betonun rötre çatlaklarını azaltırken çelik lifler betonun yük taşıma gücünü ve enerji yutma kapasitesini artırır. Lifler, betonun çeşitli dayanım özelliklerine bu tür faydalar sağlarken, betonun işlenebilirlik ve akıcılık gibi taze beton yapısının olmazsa olmazları üzerinde olumsuz etkilere sahiptirler (Yardımcı, 2007). Bir life ait cins, boy, şekil ve miktar gibi özellikler üretilen lifli betonun taze beton yapısını çok fazla değiştirmektedir. Betonda istenilen sertleşmiş beton özelliklerinin elde edilmesi de, boşluksuz yerleşebilme ve işlenebilir olma gibi taze beton yapısına bağlıdır.

Lifler, vibrasyon istemeyen ve kalıba düzgün yerleşebilen kendiliğinden yerleşen beton yapısı içerisinde kullanılırsa, normal lifli betonlarda karşılaşılan lif dağılımının düzensizliği, düzensiz boşluklar ve yerleşme sorunları gibi bazı önemli sorunlar çözülmüş olabilir. Kendiliğinden yerleşen lifli betonlar işlenebilir, yerleştirme sorunları olmayan, çatlağı kontrol edilebilen, sünek, çekmeye ve basınca karşı biraz daha dayanıklı, durabilitesi iyi, darbe dayanımlı bir beton olabilir. Ancak, kendiliğinden yerleşen betonlara lifler eklendiğinde işlenebilirlik ve dayanım özelliklerinin nasıl değişeceği, bu betonların hangi tasarım esaslarına tabi tutulması gerektiği gibi konular bazı çalışmalarda incelenmiştir ve incelenmeye devam edilmektedir (Korkmaz, 2011). Kendiliğinden yerleşen lifli betonların

işlenebilirliğinin kontrolü için, V-kutusu deneyi, J-halkası deneyi ve çökme-yayıma deneyi gibi bazı deneyler kullanılırken, sertleşmiş beton özellikleri için ise beton basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, elastisite modülü ve yarmada çekme dayanımı gibi farklı özelliklerini ölçen deneyler kullanılmaktadır (Yardımcı, 2007).

Hafif betonların özellikleri ve kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Ancak kendiliğinden yerleşen hafif betonlar hakkında literatür de daha az araştırmaya rastlanmaktadır. Kendiliğinden yerleşen hafif veya hafifleştirilmiş lifli betonlarla ilgili ise yapılmış çalışma sayısı yok denecek kadar azdır. Üretilecek bir beton, hafif agregalarla üretildiği için hafif, lifler kullanıldığı için dayanım ve durabilitesi yüksek ve kendiliğinden yerleşebildiği içinde işlenebilirliği iyi bir beton olarak üretilebilirse, yapı mühendisliği için çok önemli bir başarı olabilecektir. Bu tezin amacı, ülkemizde bol miktarda bulunan, pomza agregası kullanılarak hafifleştirilen, kendiliğinden yerleşebilen ve lifli, geçmişte çok az çalışılmış beton çeşidinin üretilmesi ve deneylerle özelliklerinin incelenmesidir. Kendiliğinden boşluksuz yerleşebilen, aynı zamanda hafifleştirilmiş, yalıtım özellikli ve liflerle çekmeye karşı güçlendirilmiş yeni beton çeşidi, birçok yapı türünde umut verici gelişimler sağlayabilecektir. Çünkü bu tür betonlarla depreme daha dayanıklı binalar ve kabuk yapılar üretilebilecektir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde daha önce kendiliğinden yerleşen hafif ve hafif lifli betonlar üzerinde yapılmış bazı çalışmalar, konunun öneminin anlaşılması ve tezin yol haritasına ışık tutması bakımından aşağıda verilmiştir.

Hwang ve Hung (2005) yaptıkları çalışmada, hafif KYB'ların tasarım ve performanslarının değişimlerini su/çimento (s/ç) oranı ve çimento hamuru miktarı bakımından incelemiştir. Tasarımda hafif KYB'ların 230 mm ile 270 mm arasında ve 550 mm ile 650 mm arasında serbest yayılma yapan iki farklı çeşidini üretmişlerdir. Deneyleri sonucunda 386 kg/m^3 çimento ve 150 kg/m^3 su kullanarak (s/ç=0.39) 91 günlük basınç dayanımı 56 MPa olan betonlar üretmişlerdir. Hafif olarak üretilen KYB'ların iyi akış yeteneği gösterebileceği ve yüksek mukavemetli olabileceği belirtilmiştir. Hafif agregaların özelliğinden dolayı beton içinde kullanılan çimento miktarının azalmasının düşük geçirgenliğe ve yüksek elektriksel dirence neden olacağı vurgulanmıştır.

Choi vd (2006), normal ve hafif agrega kullanarak ürettikleri, yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonların hem taze hem de sertleşmiş hallerini birbiriyle kıyaslamışlardır. Farklı bir yöntem kullanarak ürettikleri betonların yoğunlukları 1965 kg/m^3 ile 2306 kg/m^3 arasında değişirken, basınç dayanımlarının 34 MPa ile 59 MPa arasında kaldığını söylemişlerdir. Serbest yayılma çapları 600 mm ile 700 mm arasında değişen hafif KYB'ların, elastisite modülünün, normal KYB'a göre düşük kaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca matematiksel yaklaşımlarla teorik olarak dayanımları tahmin edebildiklerini söylemişlerdir.

Kadiroğlu (2004) pomza agregasıyla hafiflettiği kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif betonlar üretmiştir. Beton karışımlarında Kayseri bölgesi pomzası ve kırma taş agregasının oranlarını değiştirerek 1400, 1500, 1600 ve 1700 kg/m^3 etüv kurusu yoğunluklarına sahip hafif, aynı zamanda kendiliğinden yerleşen özellikli betonlar üretilmiş, üzerlerinde incelemeler yapılmıştır. Karışımlarda yaklaşık olarak çimento (350 kg/m^3), uçucu kül (170 kg/m^3), silis dumanı (30 kg/m^3) ve kimyasal katkı miktarları (8 kg/m^3) ile en büyük agrega tane büyüklüğü (16 mm) sabit tutulmuştur. Üretilen betonların, serbest yayılma, U-kutusu ve L-kutusu deneyleri ile taze beton özellikleri ve ayrıca yarmada çekme, eğilmede çekme, su

emme ve elastisite modülleri deneyleri ile de sertleşmiş beton özellikleri araştırılmıştır. Üretilen betonların 28 günlük basınç dayanımları 20–35 MPa arasında değişmiştir. Çalışma sonucunda kendiliğinden yerleşen hafif taşıyıcı betonların üretilebileceği, beton birim hacim ağırlığının artmasının yayılma çapını artırdığı, hafif betonların su emmelerinin yüksek olduğu, betonarme için bu betonun denenmesi gerektiği belirtilmiş, ayrıca bu beton üretimine dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Düzgün vd (2005), çelik lifleri Van yöresi pomzası ve Erzurum yöresi normal agregasıyla değişik oranlarda birleştirip taze birim hacim ağırlıkları yaklaşık 1500 kg/m³ ile 2100 kg/m³ arası değişen çelik lifli betonlar üretmişlerdir. 300 kg/m³ çimento ve yaklaşık 250 kg/m³ su kullanarak (s/ç=0.83) ürettikleri betonlara 60 mm uzunluğu olan çelik lifleri 40 kg/m³ miktarında koymuşlardır. Basınç dayanımları yaklaşık 12 MPa ile 20 MPa arasında değişen betonlar üretip, bu betonlarda kullanılan çelik liflerin basınç, elastisite modülü ve eğilme dayanımlarının tamamını artırdığını belirtmişlerdir.

Açikel ve Günaydın (2007), Nevşehir yöresinden çıkarılan pomza agregasını kullanarak, hafif kendiliğinden yerleşen beton üretmişlerdir. Ürettikleri kendiliğinden yerleşen hafif betonlar yaklaşık olarak 1400–1650 kg/m³ birim ağırlıklara ve 21-33 MPa basınç dayanımlarına sahiptirler. Çalışmalarında pomza agregası ile dere kumunun birlikte kullanımının basınç dayanımını artırdığını belirtmişlerdir.

Lo vd (2007) çalışmasında, kendiliğinden yerleşen hafif beton ile normal agregalı KYB'ların akış parametreleri ve mukavemet özelliklerini incelemişlerdir. Bağlayıcı miktarını 500 kg/m³ ile 650 kg/m³ oranlarında seçerek yaklaşık 1650 kg/m³ yoğunluğa sahip betonlar üretmişlerdir. Hafif KYB üretimi için daha az süper akışkanlaştırıcı ve daha düşük su/çimento oranının yeterli olduğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri hafif KYB'ların ağırlıklarının normal KYB'lardan %25 daha az olmasına rağmen, basınç dayanımlarının aynı olduğunu ve elastisite modülünün de normal KYB'dan sadece %20 düşük olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, hafif KYB'un işlenebilirliğinin mükemmel olduğunu, birim hacim ağırlığının düşük olduğunu ve yüksek sıkıştırma enerjisine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Uygunoğlu (2008) çalışmasında, pomza, volkanik tüf ve diatomit gibi hafif agregaları 4-16 mm tane boyutunda, 0-4 mm'lik doğal dere kumlarıyla birleştirerek

farklı su/toz oranına sahip hafif betonlar üretmiştir. Üretilen pomzalı, tüflü ve diyatomitli hafif kendiliğinden yerleşen betonlarla, normal agregayla ürettiği kendiliğinden yerleşen betonları hem taze beton özellikleri hem de sertleşmiş beton özellikleri bakımından karşılaştırmıştır. Beton karışımlarında yaklaşık 400 kg çimento ile birlikte 50 kg uçucu kül ve yaklaşık 100 kg kireçtaşı tozu kullanmıştır. Taze beton hallerini kontrol için yaptığı bazı deneyler yanında, sertleşmiş beton hallerini kıyaslamak amacıyla basınç, çekme, ultrases, su emme, porozite, ısıl şekil değiştirme, kılcal su emme, ısı iletkenlik gibi birçok deney yapmıştır. Yaptığı çalışma sonuçlarını taze beton, mekanik, fiziksel, dayanım ve mikroyapı deney sonuçları olarak farklı başlıklar altında sunmuştur. Hafif agregaların mekanik özellikleri zayıflattığını, yalıtım değerlerini artırdığını ve yoğunlukları düşürdüğünü söylemiştir. Ayrıca düşük su/toz oranında üretilen KYB'lerin yüksek doldurma ve geçebilme özelliği gösterdiğini, ayrışma direncine sahip olduğunu ve yüksek sıcaklığa karşı ısıl genleşmenin azaldığını belirtmiştir.

Kurt (2009) yaptığı çalışmada, kendiliğinden yerleşen hafif betonların bazı özelliklerini incelemiştir. Hafif beton üretimi için Erzurum yöresi pomzası kullanmış ve bazı betonları da normal agregaya ve pomzayı karıştırarak elde etmiştir. Beton serileri içinde farklı mineral katkıları kullanmıştır. Su/bağlayıcı oranları değişik tamamı pomzalı beton serilerini ve normal agregayla pomzayı birlikte kullandığı betonlarla karşılaştırmıştır. Kuru birim hacim ağırlıkları yaklaşık 900 kg/m^3 ile 2200 kg/m^3 arası değişen beton serilerinin basınç dayanımlarının 14 MPa ile 54 MPa arasında değiştiğini, ayrıca bu betonların su emme, yarmada çekme dayanımı, ultrases ve ısı iletkenliği değerlerinin incelendiği deney sonuçlarını çalışmasında göstermiştir. Sonuç olarak kendiliğinden yerleşen yalıtımlı ve taşıyıcı betonlar üretilebileceğini ve kullanılan mineral katkıların bazı beton özelliklerine olumlu bazılarına ise olumsuz etkileri olduğunu söylemiştir.

Kaldı (2011), “taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı” adlı çalışmada, C20, C25 ve C30 sınıflarında normal agregayla ürettiği normal dayanımlı betonları, Kayseri pomzası kullanarak hafiflettiği LC20, LC25 ve LC30 sınıflarında taşıyıcı hafif betonlarla kıyaslamıştır. Çalışmasında, yaklaşık 2300 kg/m^3 taze birim hacim ağırlığına sahip normal betonların dayanımları 28 MPa ile 40 MPa arasında değişirken, hafif betonların taze birim hacim ağırlığı 1600 kg/m^3 ile 1800 kg/m^3 arası ve dayanımları 23 MPa ile 30 MPa arasında bulunmuştur. Bu iki grup

beton özellikleri incelendikten sonra, normal dayanımlı C25 ve hafif dayanımlı LC25 betonlarını bir yerel statik programında 10 katlı yapı için kullanmıştır. Sonuç olarak hafif betonlu betonarme hesabında, yapı ağırlığının %14.46 ve deprem yüklerinin % 34 azaldığını, kolon kesitlerinin %24 küçülebildiğini ve radye temel kalınlığında hafifleşme sonunda %45 azaldığını söylemiştir. Hafif beton kullanıldığında beton metrajının %18.45, donatı metrajının %19.23 azaldığını, kiriş ve döşeme sehimlerinin sınır değerlerde kalmasına rağmen bir miktar arttığını belirtmiştir. Çalışmasında hafif betonun ekonomik olarak daha avantajlı olduğu vurgulanmıştır.

Akkaş (2011), pomza agregasıyla ürettiği hafif betonların taşıyıcılık özelliklerini araştırdığı çalışmasında, Isparta yöresi pomzası ve normal agregalarını kullanarak kuru birim ağırlıkları yaklaşık 1500, 1550 ve 1900 olan üç farklı hafif beton üretmiş ve bu betonları 15x25x230 cm ebatlarında ürettiği betonarme kirişlerde kullanmıştır. Ürettiği betonlar üzerinde basınç, eğilme, ultrases ve elastisite modüllerini belirlemeye yönelik deneyler yapmıştır. Ürettiği betonların basınç dayanımlarının 14 MPa ile 20 MPa arasında olduğunu ve bunlarla ürettiği kirişlerin taşıma gücü momentlerinin 36 KNm ile 39 KNm arasında değiştiğini söylemiştir. Çalışma sonucunda pomza ile üretilecek hafif betonların, taşıyıcı betonarme elemanlarda kullanılabilceğini belirtilmiştir.

Beycioğlu vd (2011)'de yaptığı çalışmada Isparta bölgesinden temin edilen pomza agregasıyla ürettikleri betonda, çimentonun bir kısmının yerine uçucu kül ve silis dumanı kullanarak 25 farklı beton elde etmişlerdir. Uçucu kül ve silisi % 0, % 5, %10, %15 ve %20 oranlarında değişik kombinasyonlar şeklinde beton karışımlarında kullanmışlardır. Hazırlanan betonlarda toplam bağlayıcı miktarını 350 kg/m^3 ve su/bağlayıcı oranını da 0.5 seçmişlerdir. Üretilen betonların ortalama birim hacim ağırlıkları 1.73 g/cm^3 ile 1.8 g/cm^3 arası ve basınç dayanımları ise yaklaşık 15 MPa ile 21 MPa arası değişmiştir. Çalışmada uçucu kül miktarının, çimentonun ağırlıkça %10'una kadar yükseltilmesi durumunda, silis dumanı miktarının %15'e kadar çıkarılmasının basınç dayanımını artırdığı ve uçucu kül miktarının %15 veya %20 seçilmesi durumunda ise silis miktarının ancak çimentonun %10'una kadar yükseltilmesi halinde basıncın artacağı söylenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda yüzey sertliği ile ultrases geçiş hızları arasında anlamlı bir ilişkinin kurulamadığı belirtilmiştir.

Kaffetzakis ve Papanicolaou (2011), Yunanistan'ın daha ağır olan pomzasını, kireçtaşı tozunu, yaklaşık 420 kg/m³ çimento ve 200 kg/m³ su kullanarak hafif kendiliğinden yerleşen betonlar üretmişlerdir ve bu betonlara kısa, uzun çelik lifler ve polipropilen lifler eklemiştirler. Kuru birim ağırlıkları yaklaşık 1700 ile 1900 kg/m³ arasında değişen betonların basınç, eğilme ve elastisite modüllerini deneyler yardımıyla bulmuşlardır. Liflerin taze beton özellikleri üzerine olumlu ve olumsuz bazı etkilerinin olduğunu söylemişlerdir. Beton basınç dayanımları 27 MPa ile 36 MPa arasında değişen betonlar için, liflerin basınç dayanımını ve elastisite modülünü azalttığı ve eğilme dayanımını artırdığı sonuçlarına ulaşmışlardır.

Libre vd (2011), pomza ile ürettikleri hafif betonların içerisinde karışık lifler kullanmış ve betonların bazı mekanik özelliklerini incelemiştirler. 475 kg/m³ çimento kullandıkları betonlarda su/çimento oranlarını 0.3 olarak belirlemiştirler. Karışımlarda 35 mm uzunluğunda çelik lif ve 12 mm uzunluğunda polipropilen lif kullanmışlardır. Ürettikleri betonların yoğunlukları yaklaşık 1750 ile 1900 kg/m³ arasında değişmiş ve basınç dayanımları yaklaşık 19 MPa ile 35 MPa arasında farklılık göstermiştir. Çalışmaları sonucunda polipropilen liflerin beton yoğunluğunu düşürdüğü, çelik liflerin artırdığı, çelik liflerin basıncı bir miktar düşürdüğü, ancak eğilmeyi artırdığı bulunmuştur. Polipropilen liflerin basınca pek etkisinin olmadığı ama eğilmeyi bir miktar artırdığını da söylemişlerdir.

Altun ve Aktaş (2013) yaptıkları çalışmada, Erciyes Dağından alınan pomza ile üretilen çelik lifli hafif betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştirler. Yoğunlukları yaklaşık 1400 kg/m³ ile 1600 kg/m³ arası değişen betonların içerisine 60 mm uzunluğunda çelik lifleri 30 kg/m³ ve 60 kg/m³ miktarlarında kullanmışlardır. Basınç dayanımları yaklaşık 16 MPa ile 24 MPa arasında değişen betonlar ile 300x300x2000 mm boyutlarında ve çekme bölgelerinde 2ø16 donatı bulunan betonarme kirişler üretmişlerdir. Çimento miktarı yüksek betonlarda çelik liflerin sünekliği daha fazla artırdığını, liflerin çatlak oluşumu ve büyümesini önlediğini ve kiriş ağırlıklarının % 42 azalabildiğini belirtmişlerdir.

Gönen (2015) yaptığı çalışmada, düşük ve yüksek karbon içeren çelik liflerle hafif kendiliğinden yerleşen betonlar üretilip, basınç ve eğilme dayanımlarını incelemiştir. Elazığ yöresi pomzasını kullanarak ürettiği beton serilerinde 440 kg/m³ çimento ve 170 kg/m³ su kullanmıştır. Üretilen betonlara 6 mm'lik ve 35 mm'lik çelik lifleri 25 kg/m³ veya 50 kg/m³ miktarlarında eklemiş ve ayrıca bazı serilerde

kısa ve uzun çelik lifleri birlikte kullanmıştır. Taze birim ağırlıkları yaklaşık 1900 kg/m³ olan beton serilerinin basınç dayanımlarının 30 MPa ile 38 MPa arasında değiştiğini, uzun çelik liflerin işlenebilirliği olumsuz etkilediğini, ancak kısa çelik liflerin işlenebilirliğe olumsuz bir etkisinin olmadığını belirtmiştir. Özellikle kısa ve uzun çelik liflerin birlikte kullanılması durumunda basınç dayanımının %30 ve eğilme dayanımının %43 arttığını söylemiştir. Elde edilen sonuçlardan biri de, eğilme dayanımında oluşan farkın 3 veya 7 gün gibi kısa beton yaşlarında değil, daha uzun beton yaşlarında ortaya çıktığıdır.

Igbal vd (2015) yaptıkları çalışmada, hafif ve yüksek dayanımlı beton serilerini geliştirilmiş kil ve mikro çelik lifler ile üretmişlerdir. 465 kg/m³ çimento ve 272 kg/m³ su kullandıkları beton serilerinde farklı miktarlarda mikro çelik lifler kullanmışlar ve yoğunlukları yaklaşık olarak 1700 kg/m³ olan beton serilerinden 60 MPa ile 68 MPa basınç dayanımları elde etmişlerdir. Beton serileri üzerinde basınç dayanımı yanında çekme ve elastisite modülü deneyleri de yapmışlardır. Sonuç olarak, kendiliğinden yerleşen hafif ve yüksek dayanımlı betonların üretilebileceğini, mikro çelik liflerin çekme ve eğilme dayanımlarına çok büyük katkılarının olduğunu, ancak basınç ve elastisite modülüne belirli bir katkılarının olmadığını söylemişlerdir. Çalışmalarında hafif beton üretimiyle vibratör kullanmaya gerek olmayacağına ve ilave yüklerin azaltılacağına vurgu yapmışlar, bunun yanısıra çalışmaların farklı çelik liflerle devam etmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Grabois vd (2016) yaptıkları çalışmada, dört farklı kendiliğinden yerleşen hafif lifli betonu geliştirilmiş kil agregasıyla üretmişler ve karışımların ikisinde 357 kg/m³ çimento ve 170 kg/m³ su, diğer ikisinde ise 329 kg/m³ çimento ve 188 kg/m³ su kullanmışlardır. Lifli serilerde 39 kg/m³ miktarında 35 mm uzunluğunda çelik lifi karışımlara eklemişler ve yoğunlukları yaklaşık olarak 1700 kg/m³ ile 1900 kg/m³ arasında değişen beton serileri oluşturmuşlardır. Basınç dayanımları yaklaşık olarak 31 MPa ile 37 MPa arasında değişen betonların, serbest yayılma değerlerinin sınır değerleri sağladığını, ancak lifli serilerin V-hunisi akış sürelerinin uzadığını söylemişlerdir. Sonuç olarak çimento oranı daha yüksek lifli serilerin daha sünek olduğunu ve ısı iletkenlik katsayılarının da daha yüksek olduğunu, çimento oranı düşük olan lifli serilerin ise biraz daha gevrek davrandığını ve daha küçük ısı iletkenlik katsayılarına sahip olduklarını belirtmişlerdir. Lifli serilerin yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olduğunu söylemişlerdir. Normal agregalı

serilere göre, hafif agregalı serilerin yaklaşık % 60 daha düşük ısı iletkenlik katsayılarına sahip olduklarını ve hafif agrega oranı arttıkça daha fazla kuruma rötresi oluştuğunu belirtmişlerdir.

Keskiner (2016), 400 kg/m³ çimento, 165 kg/m³ su kullanarak pomzalı hafif betonlar üretmiş ve bu betonlar içerisinde uzun ve kısa çelik lifler ve polipropilen lif kullanmıştır. Karışımlarda Bitlis yöresi pomzalarını iri agregalar ve doğal nehir agregalarını ince agregalar olarak kullanmış ve taze birim hacim ağırlıkları yaklaşık 1950 kg/m³ olan beton serileri üretmiştir. Yaptığı bazı taze beton deneyleri yanında, sertleşmiş beton deneylerinden de basınç, eğilme, ultrasonik ses geçirgenliği, asite ve yangına dayanıklılık gibi deneyleri de uygulamıştır. Basınç dayanımları yaklaşık olarak 30 MPa ile 43 MPa arasında değişen betonlar üretmiştir. Deneyler sonucunda mikro liflerin taze beton serilerine olumlu, makro liflerin ise olumsuz etkileri olduğunu, uzun çelik liflerin eğilme dayanımlarını fazlasıyla artırdığını söylemiştir. Ayrıca sıcaklık artışının numunelerde çatlak boyu, genişliği ve yoğunluğunu artırdığı sonuçlar arasında belirtilmiştir.

Aslani ve Kelin (2018), atık lastiklerden ürettikleri parça kauçukları, pomza agregası, çelik ve polipropilen lifleri birlikte kullanarak kendiliğinden yerleşen hafif beton üretmişlerdir. Ürettikleri dokuz farklı beton serisinin içerisinde 180 kg/m³ çimento, 135 kg/m³ uçucu kül, 33.75 kg/m³ silis ve 202.5 kg/m³ su kullanmışlardır. Kullanılan polipropilen lifler 65 mm ve çelik lifler 60 mm uzunluğundadır. Ürettikleri betonların yoğunlukları yaklaşık 1950 kg/m³ ve basınç dayanımları 13 MPa ile 22 MPa arasındadır. Beton serileri üzerinde taze beton deneylerinden serbest yayılma ve J-halkası deneyleri ve sertleşmiş betonlar üzerinde de yüksek sıcaklıklar sonrası basınç, çekme ve kütle kayıpları ölçülmüştür. Deneyler sonucunda, atık kauçuk malzemeler ve pomza birlikte kullanılarak kendiliğinden yerleşen betonların az miktarda çimento kullanarak üretileceği, artan lif miktarının akışkanlığı azalttığı, J-halkası deney aletinin donatılarından geçemeyen iri liflerin büyük alanlarda beton dökülürken sorun olmayacağı, hem polipropilen hem de çelik liflerin basınç ve çekme dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta çelik lifli serilerin dayanımlarını daha çok koruduğu, polipropilen liflerin ise yüzey çatlaklarını sınırladığı söylenmiştir. Betonlarda 900 °C sıcaklıkta dayanımların yaklaşık %20'sinin kaldığı ve 600 °C'den sonra betonların süneklik özelliklerini %50

kaybettiği sonuçları arasındadır. Kauçuk parçalı beton serilerinde kullanılan liflerin mukavemeti artırdığı ve işlenebilirliği azalttığı söylenmiştir.



3. KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON

Bu bölümde, Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) kapsamlı bir şekilde incelenerek, çalışma için gerekli bilgi ve altyapı ortaya konulmaya çalışılacaktır.

3.1. Tanımı ve Literatür İsimlendirmeleri

KYB sıkıştırma enerjisine ihtiyaç duymadan kendi ağırlığı nedeniyle akabilen, dar donatı aralığından kolay ve rahat geçen, ayrıışmayan ve aşırı terleme olmaksızın kalıp içinde bütün boşlukları doldurabilen yüksek performanslı özel bir beton türüdür.

KYB değişik isimlerle bilinen bir betondur. Geniş boyutlu yüzeylerde kullanılması halinde bu betona Kendiliğinden Yüzeylenen Beton (Self Levelling Concrete- **SLC**) denilmektedir (Rols vd, 1999). Kuzey Amerika kıtasında genel olarak, Kendiliğinden Konsolide Olan veya Çöken Beton (Self Consolidating Concrete- **SCC**) daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Stark and Friebert, 2005). En çok bilineni ise Kendiliğinden Sıkışan Betondur (Self Compacting Concrete- **SCC**).

Ülkemizde bu beton türü Kendiliğinden Yerleşen Beton olarak bilinmekte ve **KYB** şeklinde kısaltılarak kullanılmaktadır.

3.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tarihsel Gelişimi

Kendiliğinden yerleşebilen beton kavramı ilk olarak 1986 yılında Japonya Tokyo Üniversitesinde görevli Prof. Dr. Hajime Okamura sayesinde duyulmuştur. Bu betonun ortaya çıkışına, su altında beton dökümü uygulamalarında gerekli, vibrasyonsuz beton döküm tecrübesi öncülük etmiştir. Okamura ile başlayan çalışmaları Ozawa, Ouchi ve Maekawa devam ettirmektedir (Sarıdemir, 2006).

1988 yılında ilk kez KYB'lar betonarme yapılar için kullanılmıştır ve KYB hakkında ilk bildiri, 1989 yılında Ozawa tarafından Doğu Asya ve Pasifik Yapı Mühendisliği konferansında sunulmuştur (Aktürk, 2007). Bu bildirin 1992'de İstanbul'da düzenlenen CANMET & ACI Uluslararası Konferansında sunulması KYB'u dünya tarafından tanınan beton yapmıştır. Bu kongrede yapılan ön bilgilerin sunumu dünya üzerinde büyük yankı yaratmış, özellikle büyük depremlerle sarsılan

Asya ülkelerinde ve işgücünün pahalı olduğu Kuzey Avrupa ülkelerinde çeşitli yaklaşımlarla KYB üretimlerine başlanılmıştır (Özkul vd, 2006). KYB'un Amerika ve Kanada gibi ülkelerde yayılması ve üzerinde yoğun çalışılmaya başlanması 1996'da New Orleans'da düzenlenen ACI Kongresi sayesinde (Okamura ve Ouchi, 1999). Avrupa Birliği 1997-2000 yılları arasında aldığı kararla Avrupa ülkelerinde KYB'un kullanımının artırılmasını hedeflemiştir (Aktürk, 2007).

KYB üzerinde dünyada yapılmış araştırmaların amacı bu betonun tüm taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemektir. Günümüzde KYB'lar hakkında önemli birikimler ve büyük gelişmeler görülmekte, ancak bazı konularda hala cevaplanması gerekli sorular bulunmaktadır (Walraven, 2002).

3.3. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları

KYB üretilirken malzeme maliyetinin yüksekliği, tasarım ve uygulamada yeniliklere ihtiyaç duyulması, bu betonun normal beton kadar fazla kullanılmamasının sebepleridir. Günümüzde KYB'ların üretiminde değişik yöntemlerin geliştirilmesi bazı kuruluşların amaçları arasındadır.

Vibrasyona zaman ayırmamak için, büyük hacimli beton dökümlerinde, donatının sık ve kesitlerin dar olduğu perde yapılarında, yenileme, bakımlarda ve tünel yapılarında KYB kullanımı gerekli olabilmektedir (Aktürk, 2007).

Malzeme maliyetinin KYB için geleneksel betondan daha yüksek olması, onun ekonomik olmayacağı anlamına gelmez. Mesala, tünel inşaatlarında KYB'un ekonomikliği tartışılmaz, çünkü tünel inşaatlarında kaplama betonu yapılmaktadır ve bunun için hareketli vibratör ilave edilmiş bir kalıp sistemine ihtiyaç vardır. Vibrasyon nedeniyle kalıp hasara uğramakta ve inşaat hızı düşmektedir ve bu maliyeti artıran bir unsurdur. Özellikle tünel ağızlarında donatının fazla oluşu aşırı vibrasyon ihtiyacı doğurur ve zaman kaybına neden olur. Bu durumlarda KYB kullanımının inşaat hızını artırdığını ve maliyeti azalttığını de göz önünde bulundurmak gerekir (Bartos vd, 2002).

Betonarme yapıların üretiminde KYB kullanımı mimari bakımdan, geleneksel beton kullanımından avantajlıdır, çünkü KYB sayesinde daha kaliteli ve boşluksuz yüzeyler oluşturulabilir ve boşluksuz yüzeyler ise geçirimsizlik ve dayanıklılık demektir (Dowson, 2002).

Hafif betonların üretiminde KYB'un kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Hafif KYB üretilirken yüksek oranda hava sürükleyici ve hafif agrega kullanılarak hamur fazının yoğunluğunun azaltılması bilinen bir yöntemdir. Hafif KYB üretirken yüksek oranda kullanılması gereken toz maddenin betonu ağırlaştırması ve hafif agregaların çok su tutması dikkat edilmesi gereken sorunların başındadır (Akkaya vd, 2002).

Yol üst yapılarında geleneksel beton kullanılması durumunda sıkıştırma zorlukları, taşıma esnasında betonda ayrışma, yerleştirme süresinin artması gibi sorunlar ve geleneksel betonun yol üstü kaplama malzemesi olarak kullanılması durumunda gerekli yüzeysel vibratörler, betonun hava miktarını azalttığı için donmaya karşı dayanımı düşürmektedir. Bu yüzden yol üstü yapıları için KYB daha avantajlıdır (Felekoğlu vd, 2004).

Köprüler yapılırken KYB ile daha geniş giriş açıklıkları geçilebilir, köprünün daha uzun ömürlü olması sağlanabilir ve daha estetik kesitler yapılması mümkün olabilir (Mullarky ve Vanikar, 2000).

3.4. Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Geleneksel Beton Kıyaslaması

Kendiliğinden yerleşen betonlar geleneksel betonlarla kıyaslanmış ve aşağıda iki farklı başlık halinde üstünlük ve sakıncaları verilmiştir.

3.4.1. Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre üstünlükleri

1) KYB kalıba kolayca yerleştirilebilen, işlenebilir ve ayrışmayan bir betondur.

2) Sıkıştırılmaya ihtiyacı olmayan KYB'lar, yerleştirilme aletlerine de ihtiyaç duymayacağı için, bu aletler için harcanan paradan ve zamandan tasarruf sağlar. Aynı zamanda vibratör etkisinin kalıplara verdiği zararın da önüne geçilmiş olur. Beton yerleşimi sırasında oluşacak yüksek gürültünün önlenmiş olması insan sağlığı için de fayda sağlar. Bir fabrika binasında KYB ve normal beton kullanılması halinde oluşacak fayda, Çizelge 3.1'de sıralanmıştır (Walraven, 2002).

80 dB üzerinde bir ses; insanda stres, yorgunluk ve dalgınlık gibi rahatsızlıklara sebep olmaktadır. 0.25 m/sn^2 'nin üzerinde vibrasyon ivmesi vücut kan dolaşımını kötü etkiler ve kuvartz tozu kanserojen etkiye sahiptir. Bu tozun 5 mg/m^3 'ün üzerindeki değerleri insan sağlığı için tehlikelidir. Bu ve benzeri gibi

sağlık sorunlarının önüne geçilmesi işçilikte %5 tasarruf sağlar (Walraven, 2002; Sarıdemir, 2006).

Çizelge 3.1. KYB kullanımının fabrika içi çalışma koşullarına etkisi (Walraven, 2002)

Etki	Normal beton	KYB kullanımı
Fabrika içi gürültü seviyesi	93 dB	<80 dB
Kalıplara etkiyen dinamik yük	0,75-4 m/sn ²	≈ 0 m/sn ²
Fabrika içi toz konsantrasyonu	3-4 mg/m ³	0.2 mg/m ³

3) Genel bir yaklaşım olarak, sadece üretimde kullanılacak malzemeler düşünüldüğünde KYB pahalıdır, ancak yerleştirmeye harcananlar, kalıpların sökülmesi ve bakımı gibi maliyetler KYB'nun benzer dayanımlı bir geleneksel betondan daha hesaplı olduğunu ispatlamaktadır. Arjantin'de yapılmış bir çalışmada hazır beton üretirken eğer KYB kullanılırsa malzeme maliyetlerinin %25 fazlalaştığı, ancak işçilik maliyetinin %75 azaldığı söylenmiştir ve inşaatın %25 daha çabuk tamamlandığı bildirilmiştir (Daczko, 2002). Prefabriğe beton üreten bir yurtdışı şirketinin 2002 yılı için metreküp başına geleneksel betonla, KYB maliyetlerini çıkardığı maliyet hesabı Çizelge 3.2'de görülmektedir. Bu çizelgede kıyaslanan betonlar benzer dayanımlı, 69 cm serbest yayılabilen KYB ile 15-20 cm çökme yapan geleneksel beton (GB) maliyetidir (Dowson, 2002).

Çizelge 3.2. Prefabriğe olarak üretilen, aynı basınç dayanımına sahip geleneksel betonla KYB arasında toplam maliyet karşılaştırması (Dowson, 2002)

Maliyet unsurları	Geleneksel beton TL/m³	KYB TL/m³
Beton (çimento, agrega)	55.4	57.8
Kimyasal Katkı	5.3	12.6
Kalıp Montaj İşçiliği	7.6	7.6
Kalıba Yerleştirme, Sıkıştırma ve Perdahlama	40.3	4.6
Kalıp Sökümü	11.3	7.6
Vibrasyon hasarı ve bakımı	1.5	0
Toplam Maliyet	121.4	90.2

Çizelgeden anlaşıldığı gibi, malzeme açısından bakıldığında KYB biraz daha maliyetli ise de toplam maliyetler düşünüldüğünde, daha ucuz bir beton olduğu söylenebilir. Maliyet hesaplamalarında bölgesel şartlar gözönüne alınırsa daha doğru sonuçlar elde edilir.

4) Betonun boşluksuz şekilde yerleşebilmesi mukavemetini artırır. Deprem yaşayabilecek bölgelerde daha çok tercih edilen ve genel olarak sıkı donatı içeren perde tipi kolonlu yapılar için vibratör uygulaması önemli bir problemdir. Ayrıca betonarme yapılarda düğüm noktalarında betonun yerleşmesinde büyük sıkıntılar mevcuttur. KYB yerleşim sorunları için vazgeçilmez bir beton türüdür (Walraven, 2002).

5) KYB daha iyi pompalanabilir bir betondur, çünkü ayrışma problemi çok azdır. Bu konuda KYB, geleneksel betondan üstündür ve pompa içinde oluşan basınç KYB'da % 20 daha azdır (Martin, 2002).

6) KYB içinde kullanılan kimyasal maddeler erken dayanımı artırdığından, kalıp daha erken alınabilmektedir. Özellikle prefabrike yapılarda kalıpların sökülmesi hızlandırılırsa, geleneksel betonda yeterli dayanım oluşmamış olduğundan üretim kayıpları %15-20'lere ulaşır, oysa KYB için bu oran %5'lere kadar düşer (Hughes vd, 2002). KYB kalıpların kurulum ve sökme işlerini %50'ye kadar azaltır (Walraven, 2002).

7) KYB boşluksuz yerleşebildiğinden düzgün yüzeyli betonlar üretilmesine yardımcı olur ve bu sayede brüt betonlar üretilerek sıva ihtiyacı ortadan kalkar. Sıva istenen kısımlarda ise bu beton aderans kaybı nedeniyle sıkıntı oluşturabilir. Diğer taraftan donatı ile kalıp arasına iyi yerleşen KYB paspayı tabakalarını doğru oluşturduğu için betonun durabilitesini artıran etkiye sahiptir (Sarıdemir, 2006).

8) Sanatsal yapıların üretimi için mesela heykel yapımında kullanılır.

9) Deprem için yapılacak güçlendirmelerde, tadilat ve bakım işlerinde genel olarak dar kalıplar kullanılmaktadır. Bu kalıplar için de uygun beton KYB'dur.

10) Prefabrike beton üretiminde karşılaşılan önemli bir problem, betonun yerleşimi sırasında oluşan boşlukların tamir ihtiyacıdır. KYB kullanımı ile rötuş yapılma oranlarının %25 ile %75 arasında azaldığı bilinmektedir (Martin, 2002).

11) Kimyasal katkıların KYB'lar için sürekli güçlendirilmesi çok daha akıcı, su/çimento oranının fazlaca düşürüldüğü ve mukavemeti yüksek betonların üretilmesi, yani beton kalitesinin artırıldığı anlamına gelmektedir (Corradi vd, 2002).

3.4.2. Kendiliğinden yerleşen betonun geleneksel betona göre sakıncaları

1) Yeni bir beton türü olmasından dolayı, tasarım kriterleri ve deneyleri için standart eksikliği kalite kontrollerini zorlaştırmaktadır (Yardımcı, 2007).

2) KYB'da malzeme çeşidi ve oranı konusunda hassas olunmalıdır, çünkü değişimler üretilen betonun niteliğini fazlaca değiştirir (Korkmaz, 2011).

3) KYB için malzeme maliyeti geleneksel normal betondan fazladır. Kullanılan kimyasal katkıları bu maliyeti artıran önemli bir faktördür (Daczko, 2002).

4) KYB'lar için toz madde çok önemlidir bu konuda bölgesel farklılıklar beton kalitesini etkiler (Sarıdemir, 2006).

5) KYB dökümü sırasında ara verilirse iki karışım arasında derz oluşabilir. Eğer iki karışım dökümü arasında 5 ile 30 dakika olursa, iki betonun birbirine kaynaşması için vibrasyona gerek vardır (Khayat ve Morin, 2002).

6) KYB'nun özellikle ilk dönemlerde kür ihtiyacı dikkat edilmesi gerekli bir konudur, en azından ilk 7 gün kür çok önemlidir (Brameshuber ve Uebachs, 2002).

7) Bazı yerlerde betonlar hareketli bantlar ve kovalarla yerine taşınmaktadır. KYB kullanılması halinde taşıyıcı bantlar kullanılamaz ve kovalar sızdırmaz kapaklı olmalıdır. KYB yerleştirilirken, yerleştirme süresi artarsa, soğuk derzler oluşabilir (Sarıdemir, 2006).

8) KYB dökümü için kullanılan kalıplar, normal beton kalıplarına göre daha sızdırmaz olmalıdır. Bazı kalıplarda kullanımları (mesela merdivenler kalıpları) çok zordur (Sarıdemir, 2006).

9) KYB'larda karıştırılma süresinin artması akıcılığı artırır ve viskozitesini düşürür. Viskozitenin uygun hale gelmesi için karıştırma süresi normal betona oranla biraz daha fazladır (Sarıdemir, 2006).

3.5. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Bileşenleri

KYB içinde kullanılacak malzeme bileşenlerinin veya miktarlarının değiştirilmesi taze betonun reolojisini fazlasıyla etkiler. Reoloji; gerilme altında malzemenin akışıyla ve deformasyonu ile alakalı bir bilim koludur. Reoloji gerilme, birim deformasyon, deformasyon hızı ve zamanının birbiriyle ilişkisiyle ilgilenir ve reolojik parametrelerin ölçümü için kullanılan alete reometre denir.

KYB bileşenleri itibarıyla geleneksel betonla kıyaslandığında en büyük farkın, kullanılacak toz miktarının artması ve akışkanlaştırıcı bazı kimyasal maddelerin kullanılması olduğu görülür. Değişik bölgeler için hem toz malzeme hem de agreganın farklılık göstereceği bilinmelidir (Gönen, 2009).

Beton karışımında kullanılan malzemelerin farklı yapıları bilinirse optimum karışım için gerekli oranlar belirlenebilir (Gönen, 2009).

3.5.1. Kullanılan agregası

Beton agregası, betonun yapısını en fazla değiştiren malzemelerdendir. Bu yüzden agreganın uygun değerlerde kullanılması beton mukavemeti ve durabilitesini olumlu yönde değiştirecektir. Agregayla ilgili olarak, agregası çeşidi, çakıl/kum oranı, agregası granülometrisi ve agreganın tane çapının büyüklüğü gibi özellikler hem geleneksel betonun hem de KYB'un özelliklerini değiştirir (Yazıcı, 2003).

KYB'da geleneksel betonda kullanılan her tür agregası kullanılabilir. Kıırma, doğal, kalker esaslı veya durumun gerektirdiği silisli agregalar KYB üretiminde kullanılabilir. Doğal agregası daha pürüzsüz yüzeyi nedeniyle içsel sürtünme değerini düşürüp, işlenebilirliği artırdığı için kırma agregasıya göre tercih edilebilir. Kullanılan agreganın 125 mikronun altında olan bölümü, beton reolojisi nedeniyle karışım hesaplarında toz malzeme kabul edilir (EFNARC, 2002). Betonda toz malzeme denilince çimento, uçucu kül silis ve taş tozu gibi malzemelerin tamamı anlaşılır.

Agregasıya ait granülometri, KYB'un işlenebilirliği ile ön planda olan bir beton olması nedeniyle çok daha önemlidir. Uygun agregası dağılımı, geleneksel betonda olduğu gibi doluluğu sağlar ve dayanım kayıplarını önler. Kesikli granülometri de KYB'da kullanılabilir (Özkul vd, 2005).

Uygun içsel sürtünme için iri/ince agrega oranının düşük tutulması gerekir. Kum miktarı artarsa betonun donatılar arasından geçiş kabiliyeti artmış olur (Özkul vd, 2005). Ancak iri agrega miktarının çok düşürülmesi betonun basınç dayanımını düşüreceğinden iri/ince agrega oranı iyi ayarlanmalıdır. Bu açıdan betonun 1 metreküp hacmi içerisinde en uygun kum hacmi %45-48 olarak tespit edilmiştir (Fang vd, 1999). Çizelge 3.3’de kum miktarı artışının etkileri gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Toplam hacimdeki kum oranı artışının kendiliğinden yerleşen betonun yayılma çapı ve basınç dayanımına etkisi (Fang vd, 1999).

No	Kum oranı %	Su/toz oranı	Yayılma çapı (mm)	Basınç dayanımları (MPa)	
				7 günlük	28 günlük
1	39	0.32	70	33.5	51.6
2	42	0.32	71	31.7	50.1
3	45	0.32	71.5	35.5	50.4
4	48	0.32	75	37.9	53.7
5	51	0.32	75	33.8	48.7

Betonda kullanılacak en iri agrega tane çapı için farklı görüşler belirtilmiştir. Bu görüşlerden en yaygın olanı, KYB’da donatılar arası sorunsuz geçiş için agrega en büyük tane çapının küçük tutulması şeklindedir. Agrega en büyük tane çapı üst sınırı 16–20 mm arası olabilir (Ouchi, 1999). Sari vd (1999)’ne göre KYB’da V-hunisinde tıkanma olmaması amacıyla en büyük tane çapı 15 mm’ye kadar düşürülmelidir.

KYB’da agrega seçimi birçok bakımdan önemlidir. Örneğin nehir agregası kullanılan beton, kırmataş agregası kullanılabildiği göre daha az suya ihtiyaç duyar. Kırmataş, yüzey pürüzlülüğü nedeniyle taze betonun viskozite özelliklerini olumsuz yönde değiştirir. Ancak kırmataşın aderans yeteneği, nehir agregalarından yüksektir (Sarıdemir, 2006).

3.5.2. Kullanılan toz madde (filler)

Toz maddenin tanımı, “parçacık büyüklüğü 125 mikrondan daha küçük her çeşit inorganik madde” şeklindedir. KYB üretimi için toz malzeme çok önemlidir. Uçucu kül, taş tozu, silis dumanı ve farklı bölgelerde farklı malzemeler olarak karşımıza çıkan toz malzemeler, KYB üretiminde viskozite için gereklidir (Erdoğan,

1997). Beton karışımının iskelet yapısını güçlendiren toz malzeme, beton yapısını doldururken, çimento harcının agregaların etrafını daha iyi kuşatmasına imkan verir (Sarıdemir, 2006).

Küresel biçimi ve mikro yapısıyla KYB için uygun bir malzeme olan uçucu kül, termik santrallerin bir atığıdır. Farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri olan uçucu kül çeşitlerinin birçoğu KYB üretiminde kullanılmakla beraber, kullanılacak uçucu kül önce deneme karışımlarıyla test edilmelidir (Punkki vd, 1996). Uçucu kül, düşük eşik kayma gerilmesine sahiptir ve taş tozuna göre daha yüksek viskozite sağlamaktadır (Yahia vd, 2002).

KYB üretiminde kullanılan toz malzemelerden biri de taş tozudur. Özellikle taş ocaklarından elde edilen atık tozlar kullanılmaktadır. Kireçtaşı tozu bunlar içinde en yaygın olanıdır. Ancak tebeşir tozu gibi özel tozlar da kullanılabilir (Xie vd, 2005). KYB bileşenlerinde ince öğütülmüş olan, Blaine değeri $>2500 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan kireç taşı tozu veya granit, kuvars tozları kullanılabilir. Taş tozunun homojen dağılmış olması betonun dayanımını doğrudan etkiler. Taş tozu negatif yüklü olması nedeniyle pozitif yüklü kum ve iri agreganın yüzeyine yapışmaktadır. Bu yapışmayı önlemek için önce çimento ve taş tozunu birbirine karıştırmak daha sonra da agreganın beton karışımında yer alması genel bir yaklaşımdır (Brouwers and Radix, 2005).

Silis dumanı çimento taneciklerine göre yaklaşık yüz kat daha küçük çaplıdır. Silis dumanı metal üretiminin bir yan ürünüdür ve içeriğinde %85 ile 98 arasında SiO_2 bulundurur. Metal elektrik ark fırınlarında hammadde olarak kullanılan saf kuvarsın kömürle redüklenmesinden meydana çıkan silis reaktif bir malzemedir (Sarı vd, 1999). Aynı uçucu kül ve diğer puzolanlar gibi C_3S ve C_2S hidrasyonundan gelen serbest kireci bağlar ve ilave kalsiyum silikat hidrat (CSH) oluşumuna neden olur. Buradaki CSH yapısı normal çimento hidrasyonundan oluşan CSH yapısından farklıdır. Silis dumanı kullanımı yüzey alanı artışıyla kimyasal katkı emilimini arttırdığından, kimyasal katkının verimini azaltır. Bu nedenle silis dumanı, diğer puzolanlar gibi yüksek dozajlarda kullanılmamalıdır. Silis dumanı için en yüksek dozaj, çimento ağırlığının %15'i, optimum dozaj ise %10'u kadardır. Bu değer geçilmesi halinde hızlı işlenebilirlik kaybı ve yükselen hidrasyon ısı sebebiyle uygulamada zorluklar yaşanabilir (Fang vd, 1999; Gönen, 2009).

Bazı toz maddeler bölgeseldir ve bunların uygunluğu araştırıldıktan sonra KYB üretiminde kullanılması mümkündür.

3.5.3. Kullanılan çimento

EN 197-1'e uygun bütün çimento çeşitleri KYB üretiminde kullanılabilir. KYB'da yeni ve özel bir çimento yoktur (Özgüler, 2007). C₃A oranı %10 üzerinde olan çimento çeşitleri hızlı etrenjit ve hidrasyon ısısının yüksek olması nedeniyle işlenebilirliğin azalmasına yol açtığından, KYB tasarımı için tavsiye edilmez. Aynı kimyasal bileşimli çimentolarda bile çimentonun incelik yapısı artarsa, kullanılması gereken su miktarı artar, artan su miktarı ise dayanımı azaltır (Zhu and Gibbs, 2005).

Çimento dozajının 350–450 kg/m³ arasında seçilmesi önerilmektedir. 500 kg/m³'ün üstünde seçilecek çimento miktarı rötreyi artırdığından istenmez. Çimento dozajının 350 kg/m³'ün altında olması ilave olarak kullanılacak filler malzemeler veya viskoziteyi artıran kimyasal maddelerle kullanıldığında mümkündür. Beton karışımlarında viskoziteyi artıran malzemeler bulunmazsa KYB içinde toplam toz madde hiçbir zaman 500 kg/m³'ün altında olmamalıdır (Zhu ve Gibbs, 2005; Gönen, 2009).

3.5.4. Kullanılan kimyasal katkı

KYB'nun geleneksel betonla arasındaki farkların başında, karışımında kullanılması gerekli değişik kimyasal katkıların varlığı gelir. Akışkanlaştırıcı, hava sürükleyici, beton priz yapısını değiştiren, viskozite arttırıcı gibi birçok çeşidi olan kimyasalların çoğunluğu sıvıdır.

Kimyasal katkı malzemeleri betonun hem taze hem de sertleşmiş yapısının niteliklerini değiştirmek için betona eklenir. Çimento miktarının % 5'ini aşmamalıdır. KYB'da yüksek oranda su azaltıcı veya süper akışkanlaştırıcı olarak bilinen katkılar en fazla kullanılan katkılardır. Süper akışkanlaştırıcılar şöyle özetlenebilir (Gönen,2009):

1. Sülfone olmuş sentetik polimerler
2. Polikarbonatlar
3. Karma fonksiyonlu sentetik polimerler

KYB’da viskozite düzenleyici katkıları da kullanılmaktadır. Süper akışkanlaştırıcı kimyasallar, betonda yüksek akıcılık istendiğinde ve su/bağlayıcı oranının düşürülmesinde kullanılır. Viskozite düzenleyici katkı malzemeleri terleme ve çökme gibi ayrışmaları en aza indirmek, betonun kayma eşiğinin düşürülmesi ve beton homojenliğinin elde edilmesi için gereklidir (Sağlam, 2000).

KYB’da dayanımın artırılması ihtiyacıyla ve yüksek performans amaçlı katkıları da kullanılır. Akışkanlaştırıcılar, betonun plastik viskozitesini ve eşik kayma gerilmesini düşüren etkiye sahiptirler (Gönen, 2009).

3.5.5. Kullanılan su

KYB’da, geleneksel betonda kullanılan niteliklere sahip sular kullanılmaktadır. Kullanılacak su TS EN 1008’e uygun olmalıdır. Beton karışımlarında kullanılacak su çok temiz olmalıdır ve su içerisinde zararlı olabilecek oranlarda bulunabilecek silt, kil, organik kökenli malzemeler olmamalıdır. Ayrıca klorür, asit, sülfat gibi kimyasallar ile madeni yağ ve endüstri atıklarının da su içerisinde olmasına izin verilmemelidir. Suyun içinde bulunacak zararlı malzemeler, üretilecek betonun taze ve sertleşmiş beton özelliklerini doğrudan etkiler.

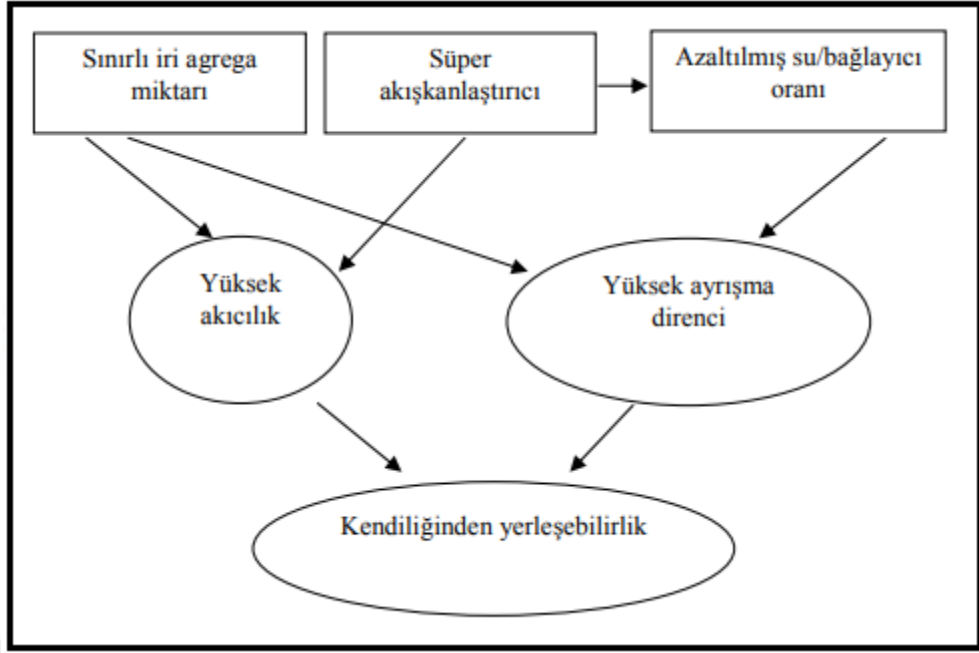
3.6. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Tasarımı

KYB tasarımı yapılırken gerekli temel ilkeler şunlardır (Zhu ve Gibbs, 2005):

- Artırılmış çimento hamur hacmi,
- Azaltılmış iri agrega miktarı,
- Su/toz oranının azaltılması,
- Süper akışkanlaştırıcı malzemelerin gerektiği kadar kullanımı,
- Viskoziteyi artıran malzemelerin kullanımı.

3.6.1. KYB’nun tasarımında uygun oranlar

İyi bir KYB üretilmesi için gerekli özellikler Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. KYB elde edilmesi için genel yaklaşım (Okamura ve Ozawa, 1995)

Çok değişik bölgelerde, farklı malzemelerle üretilen KYB'lar için çalışmaların toplam sonucu olarak bazı limitler oluşturulmuştur. Aşağıdaki verilen bütün ifadeler hacimseldir (Skarendahl and Peteson, 2000; Kılınç, 2007).

1. Üretilecek beton hacminin yalnızca %30-34'ü iri agrega olmalıdır.
2. Seçilecek su/bağlayıcı oranı hacimce 0.8–1.2 arasında olmalıdır.
3. Viskoziteyi artıracak malzemeler kullanılmaz ise $155\text{--}175\text{ l/m}^3$ su uygundur, bu miktar viskozite artırıcı malzeme ilavesi ile 200 l/m^3 'e kadar çıkabilir.
4. Toplam betonda %34-40 arası çimento hamuru hacmi olmalıdır.
5. Çimento harç hacmininin %40-50'si kadar ince agrega koyulabilir.

Bu sınır değerler ile ağırlıkça miktarlar kabaca şöyle olur:

İri agrega miktarı : $750\text{--}920\text{ kg/m}^3$

İnce agrega miktarı : $710\text{--}900\text{ kg/m}^3$

Bağlayıcı miktarı : $450\text{--}600\text{ kg/m}^3$

Su miktarı : $150\text{--}200\text{ kg/m}^3$

3.6.2. Taze betonun işlenebilme özelliği

İşlenebilirlik özelliği, betonun taze haldeyken karıştırılabilir ve yerleştirilebilirliğinin iyi olması ve homojen kalabilmesidir. İşlenebilir bir beton minimum enerji harcanarak karıştırılıp, kalıba yerleştirilir ve mukavemetli olur (Aktürk, 2007). KYB'ların kalitesi öncelikle taze beton özellikleriyle ölçülür. Kendiliğinden yerleşebilirlik üç adet değişkenle ifade edilebilir (Gönen, 2009);

- Doldurma yeteneği
- Ayrışmaya karşı direnç
- Geçiş yeteneği

3.6.3. Doldurma yeteneği

KYB'lar kendi ağırlıkları sayesinde hareket ederken şekilsel olarak bir değişim ve deformasyon göstermeli ve kalıbın şeklini almalıdır. Doldurma yeteneği, betonun döküldüğü noktadan hangi uzaklığa akabildiği ve bu akış sırasındaki hızı yani deformasyon hızıdır. Betonun yayılma çapı ve bu çapa erişilmesi için geçen sürenin ölçülmesi, doldurma kapasitesiyle alakalıdır (Aktürk, 2007).

KYB'da deforme olma kalitesinin artırılması bağlayıcı malzemelerin, iri ve ince agregaların yani bütün katı tanelerin birbiriyle sürtünmesinin azaltılmasıyla mümkündür. Buna ilave olarak çimento hamurunun da iyi şekil değiştirmesi gerekir. Uygun doldurma yeteneği için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır (Bui vd, 2002).

Çimento hamuru iyi bir şekil değiştirme gösterecekse;

- Uygun miktarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmalıdır.
- En uygun su/bağlayıcı oranı bulunmalıdır.

Tanelerin birbiriyle sürtünmesinin azaltılması için;

- Düşük oranda iri agrega hacmi beton karışımında yer almalıdır.
- Kullanılan agrega ve çimento için granülometri iyi ayarlanmalıdır.

3.6.4. Ayrışmaya karşı direnç

Taze betonun ayrışması (segregasyon), beton içindeki malzemelerin betonun her bölgesinde homojen olarak dağılmamasıdır.

KYB'ların ayrışma yapmaması gerekir, bunun için (Aktürk, 2007);

- Terleme olmamalıdır.
- Çimento hamurundan agrega ayrılmamalıdır.
- Bir alanda sıkışma yaparak iri agrega beton içinden ayrılmamalıdır.
- Beton içinde hava boşluğunun dağılım düzensizliği olmamalıdır.

Uygun bir ayrışma direncine sahip beton için;

- Düşük oranda su/bağlayıcı olmalıdır.
- En büyük agrega tane çapı azaltılmalıdır.
- Sınırlı agrega içeriği gereklidir.
- Viskozite arttırıcı gerekir.

Serbest terlemenin en aza indirilmesi için;

- Düşük miktarda su kullanılmalıdır.
- Su/bağlayıcı oranının düşürülmesi gerekir.
- Yüksek yüzey alanı olan bağlayıcıların kullanımı sağlanmalıdır.
- Viskozite arttırıcı malzemeler gerekir.

3.6.5. Geçiş yeteneği

KYB dar alanlardan ve çok sık donatı aralıklarından geçerken homojen kalarak çok iyi performans sergilemelidir.

Doldurma yeteneğine ve ayrışma direncine sahip bir KYB'da aşağıdaki durumlar görülürse, sıkışmalar yaşanarak tıkanmalar olabilir (Aktürk, 2007) ;

- Kullanılan agreganın en büyük tane çapı büyük seçilmiştir.
- İri agregaların miktarı fazladır.

Geçiş yeteneğinin iyileştirilmesi, agregada oluşacak ayrışmanın azaltılması ve kohezyonun artırılması için;

- Su/bağlayıcı oranı düşürülmelidir.
- Viskozite arttırıcı malzeme kullanılmalıdır.

Uygun miktarda iri agrega ile geçiş yeteneğini iyileştirmek için;

- İri agrega hacmi mümkün miktarda azaltılır.
- En büyük tane çapının düşürülmesi gerekir.

3.7. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

KYB'un mekanik özellikleri malzeme bileşenlerinin çeşidine, malzeme bileşen oranlarına ve taze haldeki beton özelliklerine bağlıdır. Geleneksel betonun sınıflandırılması günümüzde genel olarak basınç dayanımına göre yapılırken, gelecek için KYB'ların sınıflandırılması işlenebilirlik özelliklerine göre olacaktır (Perez vd, 2002).

KYB'un istenen mekanik ve fiziksel yeterlilikleri göstermesi için gerekli kriterler şunlardır (Sarıdemir, 2006);

- Malzeme çeşidinin ve oranlarının uygunluğu, böylece en uygun karışım sağlanabilir.
- Üretim sırasında malzeme çeşit ve oranlarındaki değişimi en aza indirgeyerek üretiminde hassas davranmak.
- Ortam koşullarının KYB üretimine etkisine dikkat etmek.
- Taze beton yapısının uygun deneylerle kontrolünün yapılması.

Geleneksel beton üretimi için de önemli olan yukarıda söz edilen kavramlar, daha hassas üretim yapılması gereken KYB için çok daha önemlidir.

3.7.1. Basınç dayanımı

KYB'da basınç dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi talep edilen sınıfın elde edilmesi bakımından önemlidir. KYB karışımında bulunan toz malzemenin karışım suyunu tutması, aslında yüksek gibi görünen S/Ç oranını düşürür, yani aynı S/Ç oranına sahip olsalar da KYB basınç dayanımı, geleneksel betondan yüksek çıkabilir.

KYB'da kullanılan toz malzemenin çeşidi, bu tozların puzolanik özellik gösterip göstermediğine göre dayanım sınıfını değiştirebilir. Bu değişkenlik diğer mekanik özellikleri de etkileyecektir. KYB üretiminde kullanılan toz malzemenin çeşidi ve miktarı çok farklılıklar gösterdiğinden (silis, taş tozları, uçucu küller, doğal ve yapay cürufklar vb.) dayanım sınıfı sadece su/çimento oranıyla belirlenemez.

Yapılmış bir çalışmada, 300-350 kg/m³ çimentoya uçucu kül ilave ederek, toplam toz (çimento dahil) miktarı 500-600 kg/m³'e çıkarılmış ve üretilen bu kendiliğinden yerleşebilir betonlarla, 28 günde 60-80 MPa'lık basınç dayanımları elde edilmiştir (Xie vd, 2002).

Sonuç olarak, KYB'larda basınç dayanımları, bileşenlerin farklılığı ve standardizasyon eksikliği sebebiyle kolayca tahmin edilemez. Geleneksel beton için kullanılan dayanım sınıfı ve su/çimento oranı tabloları başlangıçta KYB için kullanılabilse de elde edilen dayanım, beklenen dayanımın üzerinde olur.

Yapılmış bir projede üç değişik inşaatta kullanılmış KYB'nun basınç dayanımlarının, öngörülen ile deneyde elde edilen değerleri çizelge 3.4'de kıyaslanmıştır (Bernabeu ve Laborde, 2000; Sarıdemir, 2000). KYB'lardan alınan numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulunca geleneksel betona göre standart sapması düşük olur (Li ve Hwang, 2002). Aşağıda Çizelge 3.4'te İsveç'te çeşitli şantiyelerde üretilmiş KYB'ların öngörülen ile deneylerde elde edilmiş basınç dayanımları gösterilmiştir. Çizelge 3.4'te verilen dayanımlar, İsveç'te kullanılan beton sınıflandırma sisteminde silindir numunenin MPa cinsinden basınç dayanımıdır.

Çizelge 3.4. Öngörülen dayanım ile elde edilen KYB dayanımları arası ilişki

Şantiye	Öngörülen beton sınıfı	Deneyde elde edilen (MPa)
LYONS	B25	35
QRESUND	B50	70
MOTALA	B50	75-80

3.7.2. Çekme dayanımı

Bir betonun en zayıf yönlerinin başında çekme dayanımının düşüklüğü gelir. Aynı basınç mukavemetine sahip geleneksel betonla KYB kıyaslanmasında çekme dayanımlarının pek farklı olmadığı görülmektedir (Ramachandran ve Malhotra, 1984).

3.7.3. Aşınma dayanımı

Aşınma, sürtünme nedeniyle malzeme yüzeyinden küçük parçaların kopmasıdır. Aşınma oranı malzemenin türüne, sertlik yapısına, sürtünen yüzeylerin farklılığına ve sürtünme ortam ve şartlarına bağlıdır. Felekoğlu (2003), KYB'ların geleneksel betonlardan daha az aşındığını belirtmiştir.

3.7.4. Erken dayanım

Süper akışkanlaştırıcıların çeşidi ve kullanım miktarı erken dayanım için KYB'larda farklı sonuçlara neden olmaktadır.

Süper akışkanlaştırıcılar, kendiliğinden yerleşebilirliği sağlamak amacıyla kullanılır, ancak bu arada, karışımda bulunan su miktarını azaltırlar ve bu nedenle erken dayanıma imkan sağlarlar. KYB'larda taş tozu kullanılınca erken dayanım artarken, uçucu külün beton karışımında kullanılması erken dayanımda düşüşe neden olur. Silis dumanı ile polikarboksilat içeren akışkanlaştırıcı malzemelerin birlikte kullanımı erken dayanımı hızlandırır. Viskozite Arttırıcı Kimyasal Katkıların (VAK) beton üretiminde kullanılması, KYB'un dayanım kazanmasını geciktirir (Ferraris vd, 2000).

Shi vd (2002)'de yaptıkları çalışmada, Viskozite arttırıcı kimyasalların (VAK), basınç dayanımlarını 7 günlük sürede azalttığını, ancak 28 günde değiştirmedğini söylemişlerdir.

3.7.5. Donatı aderansı

Aynı basınç dayanımına sahip geleneksel beton ve KYB için donatıyla olan aderansları eşittir veya KYB aderansı daha iyidir diyen çalışmalar vardır, ancak KYB'nun donatı aderansının klasik betona oranla daha yüksek olduğu görülmüştür (Daczko, 2002).

3.7.6. Büzülme ve sünme

Yüksek miktarda toz madde içermesi nedeniyle plastik büzülme yapma ihtimali yüksek olan KYB'un erken zamanlı kürü önemlidir ve KYB sünmesinin de geleneksel betona göre yüksekliği daha önce yapılmış çalışmalarda değinilmiş bir

konudur (Roshavelov, 2002). KYB üretimine kuruma büzülmesi yönünden bakılırsa, uçucu kül yerine taş tozunun tercih edilmesi gerektiği görülür (Ambrosie ve Pera, 2002; Attiogbe vd, 2002).

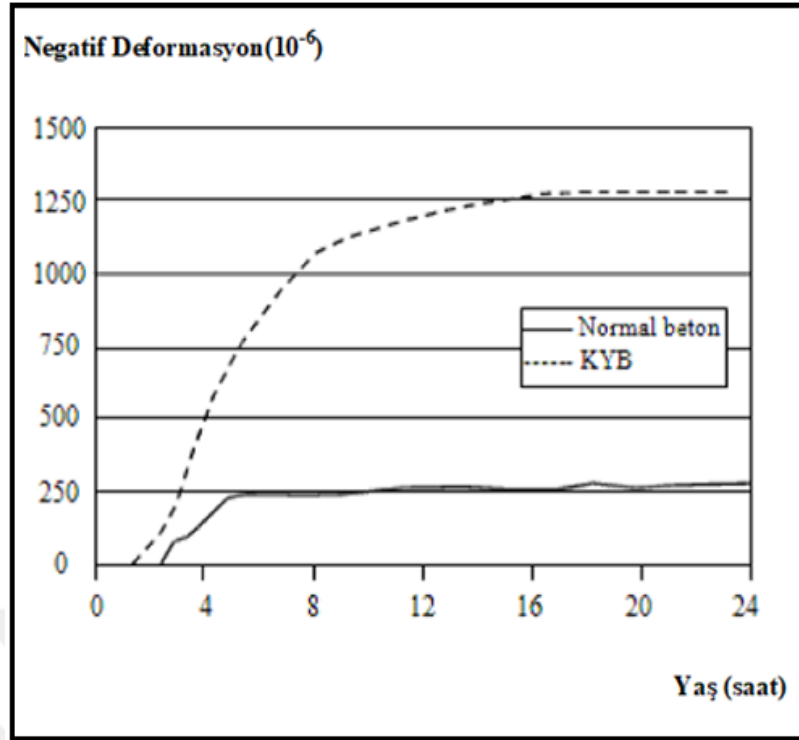
Ramsburg ve Neal, (2002) yaptıkları çalışmada kuruma büzülmesi bakımından KYB ve geleneksel beton benzetmektedir, demişlerdir. Francy ve Chopin (2001), uçucu külün kuruma büzülmesini artırdığını belirtmiştir. KYB’da agrega gradasyonu incelerse veya oran olarak kum/iri agrega artarsa, kuruma büzülmesi artar (Ambrosie ve Pera, 2002; Attiogbe vd, 2002).

Önceden yapılmış bir çalışmada, KYB ve geleneksel beton plastik büzülme ve kuruma büzülmesi bakımında kıyaslanmıştır. Çizelge 3.5’de gösterilen bileşenlere sahip bu betonların büzülmeleri Şekil 3.2’de ve Şekil 3.3’de gösterilmiştir. Aynı basınç dayanımına sahip KYB’da plastik büzülmenin, geleneksel betondan 4 kat fazla olduğu (Şekil 3.2), fakat kuruma büzülmelerinin aynı olduğu (Şekil 3.3) sonucu elde edilmiştir. KYB’da düşük su/toz oranı ve yüksek oranda akışkanlaştırıcı kullanılması plastik büzülme hassasiyetini arttırmaktadır. Bu nedenle KYB üretiminde her hava koşulunda erken zamanlı küre önem verilmelidir. Normal Betona (NB) göre KYB’da plastik büzülme çatlak riski fazladır (Turcry vd, 2002).

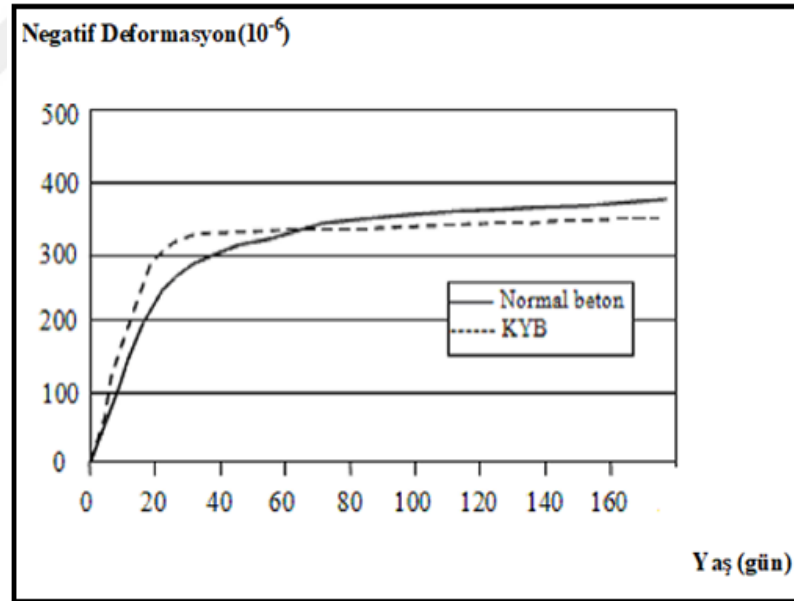
Çizelge 3.5. Karışım tasarımı ve taze beton deney sonuçları (Turcry vd, 2002)

	Çimento kg/m ³	Taş tozu kg/m ³	Çakıl kg/m ³	Kum kg/m ³	Akışkan- laştırıcı kg/m ³	VAK kg/m ³	Yayılma, çökme (cm)	L kutusu oranı
KYB	350	150	790	860	5	3.43	65	0.80
NB	360	-	1070	780	0	-	10	-

KYB’da kuruma büzülmesi daha düşüktür veya en azından geleneksel betonla aynıdır diyen araştırmacılar bunun düşük su/toz oranı sebebiyle olacağını düşünmektedirler (Raghavan vd, 2002).



Şekil 3.2. Plastik büzülme karşılaştırması



Şekil 3.3. Kuruma büzülmesi karşılaştırması

3.7.7. Boşluk yapısı

Beton iç boşluk yapısı, basınç, donma-çözünme dayanımları ve aynı zamanda da betonun iletkenlikleri gibi önemli konuları etkileyen bir özelliktir. KYB'un boşluklarının çapı geleneksel betondan daha büyük ama bağlantısızdır. Kapiler su

emme deneyi yapılan aynı basınç dayanımlı KYB’da 24 saatte 2.9 cm, geleneksel betonda ise 4.4 cm kapiler yükselme olmuştur. Ancak su emme oranları KYB için %6.1, geleneksel betonda ise %4.9 olarak bulunmuştur. KYB içerisinde su, boşlukların bağlantısız olması nedeniyle geleneksel betonda olduğu kadar yükselmemiştir (Boel vd, 2002).

KYB’lar üretilirken kullanılan malzeme farklılıkları ve karışım oranlarının değişimi, boşluk oranlarını etkilemektedir.

3.7.8. Elastisite modülü

KYB’nun üretiminde kullanılan toz malzemeler ve kimyasallar, elastisite modülü ve gerilme-birim şekil değiştirme özelliklerini etkiler. Aynı basınç dayanımlı KYB ve geleneksel beton elastisite modülleri açısından kıyaslandığında, KYB’un elastisite modülünün içerdiği toz malzeme nedeniyle daha düşük olduğu görülmüştür (Ambrosie ve Pera, 2002).

Aynı dayanım sınıfında olan KYB ile geleneksel betonun elastisite modülleri arasında önemli bir fark yoktur. Kombinasyon metodu ile üretilmiş KYB ile geleneksel betonun elastisite modülleri karşılaştırıldığında KYB’nun elastisite modülünün oldukça düşük olduğu görülmüştür (Raghavan vd, 2002).

3.7.9. Geçirimsizlik

KYB’ların geçirimsizliği boşluk yapılarının birbirinden bağımsız olması nedeniyle düşüktür. Raghavan vd, (2002), hızlı klor iyonu penetrasyon deneyi ile aynı dayanım sınıfında olan geleneksel beton ile KYB’u kıyaslamış ve penetrasyon KYB’da yaklaşık üç kat daha düşük ölçülmüştür.

KYB, geleneksel betonla kıyaslanınca çok daha geçirimsiz bir beton olduğu söylenebilir. KYB’un bu direncinin taş tozunun yoğunluk artırıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Raghavan vd, 2002). Ramsburg ve Neal (2002), aynı dayanım sınıfında geleneksel beton ile KYB karşılaştırmasında, geçirimsizlikte KYB lehine iki-üç kat azalma olduğunu rapor etmiştir (Saridemir, 2006).

3.7.10. Donma çözülme direnci

KYB'ların geleneksel betonla karşılaştırıldığında yüzeysel donma dayanımlarının benzeştiği, ancak silis dumanıyla üretilmiş veya uçucu kül kullanılarak üretilmiş KYB'ların hem yüzeysel donma hem de içsel donma dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür (Person, 2001).

Felekoğlu (2003), yaptığı çalışmada KYB içinde toz malzeme olarak taş tozu ve uçucu kül kullanılmış iki farklı agrega gradasyonunda toplam 4 farklı seri KYB üretmiştir. Üretilen betonları su/çimento oranı farklı iki çeşit geleneksel betonla karşılaştırmıştır. Bu çalışma sonucunda uçucu küllü KYB'ların taş tozlu olanlardan daha iyi donma çözülme dayanımı gösterdiğini söylemiştir. Ayrıca hem uçucu külle üretilen hem de taş tozlu üretilen KYB'ların geleneksel betondan daha iyi bir donma çözülme dayanımı olduğunu belirtmiştir.

3.8. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Deneyler

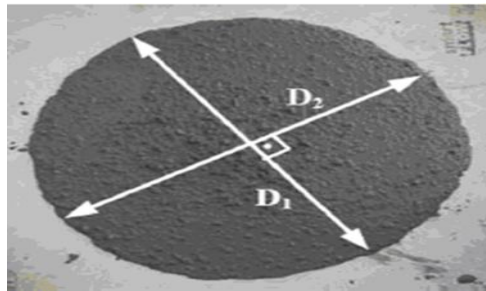
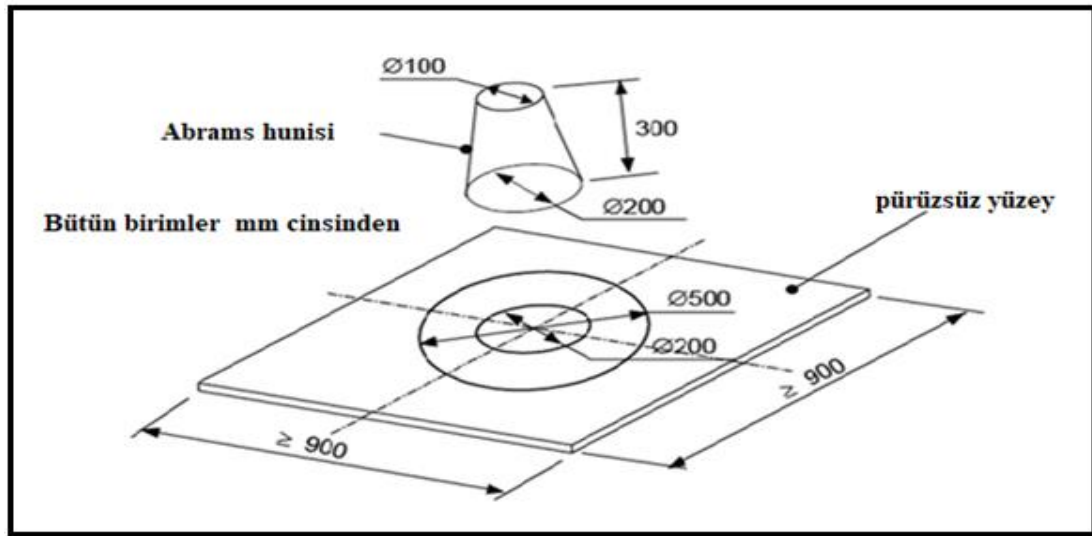
KYB üzerine uygulanan deneyler, taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri olarak iki farklı bölüm halinde incelenebilir. Bu betonlarda kontrol edilmesi gerekli sertleşmiş beton özellikleri geleneksel betonlarla aynıdır. Bu nedenle burada sadece taze KYB'lara uygulanan deneyler açıklanmıştır.

Kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri, onların en belirleyici özellikleridir. Bu yüzden üretilen kendiliğinden yerleşen hafif betonun, kendiliğinden yerleşme özelliğine sahip olup olmadığı çeşitli deneylerle belirlenmelidir. Taze beton halinin kontrolü için, Çökme-Yayıma (serbest yayılma) ve T₅₀ süresi, V-hunisi, Orimet, J-halkası, L-kutusu, U-kutusu, 5 dakika sonra V-hunisi ve Elek ayrışma deneyi gibi deneyler yapılabilir.

3.8.1. Serbest yayılma deneyi

Betonun doldurma yeteneğini ölçmek amacıyla uygulanan bu deney, KYB'lar için en önemli deneylerin başındadır. Yaygın olarak yapılan bu deney, betonun önünde bir engel olmadan, serbest hareket ederek kendi ağırlığı ile Abrams hunisinden akarak yayılma tablası üzerine yerleşmesi şeklinde uygulanır (Sertbaş, 2006).

900x900 mm ebatlarına sahip bir yayılma tablası düz bir zemine yerleştirilir ve tabla yüzeyi nemlendirilir. Üst çapı 100 mm, alt çapı 200 mm, yüksekliği 300 mm olan kesik koni (Abrams Hunisi) tablanın merkezine koyulur ve yaklaşık 6 lt betonla sıkıştırma yapmadan doldurulur. Huni dik olarak kaldırılır ve önceden tabla üzerine çizilmiş olan 500 mm çaplı daireye ne kadar sürede yayılacağı ölçülür. Süre ölçümü sonrası, yayılmanın tamamlanmasından sonra birbirine dik iki yönde bulunan yayılma çapları ölçülerek ortalaması alınır. Çökme-yayılma değeri şeklinde isimlendirilen bu değer eğer yüksekse betonun akıcılığının yani doldurma yeteneğinin iyi olduğu düşünülür. KYB'lar için bu deney sınır değerleri birçok standartta 650-800 mm arası kabul edilmiştir (EFNARC, 2002). Bazı araştırmalar ise minimum 600 mm'ye kadar yayılan bir betonun KYB olduğunu söylemiştir (Lars ve Tviksta, 2000). Akıcılığın kontrolünde kullanılan ve bu deneyde ölçülen T_{50} süresi, 500 mm'lik çapa betonun ulaşma süresidir. Bu sürenin düşük olması, akıcılığın o kadar yüksek olması anlamına gelir. T_{50} süresi için kabul edilen sınır değerler 2-5 saniye arasındadır (EFNARC, 2002). Şekil 3.4'de serbest yayılma deney düzeneği görülmektedir (EFNARC, 2002).

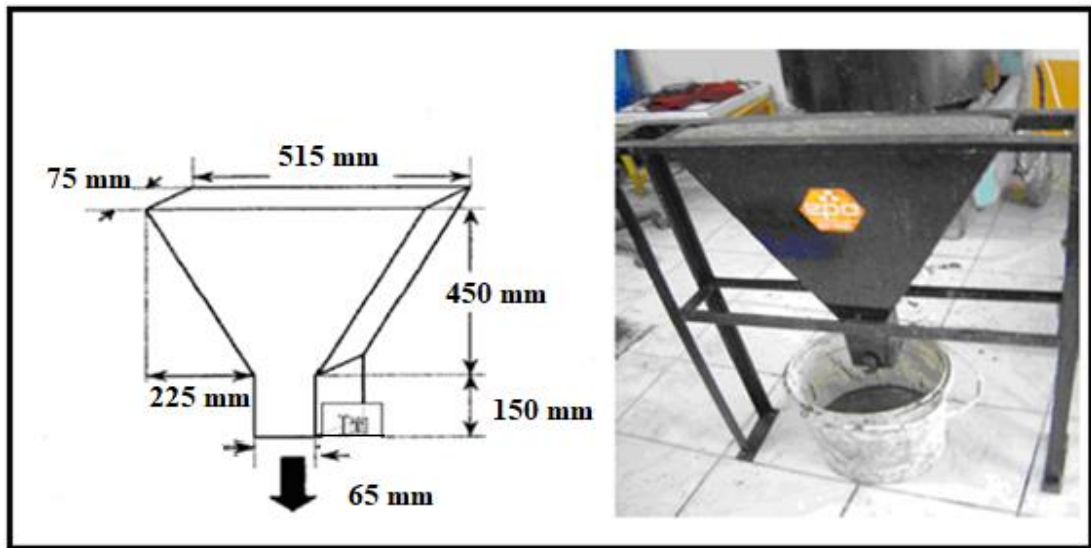


Şekil 3.4. Serbest yayılma deney düzeneği ve ortalama çap ölçümü

3.8.2. V-hunisi deneyi

Deney, betonun viskozitesinin ve geçiş yeteneğinin ölçülmesi amacıyla yapılır. Bu deney yüksek akışkanlık özelliği olan betonlar, su altında dökülen betonlar ve KYB'lar için uygulanan bir deneydir. Agrega tane çapı 20 mm'den daha az olan betonlarda uygun olan bu deney, betonun dar bir huni ağzından kendi ağırlığı ile akmasını inceler.

Ebatları Şekil 3.5'de verilen V şeklindeki huninin iç yüzeyi ıslak bir bezle nemlendirildikten sonra en altta bulunan huni kapağı kapatılır. Yaklaşık 12 litre hacminde beton alan huni üst seviyesine kadar şişleme yapılmadan, sıkıştırılmadan betonla doldurulur. Betonun yerleşmesi için 10 saniye beklenir ve huni alt kapağı açılarak betonun akışı başlatılır, bu arada süre ölçümü de başlatılır. Akışın bütünüyle bitişine kadar olan süre ölçülür, bu sürenin sonu üstten bakıldığında huninin ağzından ışık görüldüğü andır. V-hunisi deneyi, kullanılan betonun tekrar 5 dakika sonra huninin yüzeyi temizlenmeden doldurulması ile tekrarlanır. KYB için standartta akış süresi 6 ile 12 saniye arasında olmalıdır (EFNARC, 2002). Akış süresinin düşük çıkması betonun yüksek akışkanlık özelliğine sahip olduğunu gösterir. 5 dakika beklendikten sonra yapılan ölçümler, betonda oluşabilecek segregasyonu görmek içindir. İki farklı zamanda yapılan deney süreleri arasındaki fark, segregasyon direnci hakkında fikir verir. 5 dakika sonra akış süresinin 3 saniye daha fazla olabileceği standartta verilmiştir (EFNARC, 2002). Şekil 3.5'de V-hunisine ait deney düzeneği verilmiştir (Bartos vd, 2002; EFNARC, 2002).



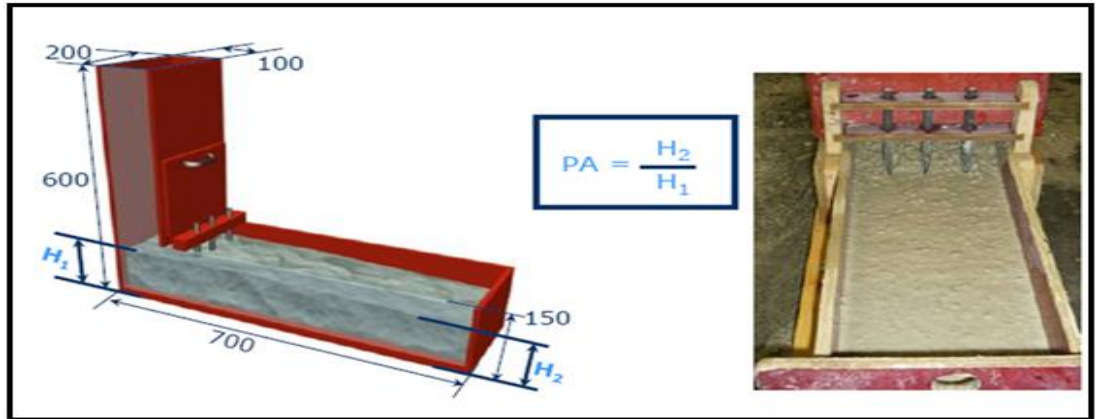
Şekil 3.5. V-hunisi deney düzeneği (EFNARC, 2002)

3.8.3. L-kutusu deneyi

L-flow ismiyle su altı betonları için üretilen deney, daha sonra KYB'un hem akıcılık özelliğinin hem de donatılar arasından geçiş kabiliyetinin ölçülmesi maksadıyla uygulanmıştır. Bu deney yardımıyla beton için tıkanma riski belirlenmektedir.

Deneyde Şekil 3.6'da ölçüleri verilen ahşaptan veya çelikten üretilen yatay ve düşey kolları olan L şeklindeki kutu kullanılır. Dikey kol ile yatay kol arasında dik şekilde yerleştirilmiş 3 adet 12 mm çaplı donatı vardır. Dikey kolun sonunda iki kolu ayıran bir kapak mevcuttur. L-kutusu aletinin iç yüzeyi nemlendirilir ve arada bulunan kapak kapatılır. Dikey kol yaklaşık 13 litre betonla, sıkıştırılmadan yani şişleme yapılmadan doldurulur. Beton doldurulduktan sonra 1 dakika beklenerek betonun kol içinde iyice yerleşmesi sağlanır. Arada bulunan kapak açılarak betonun dikey yerleştirilmiş 3 adet donatının arasından geçip yatay kola yayılması sağlanır.

Deney yapılmadan önce yatay kol üzerinde kapaktan ölçülerek 200 mm ve 400 mm'lik uzaklıklar belirlenmelidir. Kapağın açılmasıyla başlatılan sürenin ölçümü beton hem 200 mm'lik uzaklığa hem de 400 mm'lik uzaklığa varınca yapılır. Bu ölçüm değerleri T_{200} ve T_{400} süreleri olarak adlandırılır. Betonun akışı tamamlanınca L-kutusu aletinde yatay kolda biriken betonun uç (H_2) ve son kısımdaki (H_1) yükseklikleri ölçülür. Ölçülen değerlerin oranına "PA-bloklanma oranı" denir ve KYB için standartta bu değer en az 0.8 olması beklenir (EFNARC, 2002). T_{200} ve T_{400} süreleri betonun akış yeteneği hakkında bilgi verse de bu değerler hakkında standartta bir kabul yoktur. Bu deney sayesinde segregasyon direnci hakkında da fikir sahibi olunur. (Bartos vd, 2002). Şekil 3.6'da L-kutusu deney düzeneği verilmiştir.

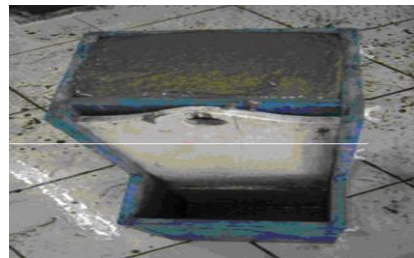
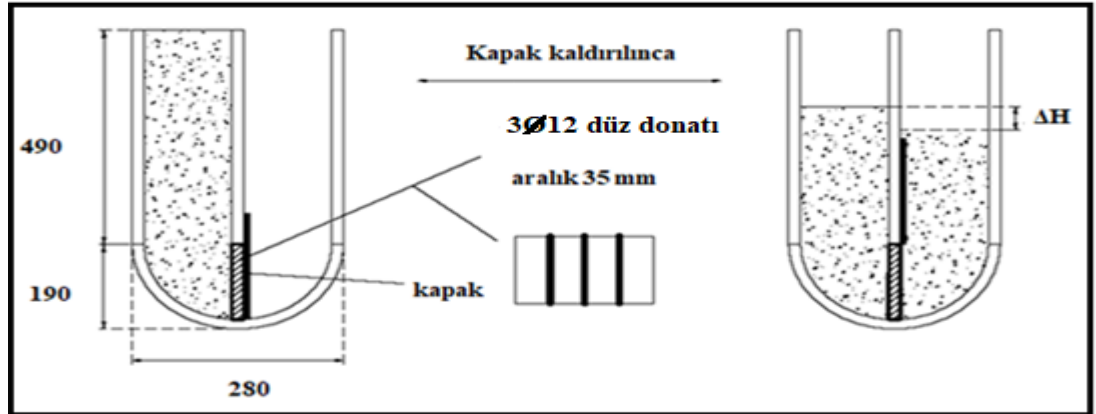


Şekil 3.6. L-kutusu deney düzeneği (Gönen, 2009)

3.8.4. U-kutusu deneyi

Bu deney de aslında su altı betonları için üretilmiş, daha sonra KYB’larda kullanılmıştır. Maksimum agrega tane çapının 25 mm’nin altında olduğu betonlar için ve KYB’lar için uygun bir deneydir. KYB’un akış performansının ve doldurma kapasitesinin değerlendirilmesi için uygun bir deneydir. U şeklinde olan deney aletinin tam orta bölümünde, U aletini iki kısma ayıran ama tabana kadar ulaşmayan bir tabakanın altında 12 mm çapında 35 mm arayla yerleştirilmiş 3 adet donatı vardır. Bu donatıların ön tarafında açılabilen bir kapak mevcuttur. U-kutusu denilen aletin iç yüzeyi nemlendirilir ve arada bulunan kapak kapatılır. U-kutusu aletinin birinci koluna yaklaşık 20 litre beton doldurulur ancak şişleme ve sıkıştırma yapılmaz. Betonun kol içinde düzgün bir şekilde yayılmasını sağlamak için 1 dakika beklenir. Ara kapak açılır ve betonun bir koldan diğer kola donatılar arasından geçerek dolması sağlanır. Akışın tamamlanmasından sonra her iki koldaki beton düzeyleri ölçülür ve aralarındaki fark belirlenir.

Fark doldurma yüksekliği (ΔH) olarak adlandırılır ve bu değer standartta KYB için en çok 30 mm olması uygundur (EFNARC, 2002). Eğer fark 30 mm’den az ise betonun doldurma yeteneğinin ve geçiş performansının iyi olduğu düşünülür (Bartos vd, 2002). Şekil 3.7’de U–kutusuna ait deney düzeneği verilmiştir.

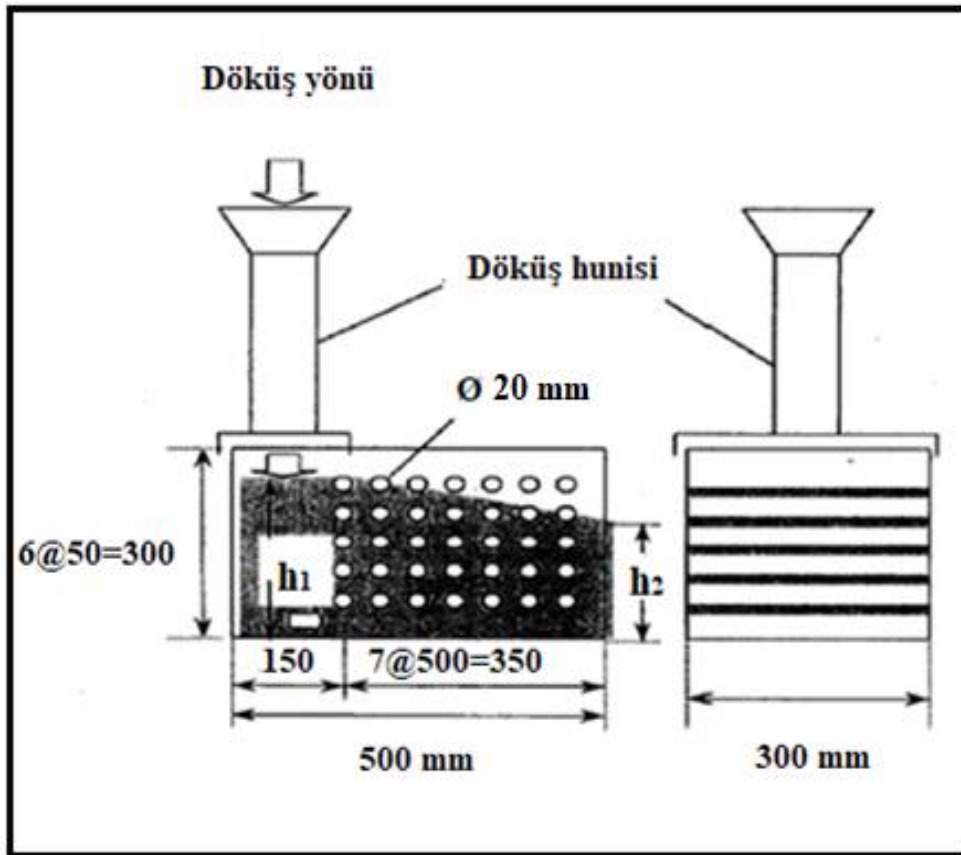


Şekil 3.7. U-kutusu deney düzeneği (Bartos vd, 2002; EFNARC, 2002)

3.8.5. Doldurma kutusu deneyi

Doldurma kutusu deneyi yine önce su altı betonları için üretilmiş ve daha sonra KYB'lar için uygulanmıştır. Betonun kendi ağırlığı nedeniyle donatılar arasından geçiş performansının belirlendiği bir deney olarak, beton akış yeteneği hakkında da bir fikir verir (Sertbaş, 2006).

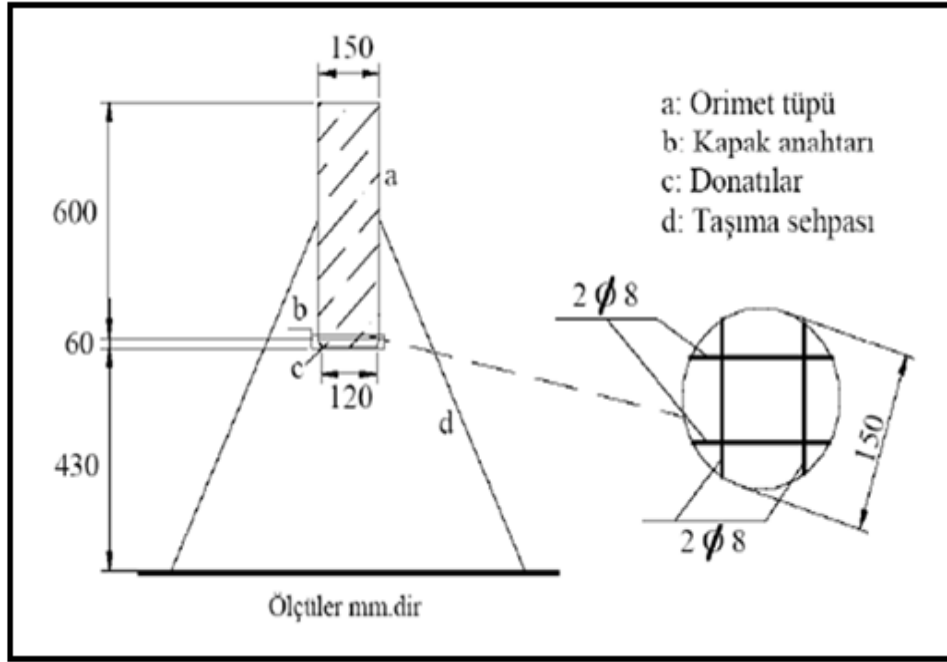
Şekil 3.8'de doldurma kutusuna ait deney aletinin şekli gösterilmiştir. Aletin içinde düşey yönde 5 sıra ve yatay yönde 7 sıra olmak üzere toplamda 35 adet 20 mm çaplı donatı mevcuttur. Deney aletinin içi görülecek şekilde dış yüzeyi şeffaftır. Deney aletinin üzerindeki 500 mm yükseklikli borudan beton, 5 saniyede 1.5 ile 2 litre olacak şekilde düzenli olarak doldurulur. Beton akışı tamamlandıktan sonra aletin iki ucundaki beton seviyeleri 3'er farklı noktadan ölçülür ve ortalaması alınır. Doldurma oranı değeri olarak bulunan değer iki uç değeri ortalamalarının, orantılanması (h_2/h_1) ile bulunur. En az %90 olması beklenen bu değer, büyük çıkarsa, o betonun doldurma kabiliyetinin yüksek olduğu kabul edilir (Bartos vd, 2002).



Şekil 3.8. Doldurma kutusu deney düzeneği (Bartos vd, 2002; EFNARC, 2002)

3.8.7. Orimet deneyi

Orimet deney aleti 600 mm uzunluğa sahip ve 80 mm çapında olan bir tüp ve tüpün alt kısmında açılıp kapanabilen bir kapaktan oluşur. Şekil 3.10'da gösterilen V şeklinde olan akma hunisinden betonun boşaltılma süresi ölçülür. Orimet deneyi betonun geçiş kabiliyeti ve viskozitesini ölçen bir deneydir. Bu deney yapılırken kullanılan aparatta, farklı çapa sahip iri agregalara uygun olarak farklı boru çapı kullanılır (Gönen, 2009).



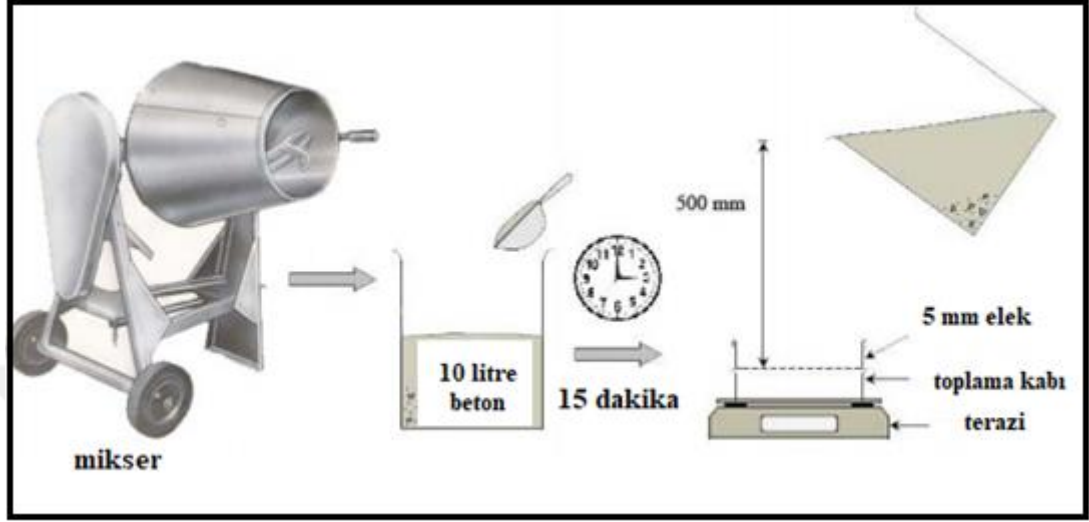
Şekil 3.10. Orimet deney aparatı (Gönen, 2009)

3.8.8. Elek ayrışma deneyi

Bu deney ile KYB'ların segregasyon (ayrışma) direnci ölçülür. Betonda segregasyon direnci, taze betonun yerleşmesi ve sertleşmiş betonun mukavemeti, durabilitesi ve yüzeyinin düzgünlüğü bakımından çok önemlidir. Ayrışma bir sınır değere kadar kabul edilebilir (Gönen, 2009).

Elek segregasyon deneyinin uygulanması için derinliği 40 mm, çapı 300 mm ve elek göz açıklığı 5 mm olan paslanmaz çelikten üretilmiş bir elek kullanılır. İlave olarak en az 10 kg ölçen ve hassasiyeti 10 g olan elektronik terazi ve iki adet kova kullanılır. Taze beton üretimi yapıldıktan sonra 15 ± 0.5 dk bir kovada bekletilir. Kova içinde bulunan betonun su kusması kontrol edilir. Elek ve diğer kovanın tara ağırlıkları terazi yardımıyla ölçülür. Daha sonra kovada bulunan betondan 4.8 ± 0.2 kg

beton alınır eleğin üzerine dökülür. Beton döküldükten sonra 2 dakika beklenir. Eleğin altında kalan beton ağırlığının, ilk koyulan beton ağırlığına oranı ayrışma değerini verir. Bu oranın en fazla 0.15 olması istenir (EFNARC, 2002). Şekil 3.11’de elek ayrışma deneyi için deney aletleri gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Elek ayrışma deneyi aparatları uygulanması (Gönen, 2009)

Çizelge 3.6’da KYB deneyleri ile hangi özelliklerin ölçüldüğü ve Çizelge 3.7’de ise deneyler için gerekli sınır değerler gösterilmektedir.

Çizelge 3.6. Deney yöntemleri ve niteliği (EFNARC, 2002)

	Deney metodu	Özellik
1	Yayılma çapı	Doldurma yeteneği
2	50 cm’ye yayılma çapı	Doldurma yeteneği
3	J-Halkası	Geçiş yeteneği
4	V-Hunisi akış süresi	Doldurma yeteneği
5	5 dakika sonra V-Hunisi akış süresi	Ayrışma direnci
6	L-Kutusu	Geçiş yeteneği
7	U-Kutusu	Geçiş yeteneği
8	Elek ayrışma deneyi	Segregasyon

Çizelge 3.7. Kendiliğinden yerleşebilirlik deneylerinin sınır değerleri (EFNARC, 2002)

Metot	Sınır değerler			
	Birim	Minimum	Maksimum	
1	Çökme-yayılma	mm	650	800
2	T ₅₀ cm yayılma süresi	s	2	5
3	V-Hunisi	s	6	12
4	Orimet	s	0	5
5	J-Halkası	mm	0	10
6	L-Kutusu	h ₂ ,h ₁	0.8	1
7	U-Kutusu	h ₂ ,h ₁	0	30
8	5 dakika sonra V-Hunisi	s (ilave)	0	3
9	Elek ayrışma deneyi	%	5	15

3.8.9. Taze birim ağırlık ve hava miktarı tayini

Bu deney geleneksel betonlarda uygulandığı şekildedir. Taze birim ağırlık tespiti için hacmi belirli bir kap içerisine doldurulan betonun ağırlığı ölçülür ve kabın hacmine bölünür. Taze betonun hava miktarı tayini aşağıda Şekil 3.12’de verilen alet kullanılır.



Şekil 3.12. Hava miktarı ölçüm cihazı

4. HAFİF VE LİFLİ BETONLAR

Hafif beton özel bir beton çeşididir ve geleneksel betonlardan birçok yönleriyle farklı özellikler gösterir.

4.1. Hafif Betonların Çeşitli Kaynak ve Standartlarda Tanımları

Hafif betonlar ülkemiz standartlarında, çeşitli ülkelerin standartlarında ve birçok farklı kaynaklarda değişik yaklaşımlar yapılarak tanımlanmıştır.

TS 2511 (2017)'de taşıyıcı hafif beton tanımı şöyledir; birim hacim ağırlığı 1900 kg/m^3 'den az fakat karakteristik basınç dayanımı 17 MPa 'dan daha fazla olan betonlardır.

DIN 1045(10)'da birim ağırlıklarına göre betonlar sınıflandırıldığında, birim ağırlığı 2.0 kg/dm^3 'ün altında olanlara Hafif Beton, $2.0-2.8 \text{ kg/dm}^3$ arasında olanlara Normal Beton ve 2.8 kg/dm^3 'ten büyük olanlarına ise Ağır Beton denilmektedir (Konuk, 2003).

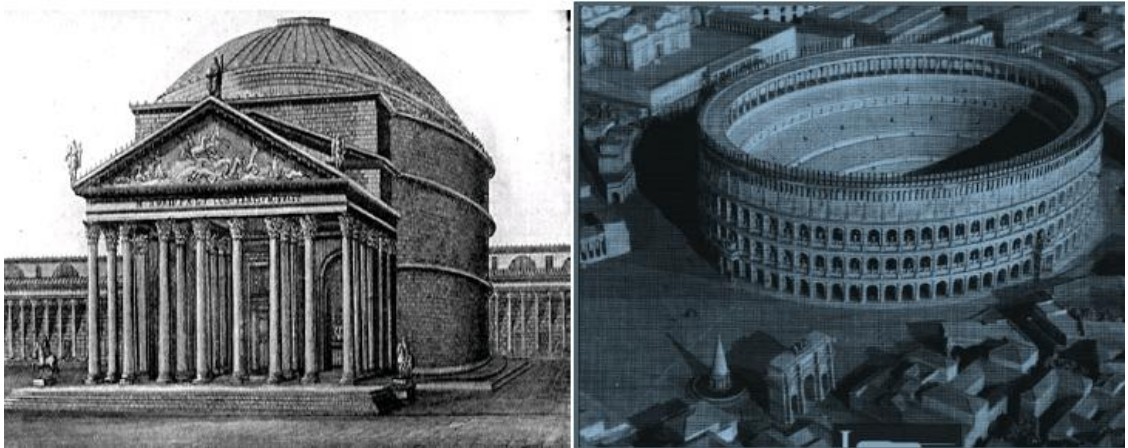
TSE EN 206-1'de hafif beton tanımı şöyledir; betonun toplam agregasının tamamının veya bir bölümünün hafif agregadan üretildiği, etüv kurusu yoğunluğu ise 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betona hafif beton denir (TSE, 2000).

ACI 213R (1987)'de hafif beton, sadece yalıtım sağlamak amaçlı kullanılacaksa kuru birim ağırlığının 800 kg/m^3 'den daha düşük ve 28 günlük basınç dayanımının ise 0.7 ile 7 MPa değerleri arasında değişebileceğini bildirmiştir. Aynı standartta taşıyıcı olacak hafif betonların birim ağırlığının 1850 kg/m^3 'den daha düşük kalması gerektiğini (bu değere 1900 kg/m^3 'e kadar izin verilir) ve bu betonun 28 gün için basınç dayanımının en az 17 MPa olabileceğini söylemektedir (ACI 213R, 1987). Ayrıca ASTM C330'da hafif beton üretimi için kullanılacak agregaların en büyük gevşek birim ağırlıklarının kaba agregalarda 880 kg/m^3 ve ince agregalarda da bu değer 1120 kg/m^3 olması gerektiğini belirtmiştir (ASTM C330, 2017).

4.2. Hafif Betonun Tarihsel Gelişimi

Günümüzde yalıtım ve taşıyıcı amaçlı üretilip, kullanılan hafif betonların, tarihsel süreçte genellikle yalıtım düşünülmeden bölgesel olarak kolay elde edilecek hafif agregaların kullanıldığı bir beton türü olduğu görülmektedir.

Antik zamanlardan beri bazı yapılar hafif agrega kullanılarak üretilmiş ve bu eserlerden bir kısmı günümüze kadar ulaşmıştır. Milattan önce 3000 yılında Sümerlerin inşa ettiği Babil, Bizans imparatorluğu tarafından inşa edilen Ayasofya, Roma İmparatorluğu zamanından kalma Pantheon ve Colosseum ve Meksika’da bulunan Maya Piramitleri hafif agregalı harçlarla üretilmiş ve günümüze kadar ulaşan görkemli antik yapılardan bazılarına örnektir (Chandra ve Berntsson, 2002). Şekil 4.1’de Pantheon, Colosseum ve şekil 4.2’de Maya Piramitleri ve Ayasofya’ya ait görüntüler verilmiştir (Kaldı, 2011).



Şekil 4.1. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 1 (solda Pantheon, sağda Colosseum)



Şekil 4.2. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 2 (solda Meksika’da Maya Piramitleri sağda İstanbul’da Ayasofya Müzesi)

Sanayileşmesini tamamlamış ülkeler, son kırk yılda hafif beton teknolojileri üzerine yoğunlaşmış, geliştirmiş ve daha yaygın olarak kullanmışlardır. Belçika, Hollanda, İtalya, Almanya, ABD, İngiltere, Fransa ve Japonya gibi ülkeler hafif beton üretiminde önemli adımlar atmışlardır (Durmuş ve Aytekin, 1986). Doğal hafif agregaların her yerde bulunmaması, bazı ülkelerde yapay hafif agregaya üretimini başlatmıştır. Örneğin Almanya’da 19. yüzyıl, gözenekli kil taneciklerinin üretiminin arttığı zamandır (Chandra ve Berntsson, 2002). 1917 yılında S. J. Hayde adında bir bilim insanı günümüzde çok kullanılan bir yapay hafif agregaya olan kil ve şistin geliştirilmesini sağlayan fırın düzenekleri kurmuştur ve geliştirilmiş cüruf, ticari amaçlı olarak 1928 yılında ilk defa üretilmiştir (Yoğurtçu, 2005). Almanya hafif yapıların üretiminde II. Dünya Savaşı başlamadan lider konuma gelmiştir (Gündüz, 1998). Donatı ve taşıyıcı hafif betonlar bir arada kullanılarak gemi üretimi I. Dünya Savaşı öncesindedir ve geliştirilmiş şist agregasının hafif beton içerisinde kullanılmasıyla birim hacim ağırlığı 1760 kg/m^3 olan ve basınç dayanımı 34.5 MPa olan betonlar üretilmiştir (Kaldı,2011).

Çok katlı betonarme yapıların üretiminde hafif betonların kullanımının yaygınlaşması etkili olmuştur. Bu yapılara örnek olarak 1925 yılında Dallas’ta inşa edilmiş 18 katlı bina ve Chicago’da 42 katlı olarak 1967’de tamamlanmış bina verilebilir (ACI 213, 1987). Şekil 4.3’te bu yapılar gösterilmektedir.

1958 yılından sonra birçok yapı hafif agregalı beton kullanılarak ön gerilmeli, prefabrike olarak veya konvansiyonel tarzda inşa edilmiştir (Chandra ve Berntsson, 2002; Kaldı, 2011)



Şekil 4.3. Hafif beton kullanılarak inşa edilmiş yapı örnekleri 3 (solda Dallas Hilton Oteli, sağda Marina City Towers, Chicago –USA) (Kaldı, 2011)

Hafif beton günümüzde yapılarda yalıtım amaçlı olarak, prefabrike elemanlarda, köprü ve otobanların inşasında, yüksek katlı binalarda ve bunun gibi birçok yapı tarzında kullanılabilen bir yapı malzemesidir. En yüksek basınç dayanımına sahip hafif agregalar genişletilmiş kil ve şistlerdir. 1950'li yıllardan sonra gökdelen ve köprü yapımı gibi birçok işte özellikle genişletilmiş kil kullanılmış, günümüzde de artarak kullanılmaya devam etmektedir (Kaldı, 2011). Subaşı (2009), yaptığı çalışmada yoğunluğu 1.7 kg/m^3 gibi düşük bir genişletilmiş kil agregasıyla üretilmiş betonun basınç dayanımının 41.27 MPa 'a ulaştığını belirlemiştir. Kimyasal katkı malzemelerinin gelişimi sayesinde basınç dayanımları 80 MPa 'a ulaşan hafif betonlar yapılabilmektedir (Uygunoğlu, 2008).

4.3. Hafif Betonların Sınıflandırılması ve Üretim Yöntemleri

Günümüzde kullanımını artmış olan hafif betonları elde etmek için betonda çeşitli metodlara başvurarak boşluk oluşturmak genel bir kuraldır (Taşdemir ve Şengül, 2013). Hafif betonlar üretim yöntemlerine, basınç dayanımlarına ve birim hacim ağırlığına göre sınıflandırılabilirler.

4.3.1. Üretim yöntemlerine göre hafif betonlar

Geleneksel betona göre birim ağırlıkları daha düşük olan hafif betonların birim ağırlığının azaltılması aşağıdaki yöntemler uygulanarak mümkün olmaktadır (Taşdemir, 1982; Neville, 1987);

- Hafif Agregalı Betonlar; En önemli betonu hafifleştirme yöntemidir. Doğal veya yapay hafif agregaların, normal agregalar yerine kullanılmasıyla üretilir.
- Gaz veya Köpük Betonlar; Kimyasal veya fiziksel bazı malzemeler veya yöntemler ile beton içerisinde boşluk oluşturularak hafif betonlar üretilir.
- Kumsuz Betonlar; İnce agregayı beton bileşiminden çıkararak üretilen hafif betonlardır.

Hafif beton üretmek için uygulanan yöntemlerden biri fiziksel ve kimyasal yöntemlerle beton içerisinde boşluklar oluşturmaktır. Kimyasal katkılardan, metalik alüminyum, çinko veya magnezyum, hidrojen peroksit ve nitrojen gibi malzemelerin

çimentoya katılması beton içinde oksijen gazı oluşturur. Karma suyuna ilave edilecek vinilik reçine ve alkilaril sülfonattan oluşan katkıları ise köpük oluşturarak, düşük yoğunluklu beton üretimini sağlarlar (Akman ve Akçay, 2000). Fiziksel olarak betonu hafifletirmede, karışımında ince agregayı az kullanmak veya hiç kullanmamak, gereğinden fazla su kullanmak gibi yöntemler kullanılabilir.

4.3.2. Basınç dayanımına göre hafif betonlar

Hafif betonları basınç dayanımları yönünden farklı olarak sınıflandıran değişik kaynaklar bulunmaktadır. Amerikan Beton Enstitüsüne (ACI, 1967) göre yalıtım amacıyla kullanılan düşük dayanıma sahip betonlar, dolgu oluşturmak amacıyla gerek duyulan orta dayanımlı hafif betonlar ve betonarme için üretilen yapısal hafif betonlar olmak üzere üç farklı sınıf hafif beton vardır. Rilem (1975) yapısal, yapısal-yalıtım ve yalıtım betonu olmak üzere hafif betonları yine üç farklı sınıfa ayırmıştır. TS EN 206-1 (2000)'de de hafif betonlar aşağıdaki Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi 8 MPa'dan 80 MPa'a kadar basınç dayanımları bakımından farklı olarak sınıflandırılmıştır (Uygunoğlu, 2008).

Çizelge 4.1. TS EN 206-1'e göre hafif beton basınç dayanımları (TSE EN 206-1, 2000)

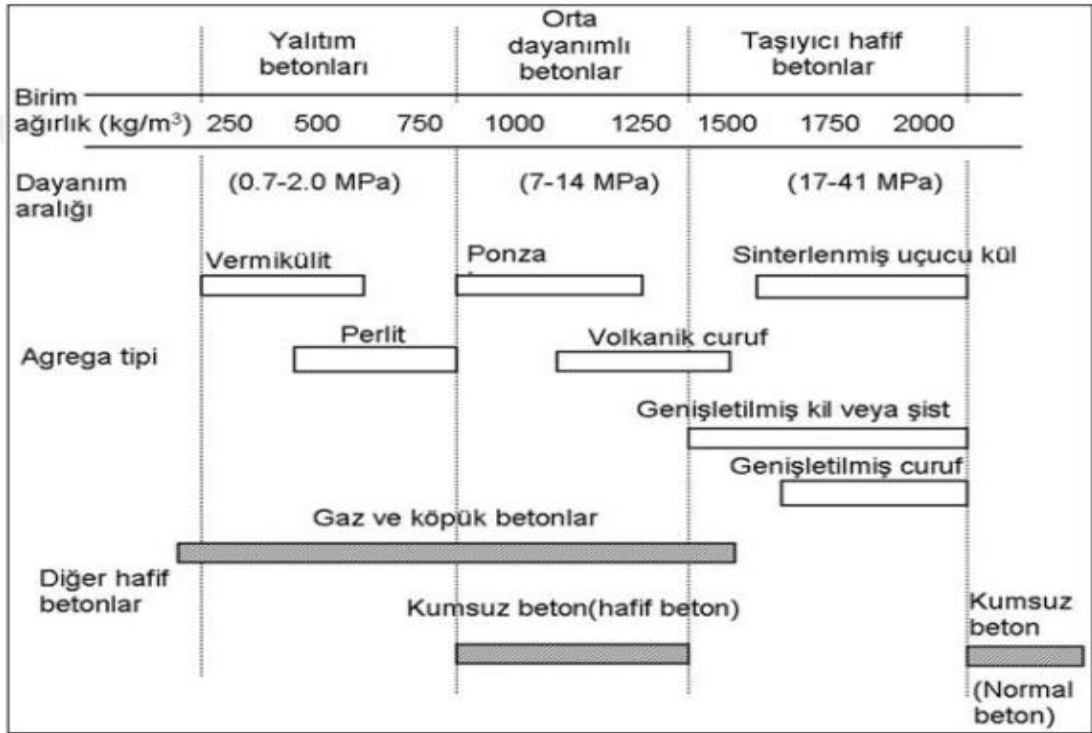
Basınç dayanım sınıfı	En düşük karakteristik dayanımı	
	Silindir (f _{ck,sil}), MPa	Küp (f _{ck,küp}), MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

4.3.3. Birim hacim ağırlığına göre hafif betonlar

Birim ağırlıklarına göre hafif betonlar üçe ayrılır (Taşdemir,1982).

- Yalıtım amaçlı beton: $300 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim ağırlık} < 800 \text{ kg/m}^3$
- Orta dayanımlı hafif beton: $800 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim ağırlık} < 1400 \text{ kg/m}^3$
- Taşıyıcı olan hafif beton: $1400 \text{ kg/m}^3 < \text{Birim ağırlık} < 2000 \text{ kg/m}^3$

Şekil 4.4'te birim ağırlık ve dayanımlarına hafif beton türleri ve bu betonlar için kullanılması gereken agrega çeşitleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Hafif betonların sınıflandırılması (Mindess ve Young, 1981)

Birim ağırlık ile basınç dayanımı arasında çok güçlü bir ilişki söz konusudur. Birim ağırlık arttıkça, basınç dayanımı artmaktadır.

Birim ağırlıkları ile basınç dayanımları birlikte düşünülürse, çizelge 4.2'de olduğu gibi bir gruplandırma oluşturulabilir. Bu sınıflamada S1 gerçekte ısı yalıtımı amaçlı kullanılır ve kısmen de taşıyıcıdır. S2 ve S3 betonları yalıtım niteliği olan orta mukavemetli betonlardır. S4, S5 ve S6 sınıf betonlar ise birçok ülke standartlarına göre taşıyıcı özellikli betondur. Büyük açıklıklı betonarme köprülerin geçilmesinde zati ağırlığı düşürdüğü için S5 ve S6 arası betonlar tercih edilir (Postacıoğlu vd, 1986; Taşdemir ve Şengül, 2013).

Çizelge 4.2. Birim ağırlık ve dayanıma göre hafif betonlarda sınıflandırma (Postacıoğlu vd, 1986; Taşdemir ve Şengül, 2013)

Hafif beton sınıfı	Birim ağırlık (kg/m ³)	Basınç dayanım aralığı (MPa)
S1	≤800	1-7
S2	800-1200	7-10
S3	1000-1400	10-14
S4	1300-1800	14-25
S5	1500-1800	25-40
S6	1800-2000	40-70

RILEM hafif betonları işlevlerine göre aşağıda Çizelge 4.3’de olduğu gibi sınıflandırmaktadır (RILEM, 1975; Taşdemir ve Şengül, 2013).

Çizelge 4.3. İşlevlerine göre hafif beton sınıflandırılması

Sınıf	I	II	III
Hafif beton türü	Taşıyıcı	Taşıyıcı ve yalıtım	Yalıtım
Fırın kurusu birim ağırlık (kg/m ³)	<2000	Koşul konmamış	Koşul konmamış
Basınç dayanımı (MPa)	>15	>3.5	>0.5
Isı iletim katsayısı (W/mK)	-	<0.75	<0.30

Çizelge 4.4’te bazı hafif agregalar, bu agregalara ait birim hacim ağırlıkları ve bu agregalarla üretilmiş betonların özellikleri verilmiştir. Çizelge 4.5’te de dört farklı hafif beton çeşidinin mekanik özellikleri kıyaslanmıştır.

Çizelge 4.4. Farklı hafif agregalar ve bu agregalarla üretilmiş beton özellikleri (Taşdemir ve Şengül, 2013)

Hafif beton türü	Agreganın türü	Agrega birim hacim ağırlığı (kg/m ³)	28. gün basınç dayanımı (MPa)	Beton birim ağırlığı (kg/m ³)
Gaz ve köpük	-	-	1.4-4.8	400-600
Kısmen sıkıştırılmış	Genleştirilmiş vermikülit ve perlit	64-240	0.5-3.4	400-1120
	Pomza taşı	480-880	1.4-3.8	720-1120
	Genleştirilmiş cüruf	480-960	1.4-5.5	960-1520
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	2.8-6.9	1120-1280
	Genleştirilmiş kil veya şist	560-1040	5.5-8.3	960-1200
	Klinker	720-1040	2.1-6.9	720-1520
Kumsuz beton	Doğal agreg	1360-1600	4.1-13.8	1600-1920
	Hafif agreg	480-1040	2.6-6.9	880-1200
Taşıyıcı hafif agregalı beton	Genleştirilmiş cüruf	480-960	10.3-41.4	1680-2080
	Sinterlenmiş uçucu kül	640-960	13.8-41.4	1360-1740
	Genleştirilmiş kil ve şist	560-1040	13.8-41.4	1360-1840

Çizelge 4.5. Dört farklı hafif beton çeşidinin mekanik özellikleri (Gürol vd, 1988)

Hafif beton türü	Elastisite modülü (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)	Hava kuru birim ağırlık (kg/m ³)	Fırın kuru birim ağırlık (kg/m ³)	Ortalama rutubet (%)
Perlit	2180	2.45	780	660	18.2
Genleştirilmiş polistiren	2060	2.25	850	810	4.9
Pomza taşı	3530	4.60	820	755	8.6
Gaz beton	2400	4.00	740	705	4.0

4.4. Hafif Beton ve Geleneksel Beton Kıyaslaması

Hafif betonlarla geleneksel betonlar kıyaslandığında, her ikisinin de birbirine karşı üstün ve sakıncalı olduğu yönler görülmektedir.

4.4.1. Hafif betonun üstünlükleri

- Birim hacime düşen ağırlık azaldığından, beton kalıplarına gelen yük azalır.
- Hafif betonların kullanımı yapı ağırlığını azaltır ve bu nedenle betonarme yapı elemanlarının kesitleri küçülür. Bu şekilde yapı kullanım alanları genişler ve daha ekonomik olurlar.
- Yapı ağırlığının azalırsa, deprem etkileri küçülür.
- Hafif betonların hem ses, hem de ısı iletkenlik katsayıları çok küçüktür.
- Hafif betonların bir kısmı ahşap gibi kolay kesilebilir ve üzerilerine çiviler çakılabilir.
- Yangın dayanımı bakımından geleneksel betondan daha iyidir.

4.4.2. Hafif betonun sakıncalı yönleri

- Boşluklu yapıları nedeniyle dayanımları düşüktür.
- Aşınmaya karşı dayanıksızdır.
- Su ve rutubete karşı dayanımları yalıtımla artırılmalıdır.
- Elastisite modülü düşüktür, deprem sırasında fazla deplasman yaparlar.
- Çimento ihtiyaçları fazladır ve bu, beton dökülürken hidrasyon ısısının yükselmesine neden olur, yani rötreye neden olurlar.
- Hafif agregalı betonlar daha kırılmandır.

4.5. Hafif Beton Üretiminde Kullanılan Agregalar ve Özellikleri

Hafif agrega, hafif beton üretimi için çok önemlidir. TS 1114 EN 13055-1 (2004)'e göre su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile birlikte hafif beton üretimi için kullanılan en büyük gevşek birim ağırlığı 1200 kg/m^3 'ü aşmayan veya tane yoğunluğu en fazla 2000 kg/m^3 olan kırılmış veya kırılmadan kullanılan gözenekli inorganik agregalara, hafif agrega denmektedir (TS 1114 EN 13055-1, 2004).

Hafif agregalar, kum, çakıl, mıcır gibi bilinen diğer agregalardan özgül ağırlık, emicilik, biçim gibi özellikler bakımından belirli farklılıklar göstermektedirler (Gökhan ve Baytin, 1978). Hafif agregaların en büyük tane boyutları, normal agregaların tane boyutlarına göre daha küçüktür. En büyük tane boyutları genellikle

10 mm ile 19 mm arasında değişmektedir. Hafif agregaların tane şekli ve yüzey yapısı, agregaların kaynaklarına ve üretim şekillerine bağlı olarak oldukça fazla değişiklik göstermektedir. Tane şekilleri kübik, sivri, küresel, köşeli veya düzensiz olabilmektedir. Yüzey yapıları hem küçük hem de büyük gözenekli olabilir. Normal agregaların özgül ağırlıkları $2.2-2.7 \text{ kg/dm}^3$ arasında değişirken hafif agregaların özgül ağırlıkları, normal agregaların özgül ağırlıklarının $1/3$ ile $2/3$ 'ü arasında değişmektedir (ACI, 1967). Beton üretiminde kullanılacak hafif agregaların gevşek birim ağırlıkları 1200 kg/dm^3 'den fazla olmaması gerekir (TS 1114 EN 13055-1, 2004). Gözenekli olmaları nedeniyle hafif agregaların dayanımları düşüktür ve oldukça fazla su emerler. Bu özellikleri çeşitli açılardan sorun yaratmaktadır (Gökhan ve Baytin, 1978). Normal ve hafif agregalar arasındaki en önemli fark, hafif agregaların boşluklu yapısı nedeniyle daha fazla su emmesidir. Normal agregaların su emme oranları kuru ağırlıklarının %1-2'si iken, hafif agregalarda bu oran %5-20'si arasında değişmektedir (ACI, 1967). Hafif agregalar karışıma ilave edilmeden ön ıslatma işlemine tabi tutulmalıdır, aksi halde karışım için gerekli suyu emerek işlenebilirliği düşürürler (Şahin, 1996).

Hafif agrega ile yapılacak beton karışımları, geleneksel karışım oran ve yöntemlerinden farklıdır. Betonların taşınmaları sırasında hafif agregaların segregasyona uğramaması için de bu agregaların genellikle ıslatılması uygundur. Dayanımlarının düşük olması nedeniyle, hafif agregalar çok çabuk kırılıp ezilmektedir. Bu da taşımada ve kullanımda oldukça titiz davranılmasını gerektirmektedir.

Yukarıda belirtilen genel özellikler ve sakıncalar çerçevesinde özetlemek gerekirse, iyi bir hafif agreganın sahip olması gereken başlıca özellikler şunlardır (Gökhan ve Baytin, 1978):

- Agregataneleri arasında homojenlik,
- Tanelerin dayanım derecesinin yüksekliği,
- Tanelerin hafifliği,
- Isı yalıtımı sağlaması,
- Tanelerin dış yüzeylerinin düzgünlüğü,
- Tanelerin çimento ile kaynaşma özelliğinin yüksek olması,

- Doğal etkilere (rutubet, don, haşarat, vb.) dayanıklı olması.

Taş ocaklarından, nehir ve eski buzul yataklarından, göl ve deniz kenarlarından elde edilip, üzerlerinde kırma, yıkama ve sınıflandırma dışında işlem yapılmayan agregalar, doğal agregalar grubundandır. Pomza, diyatomit, tuf ve lav cürufu en çok bilinenleridir. Oluşumları sırasında gözenekli bir yapı kazanmış agregalardır. Volkanik esaslı veya volkanik esaslı olmayan hafif agregalar şeklinde doğal hafif agregaları gruplandırmak mümkündür. Volkanik esaslı olan agregalar kristalize bir yapı göstermezler, yapıları düzensizdir ve amorf veya camsı bir yapıdadırlar (Uygunoğlu, 2008).

Yapay agregalar ise, ısıtma işlemleri uygulanmış agregalar ile endüstride yan ürün veya atık olarak ortaya çıkan mineral kökenli agregalardır. Yapay agregaların bir kısmı, genişleme özelliği olan malzemelerin ısıtma işleminden geçirilmesi sonucu üretilir. Genleştirilme uygulanmış kil, perlit ve vermikülit bu gruba verilecek en iyi örneklerdir. Bir diğer yapay hafif agrega grubu ise endüstriyel malzemelerden elde edilir. Yüksek fırın cürufu, sinterlenen uçucu kül, organik kökenli hafif agregalar, genleştirilmiş polistiren sert köpük bu gruba verilecek agrega çeşitlerinden bazılarıdır (Uygunoğlu, 2008).

4.5.1. Pomza

Lavların katılaşması sonucu oluşmuş volkanik kökenli bu agrega dünyada en yaygın kullanılan hafif agrega çeşididir (Gökhan ve Baytin, 1978). Pomza bilinen ve kullanılan en eski yapı malzemelerinin başında gelmektedir. Antik Yunan ve Roma tarihine bakıldığında ibadet yapısı, su kemeri, barınma yapıları ve amfi tiyatrolar gibi birçok farklı yapının pomza kullanılarak üretildiği görülmektedir. Zamana karşı bu yapıların iyi dayanmış oldukları da bilinmektedir. Farklı ülke dillerinde değişik isimlerle bilinen pomza, İtalyancada Ponza, Almandada Bimsstein ve İngilizcede ise Pumice olarak adlandırılır. Ülkemizde bu taş için pomza, sünger, köpük, topuk taşı veya hışır taşı adları da kullanılır. Dünyaca kabul edilen bilimsel literatür içinde ise pümis (pumice) veya pümisit (pumicite) olarak isimlendirilir. Ege ve Akdeniz’de depremlere dayanarak varlığını günümüze kadar sürdüren tarihi yapılar, pomza, kireç ve horasan harcı kullanılarak üretilmiş hafif betonlarla yapılmıştır (Gönen, 2009; Kaldı, 2011).

Türkiye pomza kaynakları bakımından zengindir ve araştırmalar sonucunda yaklaşık 3 milyar metreküp pomza olduğu düşünölmektedir. İç Anadolu Bölgesinde yoğunlaşmış olan pomza kaynaklarına, Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgelerinde de rastlanmakta ve üretimler yapılmaktadır. Dünyadaki toplam pomza kaynaklarının % 20'sine yakın oranı Türkiye'dedir (Davraz, 2004; Kurt, 2009).

Pomza, süngerimsi, gözenekli ve camsı bir yapıdadır. Fiziksel ve kimyasal etkilere dayanabilen pomza, volkanik bir kayadır (Gündüz, 1998).

Pomza, asidik ve bazik olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Asidik pomza, beyaz veya kirli beyaz renklidir ve en fazla bulunan ve kullanılanıdır. Mohs Skalasına göre bu pomzanın sertliği 5-6 olup, birim ağırlığı 0.5-1 gr/cm³ tür. Bazik pomza, "scoria" olarak da tanınır, kahverengimsi veya siyahımsı renkte olup, sertliği 5-6, birim ağırlığı 1-2 gr/cm³ tür (Gençten, 2005). Çizelge 4.6'da asidik ve bazik pomzaya ait genel kimyasal yapı verilmiştir.

Çizelge 4.6. Asidik ve bazik pomza genel kimyasal bileşenleri (Gönen, 2009)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O +K ₂ O
Asidik pomza	70	14	2.5	0.9	0.6	9
Bazik pomza	45	21	7	11	7	8

Pomza inşaat başta olmak üzere, tarım, tekstil ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. Hafif tuğla üretimi, büyük blokların yapımı, asmolen tuğla üretimi ve paneller gibi birçok yapı elemanı pomza kullanarak elde edilebilmektedir. İnşaatlarda harç ve inşaat donatısından tasarruf sağlayan pomza, gerçekte ısı ve ses yalıtımı için kullanılır. Nakliyesi kolay olan pomzayla üretilen betonun yangın dayanımı normal betondan %20 daha iyidir. Pomzalı beton, diğer hafif betonlar gibi normal betona göre deprem yüklerine karşı daha elastik davranış gösterir (Gündüz, 1998; Kaldı, 2011). Şekil 4.5'te pomza malzemesinin genel görünüşü görölmektedir.



Şekil 4.5. Pomzanın genel görünüşü

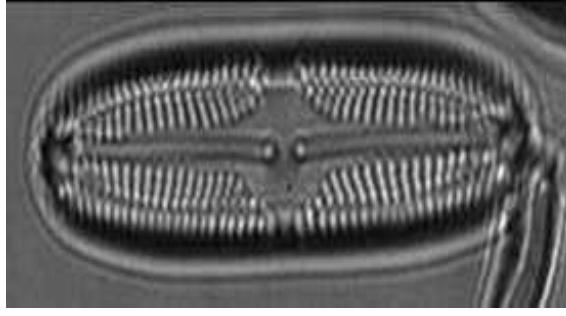
4.5.2. Diyatomit

Diyatomit, Almanca “Kieselguhr” ve İngilizce “Diatomeaceous Earth” kelimelerinden ortaya çıkan Kieselgur ve Diyatomit olarak tanımlanan, sanayide kullanılan önemli bir hammaddedir. Kimyasal yapıları oluştukları değişik ortamlar nedeniyle farklılık gösterir (Harris, 1994; Önem, 1997).

Diyatomit yapısı binlerce farklı 50-100 μm boyutlarında mikroskobik su yosunu içerir ve hafif kayaç grubundadır (Uygunoğlu, 2008). Şekil 4.6’da kayaç şeklinde bir diyatomit ve Şekil 4.7’de de çubuk şeklinde bir diyatomit gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Kayaç halinde diyatomit (Uygunoğlu, 2008)



Şekil 4.7. Çubuk şekilli bir diyatomitin görünüşü (Uygunoğlu, 2008)

Masif veya katmanlı olan saf diyatomitler gözenekli gevrek yapısı, düşük birim hacim ağırlığı ve tebeşir görünümü ile dikkat çeker (Uygunoğlu, 2008).

Diyatomit inşaat sektöründe dayanımları düşük, ancak yalıtım özellikleri yüksek olduğu için tercih edilen bir hafif agrega türüdür (Gönen, 2009). Sanayide filtreleme ve süzme amaçlı kullanılır, yalıtım malzemelerinin üretiminde, dolgu yapma amaçlı, aşındırıcı malzeme olarak veya gübre üretiminde de kullanılmaktadır (Açıkalm, 1991).

4.5.3. Tüf

Tüfler, volkanik kökenli tane boyutu 2 mm'den düşük ve %75'den fazla piroklastik malzeme içeren volkan camı parçacıkları, kristal ve kayaç parçaları biçiminde şekillenen malzemelerdir (Karaman ve Kibici, 2008). Tüf Anadolu tarihinde eskiden beri bilinen bir yapı malzemesidir.

Yaygın olarak gaz boşluğu içeren tüflerin bu boşlukları, yarı erimiş lavların hızlı soğuması esnasında gazların genleşmesinden oluşur. Tüf ve tüfit iç içe geçmiş şekilde tabiatta bulunurlar. Tüf hücreli değildir ve içyapılarında camın sert tozları veya kuvars feldspat ve mafik gibi minerallerin oluşturduğu ince kristaller görülebilir. Tüfit ise mineral taneciklerden oluşur. Tüf ve tüfit renkleri açık olan silisli camlardır. Tüf ve tüfit birbirinden tane boyutu farkları nedeniyle ayrılırlar. Genel olarak 2 veya 3 mm'den büyük taneli olanlar (ince çakıl veya kaba kum) tüf olarak ve 2 veya 3 mm'den daha küçük taneli olanlar tüfit olarak adlandırılmıştır (Demir, 2001). Tüflerin tane büyüklükleri 4-32 mm arasında ise lipilli, daha iri olanlar ise volkanik aglomera veya volkanik breş şeklinde isimlendirilirler (Yeğınobalı, 1997).

İnşaat sektöründe kullanımı yaygın olan tuf, yalıtım ve ana taşıyıcı yapı elemanları üretiminde kullanılır. Dekoratif bir görünüm kazanabilen tuf taşı mimari duvar, kemer, sütunların yapımında ve bahçe süslemelerinde kullanılır. Şekil 4.8’de tufe ait bir görünüş verilmiştir.



Şekil 4.8. Tufün genel görüntüsü (Yeğınobalı, 1997)

4.5.4. Lav cürufu

Lav cürufu, volkanik faaliyetler sonrası ortaya çıkmış bazaltik özellikli, andezitik bileşimi olan gözenekli ve camsı volkanik bir kayaç çeşididir (Kaldı, 2011).

TS 1114 EN 13055-1 ve TS 2511’e göre lav cürufu, doku itibariyle ince, ancak büyük gözenekli, köşeli tane yapısına sahip ve birim ağırlığı $800-900 \text{ kg/dm}^3$ olan kayaç türüdür. Lav cürufları, inşaat sektöründe çimento üretiminde, filtre malzemesi olarak, ısı ve ses yalıtımı için kullanılırlar.

4.5.5. Genleştirilmiş kil

Isıtılarak içyapısında gaz kabarcıklarıyla dolu hacimler oluşturulan killere, genişlen kil denir. Genleştirilmiş killer hafif agregalar içerisinde basınç dayanımı bakımından en değerli olandır. Killer $1000-1300 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de pişirilince homojen, kapalı ve küçük boşluklara sahip olurlar ve üzerlerinde sinterleşmiş sert bir yüzey meydana gelir (Gündüz vd, 2006). Genleştirilmiş kil üretiminde yaygın olarak kumlu kil, killi şist, çabuk sinterleşen kil ve şiferton hammadde olarak kullanılır (Doruk, 1974).

Genleştirilmiş killerin, inşaat sektöründe hafif beton üretiminde hafif agrega olarak kullanılması, özellikle batı ülkelerinde çok yaygındır. Killerin genişlenmiş kil halini alması için belirli bir süreçten geçmesi gereklidir. Bu süreç hammaddenin çıkarılmasıyla başlar ve harmanlanıp parçalanması, katkı maddelerinin eklenmesi, şekil verilmesi ve pişirilmesi ile son bulur. Pişirme yapılırken hem düşey hem de

döner fırın çeşitleri kullanılmaktadır (Doruk, 1974). Şekil 4.9'da genişmiş kil agregasının genel görünümü verilmiştir.



Şekil 4.9. Genleşmiş kil agregasının genel görünümü (Gündüz vd, 2006)

Genleştirilmiş kil yapay agrega olarak farklı ülkelerde üretilmektedir. Genleştirilmiş kil ile üretilen hafif betonlar hem dayanımlı yapısı nedeniyle hem de yapı ağırlığını düşürdüğünden, deprem bölgeleri yapıları için çok uygundur (Subaşı ve Kap, 2009).

Genleşen killer, 1850'li yıllardan beri biliniyor olmasına rağmen 1950'lerden sonra başta gökdelenlerin inşası olmak üzere ve köprü yapımı gibi farklı birçok yapı türünde kullanılırlar. Genleştirilmiş kil sadece ABD'de 26 farklı eyalette üretilmektedir ve dünya üzerinde birçok ülkede üretim yapan büyük şirketler vardır. Genleşen kil ülkemizde pek üretilmeyen ve tüketilmeyen bir malzemedir (Gönen, 2009).

Türkiye'de yapılmış bir bilimsel çalışmada, kendilerinin imal ettiği genişmiş kili agrega olarak kullandıklarında ve çimento dozunu 400 seçtiklerinde, bir betonu C30 sınıfında üretebilmişlerdir (Neville, 1995). Dünyada genleştirilmiş kil agregası ile üretilmiş yapı örneklerine çok sık rastlanır. Marina City Towers, 1964 yılında Chicago USA'da üretilmiştir. Burada yapıda kullanılan betonun sınıfı BS25'tir ve yoğunluğu 1700 kg/m^3 'den küçüktür. Yapılan bu yapının yüksekliği ise 179 m'dir. Hafif agrega ile bu dayanımda beton üretmek, yapım yılı düşünüldüğünde büyük bir başarıdır. Aşağıdaki Şekil 4.10'da Stolma köprüsü görülmektedir. Bu köprü üretiminde genleştirilmiş kil agregası kullanılmıştır. Yapımı 1988–1989 yılları arasındadır ve köprünün toplam uzunluğu 467 m'dir. Yapım aşamasında yapılan testlerde 70.4 MPa 'lık basınç dayanımına ulaşılmıştır. Bu yüksek dayanımının yanında kullanılan betonun birim ağırlığı 1800 kg/m^3 'den küçüktür (Gönen, 2009).



Şekil 4.10. Genleştirilmiş kil agregası ile inşa edilmiş köprü (Stolma Bridge) (Gönen, 2009)

4.5.6. Genleştirilmiş perlit

Perlit lavların soğuyarak, mikroskop kullanılarak veya gözle görülebilecek bir yapıda kırılmasıyla oluşan içyapısında su damlacıkları olan volkanik bir camdır. Perlit ısıya maruz kaldığında genişleyen ve genişleme sonucunda gözenekli hal alan kayadır. Özgül ağırlığı $2.2-2.4 \text{ gr/cm}^3$ olan perlit, çeşidine bağlı olarak $840 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında yumuşamakta ve $1315 \text{ }^\circ\text{C}$ ile $1332 \text{ }^\circ\text{C}$ arasında erimektedir (Hodul, 2009). Şekil 4.11’de genleştirilmiş perlitin genel görünümü verilmektedir.



Şekil 4.11. Genleştirilmiş perlit

Perlit ısıtıldığında hacmi yaklaşık olarak 4 ile 20 kat arası genişler. Tuvenan halde bir metreküplük perlit 2200 ila 2400 kg iken, ısıtılınca hacminin artma miktarına bağlı olarak $110-600 \text{ kg/m}^3$ ’e düşer. Aside dayanıklı genleştirilmiş perlit, inşaat sektörü için tercih edilen bir malzemedir (Hodul, 2009).

Perlit inşaat sektöründe (Şapçı, 2008);

- Çatı ve zemin yalıtımında,
- Perlitli sıva adıyla sıva işlerinde,
- Hafif yalıtım betonu üretiminde,
- Tavan kiremitleri ve yalıtımlı boru gibi hafif yapı elemanlarının üretiminde,
- Dolgu malzemesi olarak,
- Yüzey döşemelerinde kaplayıcı olarak kullanılır.

4.5.7. Genleştirilmiş vermikülit

Vermikülit genişleme yapabilen mika cinsi çeşitli minerallerin anlaşıldığı genel bir terimdir. Vermikülit alüminyum, sulu magnezyum ve demir silikat bileşimi olan bir malzemedir. Renkleri yeşil, kahverengi, sarı veya bazı durumlarda siyah olabilir. Mohs ölçeğinde vermikülit sertliği 1.2 ile 2.0 arasında değişmektedir ve özgül ağırlığı 2.5 kg/dm^3 'tür. Vermikülit yüksek ısıyla 30 kata kadar bir genişleme yapabilir (DPT, 2001).

Hafif yapı betonlarında agrega olarak, mimari ve dekoratif işlerde, ısı ve ses yalıtımında veya ateşe dayanıklı sıva yapımında kullanılır (Gönen, 2009).

4.5.8. Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu, demir-çelik tesislerindeki yüksek sıcaklıktaki fırınlarda demir üretimi yapılırken, kimyasal değişimlerden sonra ortaya çıkan bir yan üründür.

Yüksek fırın cürufu, çimento üretirken, beton içinde kullanılacak agrega olarak ve ayrıca beton katkı maddelerinin üretiminde kullanılabilir (Erdoğan, 2003). Fırın içerisinde $1400-1500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki erimiş, durumda olan atık soğuyunca hafif agrega haline dönüşür ve bu malzemenin kuru yoğunluğu $600-900 \text{ kg/m}^3$ arasında değişmektedir (Şapçı, 2008).

4.5.9. Uçucu kül

Uçucu kül, termik enerji santrallerinde yakılan kömürün bir atığı olarak oluşur. Yakma işlemi sonucunda bacadan çıkacak gaz atmosfere bırakılmadan, bu gazlar içinde yer alan ince toz tanelerinin filtre edilmesiyle uçucu küller elde edilir.

Bütün dünyada depolamanın zor olduğu uçucu kül, hava ve suyu kirletip çevreye zarar verebilmektedir. Uçucu kül beton üretiminde kullanıldığında hem maliyeti düşürmekte hem de betonun taze ve sertleşmiş özelliklerine çok olumlu katkı sağlamaktadır. Sinterleme yoluyla yani uçucu küllerin erime noktasına varmadan yüksek sıcaklıkta bir miktar beklemesi sağlanarak taneciklerin birbirine tutunması sağlanır ve sinterlenmiş uçucu küller, agrega üretiminde kullanılır (Bentli vd, 2005).

Hafif agrega üretiminde son yıllarda araştırılan konulardan biri uçucu külün kullanılmasıdır. Sinterlenmiş uçucu küller agrega olarak kullanıldığında, sinterleme sıcaklığına bağlı olarak hem kendi agrega özellikleri hem de bu agregalarla üretilen hafif betonların özellikleri değişmektedir (Koçkal ve Özturan, 2011).

Küçük parçacıklardan nemlendirme, ısıtma, sıkıştırma veya kombine olarak mekanik işlemler kullanılarak istenilen görünüş ve yapıda daha büyük parçacıkların elde edilmesi işlemine peletleme denir. Dönen bir kaptaki su ile birlikte uçucu küller peletlenir ve bu peletler, 1200-1300 °C arasında yatay ızgaralar üzerinde yakılır, sonra soğutulur ve elenir ve bu şekilde kuru yığın yoğunluğu 650-850 kg/m³ arasında değişen hafif agregalar üretilmiş olur. Almanya ve İngiltere’de bu yöntemle hafif agrega üretimi vardır (Şapçı, 2008).

4.5.10. Organik kökenli hafif agregalar

Ahşap kökenli malzemelerden odun talaşı, ahşap yonga ve polimer kökenli bazı malzemeler, hafif beton üretiminde kullanılabilir.

4.6. Hafif Betonlarda Karışım Oranları ve Betonun Hazırlanması

Hafif agregayla beton üretilirken agregaya ait boşluk çeşidi, yoğunluğu, tane şekli, yüzey yapısı ve su emme özellikleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Hafif betonların karışım miktarlarının belirlenmesi ile normal betonların karışım oranlarının belirlenmesi arasındaki en büyük fark, kullanılan hafif agregaların fazla miktarda su emmesinden kaynaklanacaktır ve bu su/çimento oranını ayarlamayı zorlaştıracaktır. Hafif agregaların su emmeleri yüksek olduğundan, normal beton karışım oranları hesabıyla koyulacak su, hafif betonlar için yetersiz kalacak ve hafif betonlarda ağ şeklinde rötire çatlakları oluşacaktır. Bu olayı önlemenin yolu hafif agregalara karışım öncesi su emdirilmesidir (Akman, 1987; Düzgün, 2001).

Amerikan Beton Enstitüsü hafif betonların karışım oranları için iki temel prensip ortaya koymuştur (ACI 211-2, 1991; Düzgün, 2001):

- Ağırlık Metodu (Özgül Ağırlık Faktörü Metodu); bu metod önceden seçilen çökme miktarına bağlı olarak su ve çimentonun ağırlıklarının tahmin edilmesini ve agrağa ağırlığının hesapla bulunmasını gerektirmektedir.

- Hacimsel Metod; bu metod ise agreganın kuru ve gevşek hacmi ile çimentonun hacminin tahmin edilmesini, su miktarının karışım sırasında deneysel belirlenmesini öngörmektedir.

Günümüzde hafif beton karışım hesaplarında Özgül Ağırlık Faktörü Metodu kabul görmüş ve ASTM ve TSE standartlarında hesap metodu olarak verilmiştir (ACI 211-2, 1991; TS 2511, 2017).

Hafif betonlar için yapılacak karışım hesabında betonun kullanılacağı kalıp boyutları, hedeflenen dayanım ve betonun karşılaşacağı etkiler göz önüne alınmalıdır. Hafif beton karışımları istenilen kıvam ve çimento dozajına bağlı olarak önce deney karışımı yapılarak belirlenmelidir (TS 2511, 2017).

Hafif betonlar üretilirken, betonyere hafif agregalar ile karışım suyunun 1/3'ü koyulmalı ve bir dakika ön karıştırma yapılmalıdır. Bu sayede üniform nemli agrega elde edilmelidir. Havada yeterli nemliliğe sahip hafif agregalar için ayrıca nemlendirmeye gerek yoktur. Karışım için betonyer kullanılması durumunda düşey eksenli betonyerler homojen karışımlar için uygun olmaktadır (TS 2511, 2017; Düzgün, 2001). Beton dökümü için 15-25 °C uygundur ve kür uygulanmalıdır (Turgutalp, 1978).

4.7. Hafif Betonun Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri

Beton karıştırıldıktan sonra mevcut işlenebilirliğini herhangi bir değişme yaşamadan koruyabildiği süre içindeki haline, betonun taze beton hali denmektedir (TS 4834, 1986). Betonlarda, betonun bileşenleri, üretim yöntemleri ve taze beton halleri sertleşmiş beton özelliklerini de doğrudan şekillendirmektedir.

4.7.1. Taze birim ağırlık

Hafif betonların taze birim ağırlığı ile normal beton taze birim ağırlığı arasındaki fark, kullanılan hafif agregaya göre değişir.

Taze hafif betonun birim ağırlığında oluşan değişimler, agreganın yoğunluğuna, granülometrik yapısına, su emme miktarına ve içerdiği hava oranına bağlı olarak farklılık gösterir. Kuru hafif agregaya kullanımı ile üretilen betonlar, su emmiş hafif agregaya ile üretilen betona göre önceleri düşük taze birim ağırlık gösterse de, kuruma sonrası birim ağırlık değerleri birbirine yaklaşır (Şahin, 1996).

4.7.2. İşlenebilirlik

Betonun taze halinden beklenen en önemli özelliklerden biri işlenebilme özelliğidir. Hafif betonların hangi teknikle üretildiklerine bağlı olarak işlenebilirlik kavramları değişiklik gösterir. Örneğin ince agregasız üretilen hafif betonlarda veya blok yapımında kullanılan hafif betonlarda gözenekli yapı istendiğinden, işlenebilirlik, normal betonlara kıyasla çok daha az öneme sahiptir (Şahin, 1996). Ancak diğer hafif betonlar için ve özellikle taşıyıcı hafif betonlar için işlenebilirlik, üzerinde çok fazla dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

Bazı hafif agregaların düşük birim hacim ağırlığı ve katı karışım oluşturmalarından dolayı, segregasyon oluşur. Bu betonlarda iri hafif agregalar kullanılmışsa, iri hafif agregaya karışımdan ayrılarak betonun üst kısmına hareket eder. Hava ilavesi (%4-6) ve harç yoğunluğunun düşürülmesiyle, agregaların yüzeye doğru hareketi ve yüzme özellikleri önlenebilir. Hafif beton tasarımında iyi bir yerleştirme için 10 cm'den daha düşük çökmeler hedeflenmelidir, aksi halde iri agregaya taneleri karışımda üst tarafa yönelmekte ve yüzme eğilimi göstermektedir, bu durum perdelama için sakıncalıdır (Kocaman, 2000; Kaldı, 2011).

4.7.3. Hava miktarı

Beton içerisinde uygun miktarda bulunan havanın işlenebilirliğe, donma çözülme gibi olumsuz hava şartlarına karşı dayanıma, kuma ve bozuk gradasyon eksikliklerinin azaltılmasına katkıları olmaktadır. Hava miktarına karar vermede hafif agrega en büyük tane çapı etkilidir. Beton en büyük agrega çapı 16 mm ise minimum 6 ± 1.5 , en büyük tane çapı 8 mm ise minimum 7.5 ± 1.5 hava ilavesi önerilir. Yalnızca işlenebilirlik hedefi olursa en uygun hava miktarı %4-8 arasında olmalıdır (Türkmen, 1997). Hafif betonların %2-4 oranında hava oranına sahip olması durumunda işlenebilirlik özelliği olumsuz etkilenir. İyi bir işlenebilirlik isteniyorsa, beton içerisinde toplam hava oranı genellikle %4-8 arasında olmalıdır (Şahin, 1996; Kaldı, 2011).

4.7.4. Hafif betonların birim ağırlıkları

Hafif betonların, hafif beton olarak anılmasına neden olan düşük birim ağırlıklarıdır. Normal betonlarda genel olarak birim ağırlık 2200 ile 2500 kg/dm^3 olurken, hafif betonlarda 2000 kg/dm^3 'ten fazla olmamalıdır. Betonun hacimce yaklaşık %65-75'ini oluşturan agreganın yoğunluğu, beton yoğunluğunu en fazla etkileyen faktördür. Ayrıca beton yoğunluğu diğer bileşenlerinin miktar ve yapısından da etkilenir. Betonun birim ağırlığının artması mekanik özelliklerini iyileştirirken, ısı ve ses yalıtımını kötüleştirir. Çizelge 4.7'de farklı agregalara ait yoğunluklar verilmiştir.

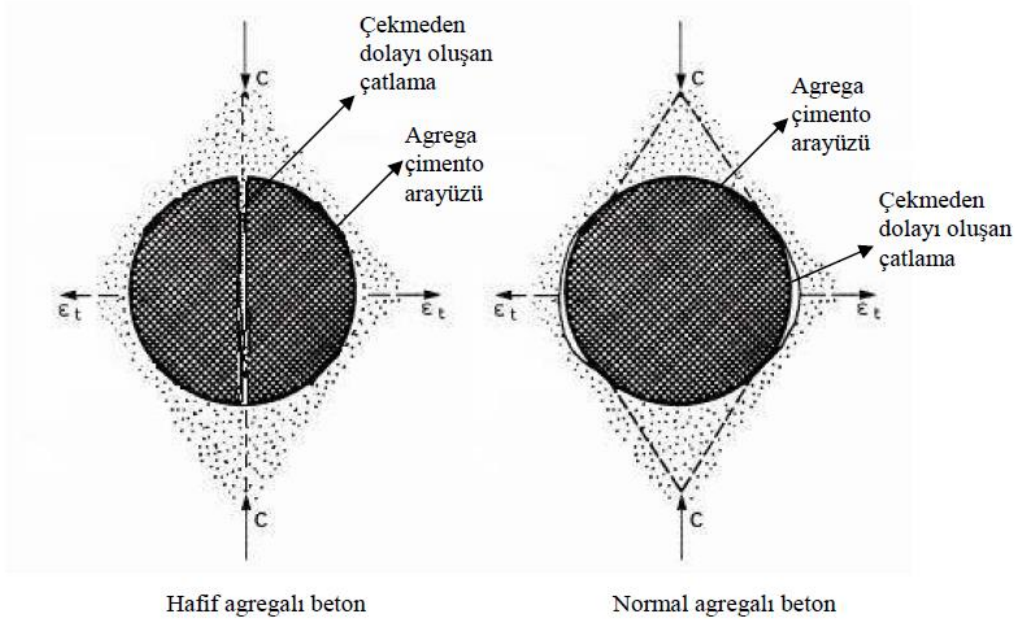
Çizelge 4.7. Çeşitli hafif agregaların yoğunlukları (Chandra ve Berntsson, 2002)

Agrega çeşidi	Kuru birim hacim ağırlığı (kg/m^3)
Klinker	720-1040
Sinterlenmiş kül	779-960
Genleştirilmiş killer ve cüruf	320-960
Pomza	480-880
Diatomit	450-800
Ahşap parçacıkları	320-480
Genleştirilmiş perlit	80-120
Genleştirilmiş vermikulit	60-160

4.7.5. Hafif betonların basınç ve çekme dayanımları

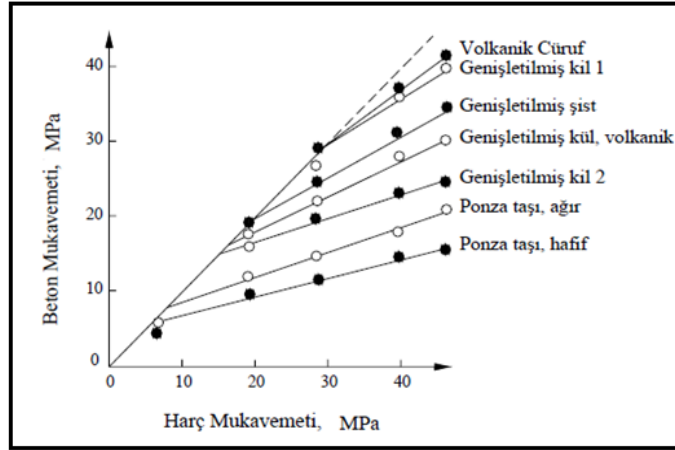
Betonun basınç dayanımının yüksekliği normal betonlardan beklenen en önemli özelliktir. Betonda basınç dayanımını etkileyen en önemli bileşen betonun hacimsel olarak %70'ini oluşturan agreganın yapısıdır. Hafif betonların basınç ve çekme dayanımları, normal betonlara göre daha düşüktür. Çünkü beton karışımında kullanılan agrega dayanımları, normal agrega dayanımlarından düşüktür.

Hafif agregalı betonlara, yük uygulandığında, çimento harcının dayanımı, agreganın kendi dayanımından yüksek olması nedeniyle kırılmanın agrega-çimento ara yüzünde değil, agregada olduğu görülür. Normal agregaya sahip betonlarda agreganın dayanımı yüksek olduğu için kırılma en zayıf bölge olan agrega-çimento hamuru ara yüzünde başlar. Şekil 4.12'de bu durum gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Hafif ve normal agregalı betonda çatlak oluşma bölgeleri (EuroLightCon, 1998)

Hafif beton dayanımı, betonun harç dayanımından her zaman küçük kalmaktadır. Betonlarda harç dayanımı çok daha fazla artmayacağından beton dayanımını artırmak için dayanıklı agrega kullanılmalıdır. Şekil 4.13'de çeşitli hafif agregalarla üretilmiş betonların kırılma durumları verilmektedir.



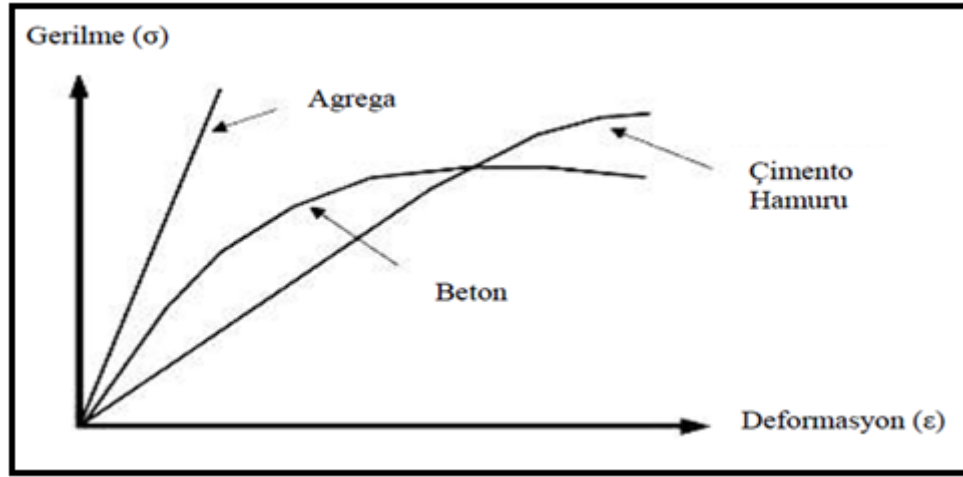
Şekil 4.13. Sürekli faz mukavemetinin fonksiyonu olarak hafif beton basınç mukavemeti (Schulz, 1997)

Hafif betonların basınç dayanımları hakkında farklı sınır değerleri, bildiren kaynaklar mevcuttur. Basınç dayanımları bir kaynaktan 0.7 MPa'dan 50 MPa'ya (Mindess ve Young, 1981), bir başka kaynaktan ise üst sınırı 80 MPa çıkmaktadır. (Uygunoğlu, 2008).

Hafif betonların çekme mukavemeti, eşit basınç mukavemetli normal betonun çekme mukavemetinden yaklaşık %70 oranında düşüktür. Normal betonların çekme mukavemeti basınç dayanımının 1/10'u iken hafif betonlarda bu oran 1/4' e kadar yükselebilir (Turgutalp, 1978).

4.7.6. Hafif beton elastisite modülü ve poisson oranı

Beton, basınç dayanımının en yüksek seviyesinin %25 veya %40'ından sonra elastikliğini kaybeder. Betonda oluşan gerilmeye agrega ve çimento, farklı elastisite modülüne sahip olmaları nedeniyle farklı tepkiler verirler. Beton bu nedenle yüksek gerilme değerlerinde elastik olmayan bir davranış sergiler. Bu durum çimento hamuru ve agrega arasındaki bağlanmanın durumuna bağlıdır. Çimento sertliğine yakın bir agrega sertliği olursa, beton elastik davranışa yakın bir özellik gösterebilir (Neville, 1995). Şekil 4.14'de çimento, agrega ve betonun gerilme-şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 4.14. Çimento, agrega ve betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Erdoğan, 2003)

Hafif betonların dayanabildiği en yüksek gerilme değeri arttıkça, betonun bu gerilmeye karşı şekil değiştirme yeteneği azalmaktadır (Haque vd, 2004). Hafif betonların elastisite modülleri basınç dayanımına, agrega çeşidine, kum miktarına bağlı olarak $9.9 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ile $2.1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ arasında değişir. Hafif betonlarla aynı basınç dayanımına sahip normal betonlar kıyaslanırsa, hafif betonların elastisite modülleri %20-50 daha düşüktür (Turgutalp,1978). Kullanılan agreganın tamamen hafif agregadan oluşması durumunda bu düşüş %50-70 arasında olmaktadır (ACI, 1967).

Hafif ve normal betonların poisson oranları ise yaklaşık aynıdır. Bu değer agregaya, nem durumuna ve beton yaşına bağlı olarak 0.17 ile 0.23 arasındadır. Genellikle 0.2 olarak alınır (ACI, 1967; Düzgün, 2001).

4.7.7. Hafif beton su emmesi

Hafif beton üretiminde genellikle hafif agregaların kullanılıyor olması ve bu betonların boşluklu yapıları, su emme oranlarının yüksek olmasına neden olmaktadır. Genel olarak hafif betonlar kendi ağırlıklarının %30'undan fazla su emerler (Demirboğa, 1999; Düzgün, 2001). Bazı hafif betonlar, normal betonlara göre iki kat daha fazla su emerler (ACI, 1967). Çizelge 4.8'de bazı hafif beton türlerinin ağırlıkça su emme oranları verilmiştir.

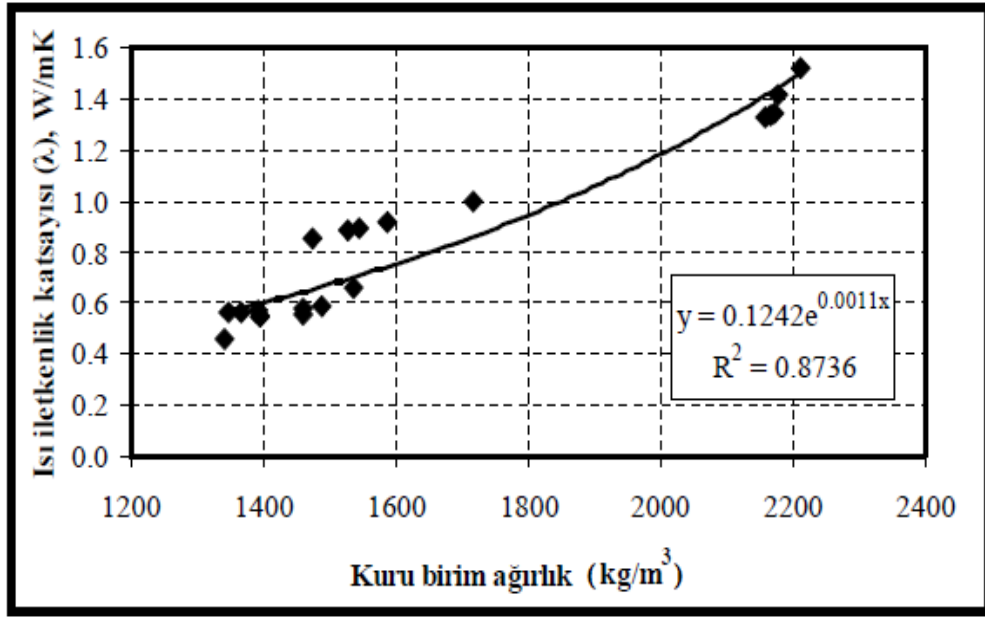
Çizelge 4.8. Farklı agregalı bazı hafif beton türlerinin ağırlıkça su emme oranları (Chandra ve Berntsson, 2002)

Farklı agregalarla üretilmiş hafif beton	Ağırlıkça su emme (%)
Diatomit	40-55
Bimsblok	20-35
Genleştirilmiş perlit	20-35
Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu	15-25
Kalsine uçucu kül	10-20
Gaz beton	25-35
Alçı	30-35
Vermikulit	28-50
Normal beton	<10

4.7.8. Hafif betonun ısı özellikleri

Hafif beton üretilmesinin nedenlerinden biri yüksek ısı yalıtımı özelliğine sahip olmasıdır. Hafif beton üretiminde kullanılan agregaların genellikle gözenekli ve yoğunluklarının düşük olması, bu betonu yalıtım açısından avantajlı kılmaktadır. Hafif agregalar, bünyesinde bulunan hava boşlukları nedeniyle ısı geçişlerini normal agregalara göre çok daha fazla yavaşlatmaktadır. Bu sebepten dolayı bina ve diğer yapılarda ısı yalıtımı sağlamak için hafif agregalar kullanılabilir (Clarke, 2010).

Yoğunluğun artması ise yalıtım özelliğinin azalmasına neden olmaktadır. Şekil 4.15’de kuru birim ağırlıkla, ısı iletkenlik katsayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Yoğunluk arttıkça ısı iletkenlik katsayısının arttığı yani yalıtımın azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.15. KYB'larda ısı iletkenlik ile kuru birim ağırlık ilişkisi (Uygunoğlu, 2008)

Agregaları farklı olan normal betonlarda agrega hacminin değişimine bağlı olarak ısı iletkenlik değerleri 1.45 W/mK ile 0.74 W/mK arasında olabilir (Uygunoğlu, 2008). Hafif betonların ısı iletkenlik katsayıları normal betonlardan daha düşüktür. Hafif agreganın cinsi, boşluk miktarı, boşlukların birbiriyle ilişkisi, bağlayıcı ve katkı malzemeleri ısı iletkenliği üzerinde etkilidir (Demir, 2001).

Bir cisimde gözeneklerin duvar kalınlığı ısı iletkenliğinde etkilidir. Ayrıca gözenek yarıçapının küçülmesi, ısı iletkenlik katsayısının küçülmesi demektir (Urhan, 1993).

Hafif betonlarda ısı özellikleri bakımından önemli bir diğer konu da, hafif beton üretmek için kullanılan agregaların bir kısmının üretimleri sırasında ısı işleme maruz olmalarıdır. Üretimleri sırasında yüksek sıcaklıkla genişleyen hafif agregalar, hafif betonun sıcaklığa maruz kalması durumunda genişleme miktarını sınırlamaktadır. Oysa normal agregalarla üretilmiş betonlar yüksek ısılarda daha fazla genişleme yaparlar (Chandra ve Berntsson, 2002). Genellikle ısı genişleme/büzülme katsayıları hafif agregalı betonlarda, doğal agrega kullanarak üretilmiş normal betonlardan düşüktür. Çizelge 4.9'da da gösterildiği gibi, hafif agregalı betonların genişleme katsayıları, kireçtaşı kullanılarak üretilmiş bir normal betonla yaklaşık olarak aynıdır, ancak diğer normal betonlara göre düşüktür (Clarke, 2010; Kaldı, 2011). Agrega özellikleri, betonun nem durumu, betonun yaşı, kür

ortamı ve bileşiminde bulunan mineral katkıları betonun ısı genleşme katsayısını değiştirmektedir (Neville, 1995).

Çizelge 4.9. Çeşitli betonlara ait ısı genleşme katsayısı (Clarke, 2010)

Beton tipi	Katsayı ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
Hafif agregalı beton	-7 ile -9 arası
Normal ağırlıklı beton	-10 ile -13 arası
Kireçtaşı agregalı normal ağırlıklı beton	-8 ile -9 arası

4.7.9. Hafif betonun akustik özellikleri

Hafif betonu önemli yapan özelliklerinden bir diğeri ise boşluklu yapıya sahip, yoğunlukları düşük olan bu betonların ses yalıtımı için kullanılıyor olmasıdır. Yapılarda akustik özellik denilince en çok ses yalıtımı akla gelse de, konferans salonu, tiyatro, sinema vb. gibi yerlerde sesin düzgün yayılması, yani akustik düzenleme de çok önemlidir. Akustik düzenlemede ne sesin erken yutulup kaybolması ne de duvarlara çarparak yansımaları istenmektedir (Kaldı, 2011). Ses emme miktarı yüksek hafif betonlar, uygun akustik düzenlemeler için kullanılabilir.

Hafif beton ses emme bakımından normal betondan iki kat daha avantajlıdır. Ses emme malzemeye gelen sesin enerjisinin malzemenin çok küçük kanallarında ısıya dönüştürülmesi şeklindedir. Betonun birim ağırlığı düşerse, ses yalıtımı artar. Duvarlar boşluklu yüzeyi olan malzemelerden yapılırsa ses emme yani yalıtım artacaktır (Kocaman, 2000). Yoğunluğu az olan bir betonda sesin betonun bir yüzeyinden diğeri yüzeyine ulaşabilme süresi çok daha uzundur (Erdoğan, 2003).

4.7.10. Hafif betonun yangına dayanımı

Betonun agrega tipi, betonun yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını etkileyen çok önemli bir unsurdur ve hafif agregayla üretilmiş, ısı iletkenliği düşük betonlar, normal betonlara göre yangın durumunda daha az dayanım kaybına uğrarlar (Aydın ve Baradan, 2003).

Hafif betonların boşluklu yapılarının onlara kazandırdığı düşük ısı iletkenlik katsayısı ve bazı agrega türlerinin zaten üretilirken ısısal genleşmelere maruz

kalmaları nedeniyle, ısı genleşme katsayılarının düşüklüğü, yangına karşı hafif betonun avantajlarını oluşturmaktadır.

Düşük ısı iletkenliğine sahip hafif betonlar daha iyi yalıtım sağladığından donatıyı etkileyecek ısıdan korumak için gerekli paspayı miktarının da azaltılması söz konusu olabilir. Isıl genleşme katsayıları düşük hafif betonlarda yangın sonrası daha az yüzey dökülmesi olur. Buradan hafif betonların, yangına dayanımının normal betonlardan daha iyi olduğu söylenir (Chandra ve Berntsson, 2002).

Pomza ile üretilen hafif betonlarda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan çatlaklar, çimento-agrega ara yüzünde olmaz, agregada oluşur (Türker vd, 2001).

4.7.11. Hafif betonunun aşınma direnci

Hafif agregaların, betonun dayanımlarına olan olumsuz etkilerinden dolayı, hafif betonların aşınmaya karşı dayanıklılıkları, normal betonlara göre düşüktür. Aşınma direnci genel olarak basınç dayanımına bağlı olarak artmaktadır (Chandra ve Berntsson, 2002).

Betonun aşınma direnci üzerinde agrega-çimento ara yüzünde oluşacak kenetlenmede önemlidir. Genel olarak daha pürüzlü olan hafif betonların agrega-çimento ara yüzü aderansının güçlü olması nedeniyle normal betona yakın aşınma direnci hafif betonlarda da elde edilebilir (Chandra ve Berntsson, 2002).

4.7.12. Hafif beton ve donatı aderansı

Genel itibariyle daha düşük dayanım özelliklerinin bir sonucu olarak, normal betonlara göre hafif betonların donatı aderansı daha düşük olmaktadır. Bazı hafif betonlar benzer basınç dayanımlı normal betonlardan %20 daha zayıf bir aderansa sahiptir (Kocaman, 2000).

4.7.13. Hafif beton donma-çözülme dayanıklılığı

Donan suyun hacmi yaklaşık olarak %9-10 oranında artmaktadır. Beton içinde donan su malzemeyi içsel olarak gerilmeye maruz bırakır ve çatlamalara veya betonun bütünüyle dağılmasına neden olur. Donmaya karşı önlem olarak, suyun beton

boşluklarına girmesi önlenebilir veya genişleyen suyun yerleşebileceği boşluklar oluşturulur.

Normal betonların donma-çözölmeye karşı mukavemetleri hafif agregalı betonlara göre düşüktür. (Urhan, 1993). Hafif agregalı betonlar, yüksek miktarda su emse de donma ve çözölmeye daha dayanıklıdır. Bunun nedeni, hafif agreganın doygun olmayan çok sayıda gözeneğe sahip olmasıdır, çünkü boş olan gözenekler buzun genişlemesine imkan vermiştir (Kocaman, 2000).

4.8. Betonda Kullanılan Lifler ve Lifli Betonlar

Betonların olumsuz yönleri, beton karışımına eklenen çeşitli malzemeler yardımıyla giderilmek istenir. Lifler, kompozit malzeme üretme mantığına uygun olarak, çeşitli malzemelerin özelliklerini geliştirmek amacıyla farklı tip ve boyutlarda değişik hammaddelerden üretilirler. Liflerin beton yapısı içinde kullanımı gün geçtikçe artan bir uygulamadır.

4.8.1. Lifli betonun tarihçesi ve çeşitleri

Beton karışımlarına çeşitli liflerin eklenmesiyle üretilen yüksek performanslı betonlara "Lifli Beton" denir. Lifli beton yüklemelere karşı gösterdiği farklı davranış ve performansları bakımından geleneksel betondan ayrılırlar.

4500 yıl önce kullanılan saman takviyeli kil harcı (kerpiç) veya at kılılarıyla sıvanın güçlendirilmesi lifin bir ihtiyaç olduğunun göstergesidir. Lifli beton çalışmaları modern anlamda ilk olarak 1950'lerin sonunda James P. Romualdi ve Gordon B. Baston tarafından yapıldı ve 1960'ta ilk patent alındı. 1950'li yılların sonunda Portland Çimento Birliği tarafından lifli betonlar üzerinde çalışmalar yapıldı ve 1972 yılında, liflerin narinlik oranı ve aderansı ile ilgili başka bir patent kabul edildi (Bahadır, 2007).

Betonun gevrek davranışını biraz daha sünek yapmak, çekme dayanımını ve enerji yutma yeteneğini yükseltmek ve çatlak oluşumunu engellemek gibi nedenlerle betona katılan lifler, değişik şekil ve büyüklükte olabilmektedir. ACI 544'e göre lif boyunun, eşdeğer lif çapına oranlanmasıyla elde edilen "Boy/Çap" oranı lifi tanımlayan en önemli ifadelerden biridir (ACI 544.1R-96, 1996). Bu orana "Narinlik Oranı" da denilmektedir. Eşdeğer lif çapı ifadesi bir lifin kesit alanıyla aynı olacak

dairenin çapını gösterir. Lifin narinlik oranı, lifli betonlar üretilirken uygulanacak karıştırma ve yerleşme gibi aşamaları doğrudan etkilemektedir. Boy/çap oranına göre lifleri sınıflandırmak önemli bir sınıflandırma şekli ise de bazı durumlarda örneğin cam liflerde bu yetersiz kalabilmektedir, çünkü cam lifler demet şeklindedir.

Beton üretimi sırasında karışıma eklenecek lif miktarı, betonun birçok özelliğini önemli şekilde değiştirmektedir. Genel yaklaşımda beton karışımları için uygun lif yüzdeleri betonun toplam hacminin %0.5 ile %2.5'u kadardır (Durmaz, 2007).

Lifleri ifade için aşağıdaki kavramlar bilinmelidir (Durmaz, 2007);

- a) Narinlik oranı
- b) Geometrik yapıları
- c) Liflerin çekme gerilmeleri

Beton malzemeler için kullanılacak lif boyları 0.64 ile 7.62 cm arasında değişebilir ve bu boylar için narinlik oranı 30 ile 150 arasındadır (ACI 544.1R-96, 1996).

Lifler doğal ve yapay olarak ikiye ayrılmaktadır. Hayvanlardan, bitkilerden veya minerallerden üretilen liflere doğal lifler denir. İstenen bazı özelliklere sahip olarak insan eliyle üretilmiş liflere de yapay lifler denir (Türker ve Balanlı, 1992).

Betonda kullanılan önemli lif çeşitleri aşağıda başlıklar altında incelenmiştir.

4.8.2. Çelik lifler

Değişik çeşit ve özellikte olan çelik lifler beton ve harçların içinde en yaygın kullanılan liflerin başında gelir. Çelik lifler boyutları, şekilleri ve yüzey yapıları bakımından farklı üretilirler. Çelik liflerin çekme dayanımları, aderansları, mekanik özellikleri ve gerilme yetenekleri farklıdır.

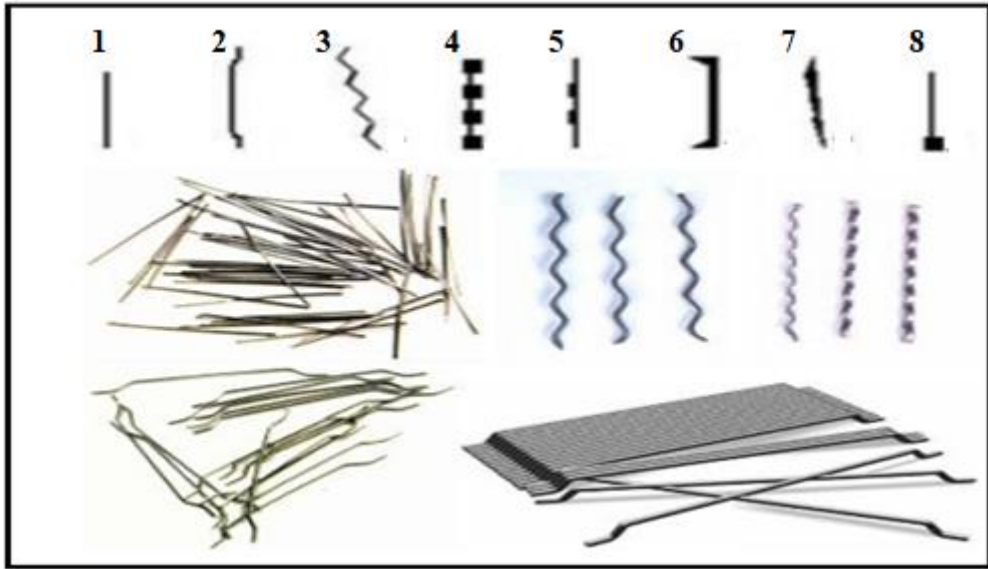
Çelik liflerin üretilme yöntemleri;

- Sıcak çekme yöntemiyle üretme
- Soğukta çekilmiş tellerin sonradan kesilmesi yöntemi ile üretme
- Çelik plakaların kesilmesi yöntemi ile üretme

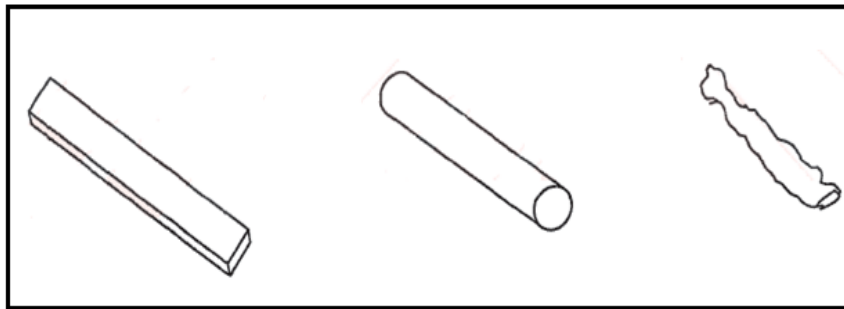
- Çelik tellerin öğütülmesi şeklinde üretim (Bahadır, 2007).

Elastik limitleri %0.2'den düşük olan çelik lifler, düşük karbon içeren çelik C1008'den elde edilir. Çekme gerilmeleri 12000 kgf/cm^2 olan çelik lifler bu yüksek ve düzgün çekme gerilmelerine rağmen az uzama yaparlar. Çelik liflerin çapları 0.13 ile 1.0 mm arasındadır ve uzunluk/çap oranları değişimi 30 ile 150 arasındadır. 13 mm'den 70 mm'ye kadar çelik lif boyları farklı olabilir (TC. Bayındırlık Bakanlığı, 1994).

Şekil 4.16'da betonlarda kullanılacak farklı geometride çelik lif şekilleri gösterilmektedir. 1 ile gösterilenler düz lifler, 2 ile gösterilenler kancalı lifler, 3 ile gösterilenler zikzaklı lifler, 4 ile gösterilenler çift baskılı lifler, 5 ile gösterilenler tek baskılı lifler, 6 ile gösterilenler uçları geniş lifler, 7 ile gösterilenler düzensiz lifler ve 8 ile gösterilenler uçları toplu liflerdir. Şekil 4.17'de de çelik liflerin en kesitleri gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Beton için kullanılan çelik lif çeşitleri (Bahadır, 2007)



Şekil 4.17. Çelik liflerin enkesit biçimleri (Durmaz, 2007)

Kullanımı kolay olsun diye çelik lifler 10 veya 30 adedi su içine girdiğinde eriyen bir tutkal ile yapıştırılmıştır. Bunlar P tipi ve C tipi olarak iki çeşittir. P tipinin çözülme süresi birkaç saniye, C tipinin ise 30-60 saniyedir (Durmaz, 2007). Çelik liflerin kırılmadan ve kopmadan bükülebilir olması, herçeşit yağ kir ve pas gibi maddelerden arındırılmış olması gereklidir.

4.8.3. Cam lifler

Cam liflerin kullanımı 1950'li yıllarda başlamış olsa da, son 25 yıl içinde yaygınlaşmıştır. Ekonomik olmaları fazla kullanılma nedenlerinin başındadır ve cam liflerin üretim biçimleri ya lif kırıntıları veya sürekli lifler halindedir. Dört ana çeşidi vardır (Bahadır, 2007);

1- Sürekli yapıli fitil şeklinde olanlar; Bir veya birden çok miktarda sarılmış bobin şeklindedir.

2- Kırılmış demet halinde cam lifi; Genel olarak boyları 3 ile 5 mm arasındadır, ancak boyları kullanılacağı yere göre de değişir.

3- Cam keçe biçiminde cam lifler; Fitillerden veya sürekli liflerden kırılmış genellikle 50 mm'lik boylarda birbirine eklenen cam lifleridir.

4- Cam dokuma tipi lifler; Cam fitilleri ve iplikleri kullanılarak üretilirler.

Cam lifler betondan çok harç için uygundur, çünkü kullanımında çok hassas olunmalıdır.

4.8.4. Polimer Lifler

Polimer esaslı naylon, aramid, polipropilen ve polietilen lifler beton üretiminde kullanılan plastik esaslı lifleri oluşturur.

Naylon, poliamid çeşidi plastıklere denilmektedir ve lifli beton yapısı içinde kullanılan iki çeşit naylon vardır; Naylon 6 ve Naylon 66. Pahalı bir malzeme olan naylonun mekanik mukavemeti yüksektir, düşük sürtünme katsayısına sahiptir, aşınma dayanımı iyidir ve belirli bir sıcaklığa kadar özelliklerini korur (Sertbaş, 2006).

Polipropilen liflerin kullanımı yaygındır. Bu lif türü alkali ortamlarda kullanılabilir ve kalınlıkları 50-100 mikron arasında değişir. Tekil veya

tabakalar şeklinde olan bu lifler yaklaşık 100 °C'ye kadar özelliklerini yitirmezler. Beton ve harç yapılarının güçlendirilmesi için %0.3 ile %1.5 hacim oranlarında, karışıma eklenirler. Polipropilen 1 ile 8 kN/mm² arasında değişen elastisite modülüne sahiptir (Bahadır, 2007).

Aramid lifler, pahalı bir lif çeşididir. Bu liflerin elastisite modülleri yüksektir ve betonun çekme ve eğilme mukavemetini geliştirirler (Sertbaş, 2006).

Betonun çarpma ve yorulma mukavemetini yükseltmek için kullanılan polietilen liflerin uzunlukları yaklaşık olarak 12-50 mm arası değişir.

4.8.5. Karbon Lifler

Çeliğin 2 veya 3 katı olan elastisite modülleri ve hafif yapıları ile karbon lifler yüksek dayanım ve rijitlik özelliği nedeniyle önce uzay teknolojilerinde kullanılmıştır. Bu liflerin beton içinde kullanılır hale gelmesi petrol ve kömür ziftinden üretilip maliyetlerinin azaltılmasıyla mümkün olmuştur. İplik biçimindeki liflerin her biri içinde 12000 tek lif vardır ve liflerin bir tanesinin çapı 5 µm kadardır. İlk ikisi daha fazla kullanılan üç tip karbon lif mevcuttur (Mindess ve Young, 1981).

- 1- Poliaktrilonitril kökenli lif
- 2- Zift kökenli lif
- 3- Mitsui Mining oluşumu lif

4.8.6. Asbest lifler

Yanmaz olması asbest liflerin en önemli özelliğidir. Asbest mineralinden elde edilen liflerin çapları 0.02 mikrona kadar düşmekte ve boyları yaklaşık 0.8 ile 20 mm arasında değişmektedir. Alkali ortamlar için dayanımı yüksek olan bu liflerle levhalar, basınçlı borular ve ateşe karşı dayanımı yüksek prefabrike yapı elemanları üretilir. Çimento bileşimleri içinde kullanılan asbest lifleri 400 °C'ye dayanır ve aynı zamanda korozyona ve atmosferik değişimlere dayanıklı yapı malzemelerinin üretimine imkan sağlar. Asbest malzemesinin bazılarının insan sağlığı açısından tehlikeli oluşu, asbest liflerle üretilen yapı elemanlarının darbe mukavemetlerinin ve şekil değişimlerinin düşüklüğü, olumsuz yönleridir (Bahadır, 2007).

4.8.7. Kullanılan bitkisel ve diğer lif çeşitleri

Beton ve harçların güçlendirilmesi için eskiden beri kullanılabilir ve bölgesel olarak değişen bu liflere örnek olarak; hindistan cevizi, ahşap, keten ve bambu lifleri gibi lifler örnek verilebilir. Su emen, boyut değiştiren ve elastisite modülleri küçük olan bu lifler sıcaklıktan da fazlasıyla etkilenirler, bu nedenle kullanımları sınırlıdır. Günümüzde bor ve bazalt gibi malzemelerden de lifler elde edilmektedir (Bahadır, 2007). Bu liflerde ekonomik nedenlerle sınırlı kullanıma sahiptir.

Aşağıda Çizelge 4.10’da bazı liflerin fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Bazı liflere ait fiziksel özellikler (Düzgün, 2001)

Lif çeşidi	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (10 ³ , MPa)	Maksimum uzama (%)	Özgül ağırlık (g/cm ³)
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.90
Çelik	276-2760	200	0.5-35	7.8

4.8.8. Liflerin mekanik parametreleri

Lifler bir kısım kavramların bilinmesiyle anlaşılır. Bunlar;

- “Narinlik oranı”
- “Minimum etki uzunluğu (l_m)”; Liflerin beton matrisinde ilk çatlama dayanımı üzerinde etkili oldukları en küçük uzunluktur.
- “Kritik uzunluk (l_c)”; Eğer çatlak lifi orta noktada keserse, lifin ayrılmaktansa kopacağı mesafenin üstündeki uzunluk, kritik uzunluktur. Kritik uzunluk Bağıntı 4.1 ile hesaplanır.

$$l_c = (D_l / 2 \tau_l) \cdot \sigma_{fl} \quad (4.1)$$

Burada D_1 : lif çapı, τ_1 : Yüzeysel aderans mukavemeti, σ_{f1} : lif mukavemetidir (Mindess and Young, 1981).

- “Oryantasyon faktörü veya lif verimlilik faktörü”; Verimlilik, rastgele dağılmış liflerin çekme kuvvetini herhangi bir yöne doğru taşıyabilmeleridir.
- “Mesafe faktörü”; Eğer lifler yeterince birbirlerine yakınlarsa, ilk kopma mukavemeti normal betonunkinden daha yüksektir, çünkü lifler gerilme yoğunluk faktörünü azaltırlar ve kırılmayı kontrol ederler. Boşluk faktörü yani mesafe faktörü için genel formül, Bağıntı 4.2’de verilmiştir;

$$s = 13.8xD_1x\sqrt{1/z} \quad (4.2)$$

Burada; D_1 : lif çapı, z : lifin hacimsel yüzdesi, s : boşluk oranıdır (Mindess and Young, 1981).

4.9. Lifli Betonların Genel Özellikleri

Beton gevrek bir malzemedir ve kompozit yapısı olan malzemelerin çeşitli liflerin eklenmesiyle dayanım özelliklerinin geliştirilmesi çok eskiden beri başvurulan bir yöntemdir.

Lifli betonlar günümüzde yol üstü kaplamalarında, endüstriyel döşemelerin üretiminde, tüneller ve köprülerin yapımında, su yapıları için, havaalanı pistleri için, beton boruların üretiminde, askeri yapılar için ve buna benzer birçok farklı alanda kullanılırlar. Lifli betonların sürekli gelişmesi farklı lif çeşitlerinin üretilebiliyor olmasıyla yakından ilişkilidir (Uğur, 2007).

4.9.1. Lifli betonların çeşitleri ve kullanım avantajları

Lifli betonlardan yaygın olarak kullanılan dört çeşidinin özellikleri aşağıda farklı başlıklar halinde verilmiştir.

4.9.2. Çelik lifli betonlar

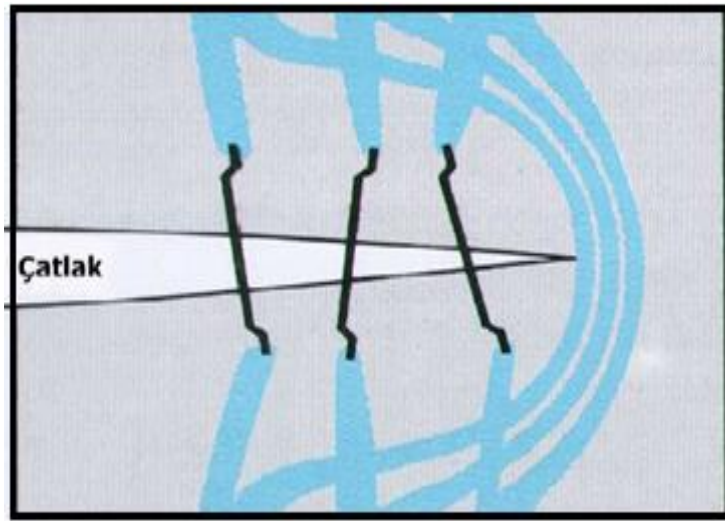
Çelik lifli betonlar, eğilme dayanımı, yüksek tokluk, süneklik ve şekil değiştirme kabiliyetleri bakımından geleneksel normal betonlardan daha üstün özelliklere sahiptir (Yardımcı, 2007).

Betonlara lif katılması betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır. İşlenebilirlikte oluşan azalmayı etkileyen en önemli iki değişken, kullanılan lif miktarı ve liflerin narinlik oranıdır (Durmaz, 2007).

Çelik lifler beton içinde kullanıldığında topaklanmalara neden olmaktadır. Bu, üzerinde önemle durulması gereken bir sorundur. Çelik liflerin topaklanma yapmadan düzgün bir şekilde beton yapısı içinde dağılması gerekmektedir (Korkmaz, 2011).

Beton içerisinde oluşan topaklanmaya neden olarak fazla oranda çelik lif kullanımı, liflerin karışıma hızlı şekilde eklenmesi, kullanılan çelik liflerin narinlik oranlarının yüksekliği veya çelik liflerin beton karıştırılmadan önce beton karıştırıcısına koyulmuş olmasıdır. Topaklanma tehlikesine karşı iki değişik yöntem mevcuttur. Birincisi, bütün beton bileşenleri koyulup, beton hazırlandıktan sonra çelik liflerin kontrollü olarak beton yapısına eklenmesidir. İkinci ise, fazla miktarda beton dökümünde, agregalar konveyör kayışlarıyla taşınıyorsa, çelik liflerin elle bu agregalara eklenmesidir (Uğur, 2007).

Çelik lifler, betonarme donatıları ile bazı benzeyen olumlu etkiler yapmış olsalar da, betondaki çatlamlar bakımından etki ettiği zamanlar ve etkiyi nasıl yaptıkları çok farklıdır. Çatlaklar ilk oluşurken, çelik lifler çatlak ucundaki gerilmeleri üzerine almaktadırlar. Şekil 4.18’de çelik lifin çatlama durumunda davranışı gösterilmiştir.

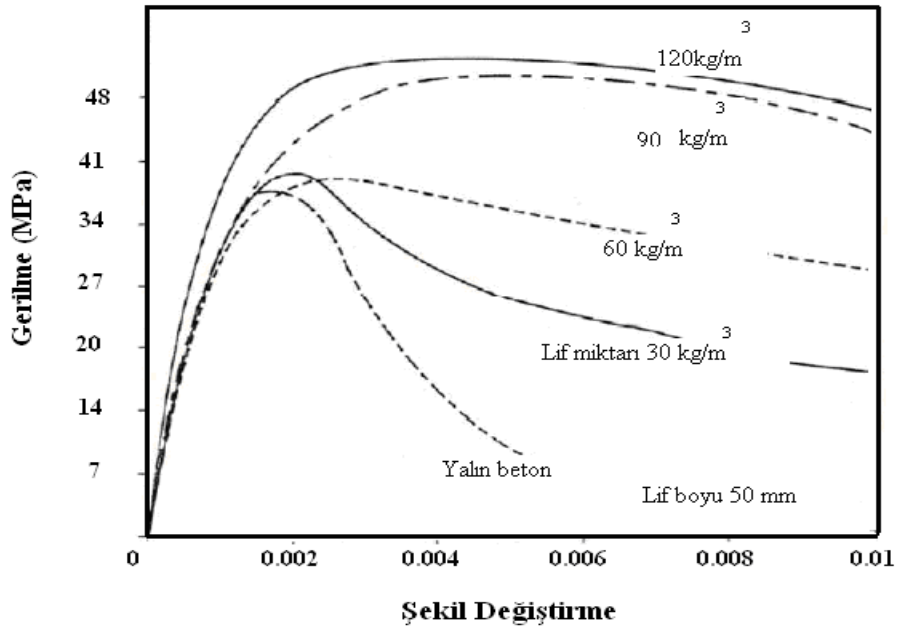


Şekil 4.18. Çelik lifin çatlama anında betonu koruması (Uğur, 2007)

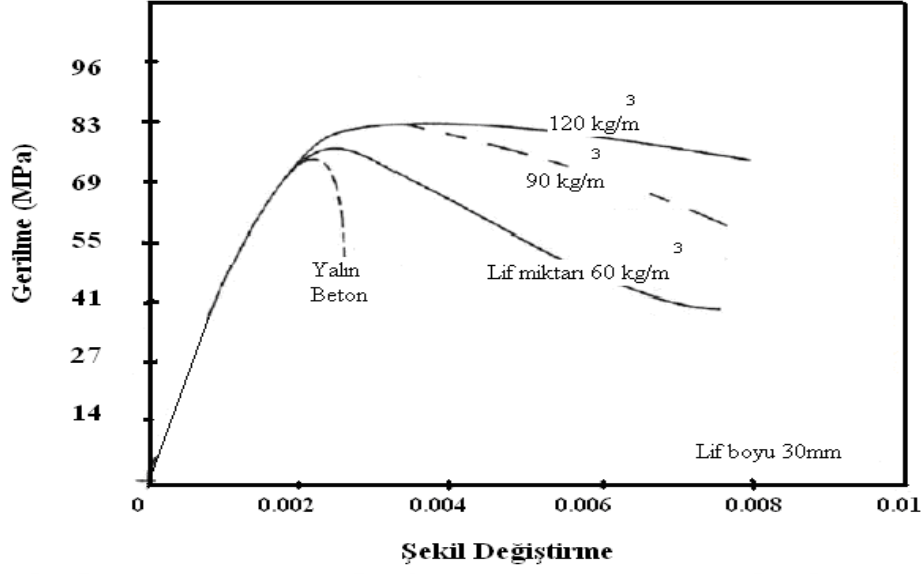
Çelik lifli betonlar, lifsiz betonlara göre kırılmadan önce daha fazla enerji yutabilirler. Çelik liflerin lif geometrisi, lif hacim oranı ve matris kompozisyonu betonun enerji yutma kapasitesi (tokluğu) ve sünekliği üzerinde etkilidir (Uğur, 2007).

Aşağıdaki şekiller lif miktarına bağlı olarak, betonun hem şekil değiştirme kabiliyetinin hem de eğilme dayanımının arttığını yani daha sünek bir yapı sergilediğini göstermektedir.

Uçları kancalı çelik liflerle donatılmış normal ve yüksek dayanımlı betonların, tek eksenli basınç yükü etkisi altında gerilme-şekil değiştirme davranışları, sırasıyla, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de gösterilmiştir.



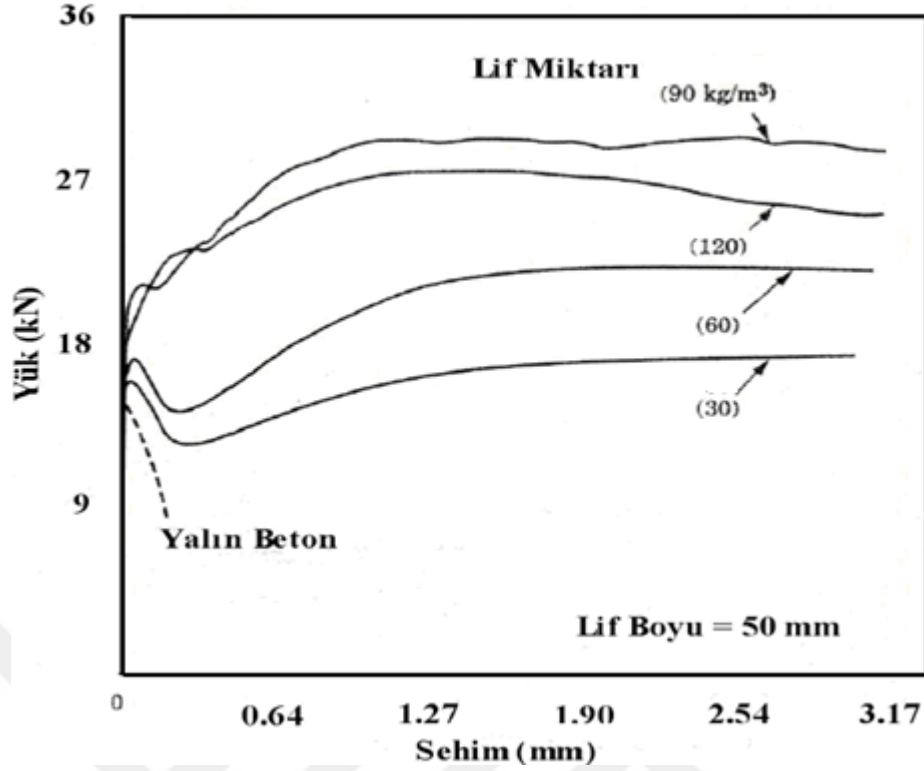
Şekil 4.19. Çelik lifli normal dayanımlı beton basınç-şekil değiştirme (Balaguru ve Shah, 1992)



Şekil 4.20. Çelik lifli yüksek dayanımlı betonda basınç-şekil değiştirme (Balaguru ve Shah, 1992)

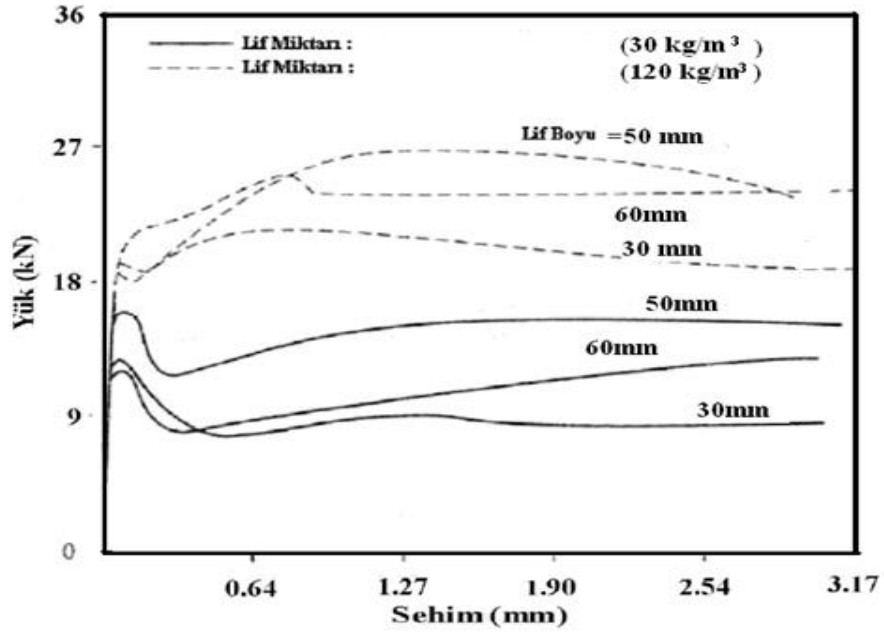
Hacimce %1.5 oranında çelik lif kullanılan betonların doğrudan çekme deneyleri, bu betonların lifsiz betonlara göre %30 ile %40 arasında daha iyi çekme dayanımı performansı gösterdiğini ortaya koymuştur (ACI 544.1R-96, 1996).

Silis dumanı içermeyen betonlarda hacimce %2'den az çelik lif, betonların yarmada çekme dayanımlarını çok yükseltmemektedir (Uğur, 2007). Silis dumanlı yüksek mukavemetli betonların çelik liflerle olan aderansı daha iyi olduğundan bu betonların yarmada çekme dayanımları yüksektir. Şekil 4.21'de lif hacim oranının, 100x100x350 mm boyutlarındaki kiriş numunelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekil 4.21'de verilen yük-sehim eğrilerinden de görüleceği üzere, beton matrisindeki lif miktarı arttıkça, beton daha tok bir malzeme haline gelmektedir (Balaguru ve Shah, 1992).



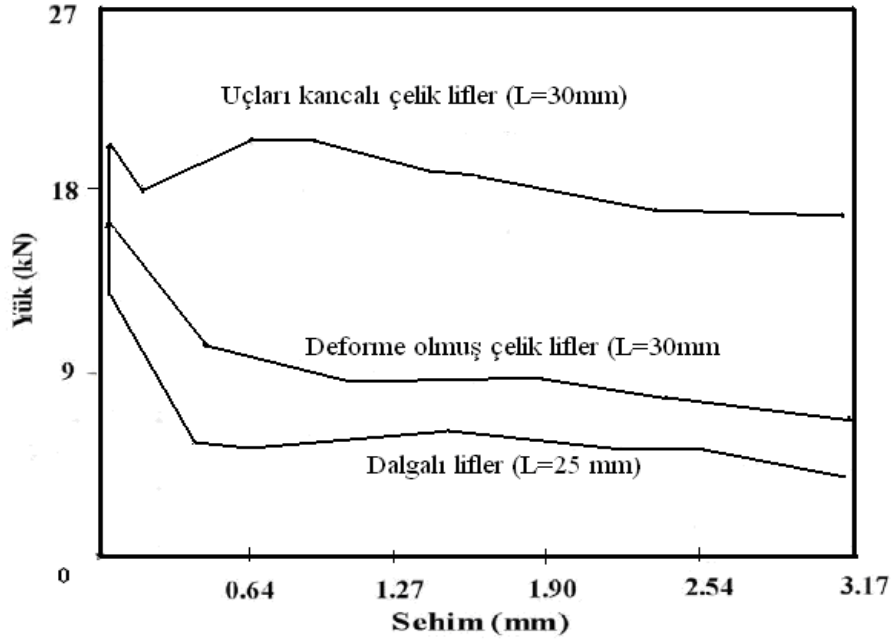
Şekil 4.21. Lif miktarının eğilme dayanımına etkisi (Balaguru ve Shah, 1992)

Lifin uzunluğunun ve geometrik farklılığının 100x100x350 mm ebatlarında lifli beton örneklerinin eğilme dayanımını nasıl etkilediği ise sırasıyla Şekil 4.22 ve şekil 4.23'de görülmektedir. Şekil 4.22'de yük-sehim grafiğinde 120 kg/m³ ve 30 kg/m³ miktarlarında farklı uzunluğa sahip çelik liflerin kullanılması durumunda oluşan davranışlar görülmektedir. Şekil 4.23'de ise uçları kancalı çelik tellerin, betonun eğilme dayanımına ve tokluğuna katkısının, dalgalı ve deforme edilmiş çelik tellere göre daha yüksek olduğu görülür (Uğur, 2007).



Şekil 4.22. Lif boy değişiminin eğilme dayanımına etkisi (Balaguru ve Shah, 1992)

Betonun içinde kullanılan çelik lifler hacimce %2'den daha düşük olduğu sürece, çelik lifli betonlarla, lifsiz betonların elastisite modülü ve poisson oranları eşit kabul edilmektedir (ACI 5441.R-96, 1996; Uğur, 2007).



Şekil 4.23. Lif geometrisinin eğilme dayanımına etkisi (Balaguru ve Shah, 1992)

4.9.3. Polipropilen lifli betonlar

Betonda kullanılmasının en önemli nedeni rötre çatlaklarının önlenmesi olan polipropilen lifler, çatlağı olmayan durabilitesi iyi betonların üretilmesine neden olurlar (Erbaş, 2003). Beton prizi sırasında büzülme yapmakta ve bu büzülme de gerilmeye neden olarak betonu çatlatmaktadır.

Polipropilen lifler hacimce %0.1 ile %2 arasında kullanılırsa, polipropilen lifli bu betonların elastisite modülü değerleri, lifsiz betonlarla aynı olur. Polipropilen liflerin betonun eğilme mukavemetine katkısı konusunda henüz ortak bir fikir yoktur (ACI 544.1R-96, 1996). Polipropilen liflerin beton karışımlarında hacimce %0.1 kullanılması kopma modüllerini artırmakta, daha fazla kullanılması ise kopma modülü değerlerini azaltmaktadır. Ayrıca polipropilen liflerin hacimce %0.1'den fazla kullanılması betonun basınç ve eğilme dayanımını da olumsuz etkilemektedir (ACI 544.1R-96, 1996).

4.9.4. Cam lifli betonlar

Cam lifli beton çeşidi, ekonomik olduğu için fazla kullanılmaktadır. Cam lifli beton genel olarak cam güçlendirmeli plastik endüstrisi için kullanılır. Cam lifli harçlar daha fazla kullanılır ve ince kesitli prekast eleman üretirken tercih edilir. Cam liflerin sahip olduğu ağ yapılar, betona çekme, eğilme, basınç ve aynı zamanda darbe dayanımı kazandırmaktadır. Cam lifli betonlar hem suya ve hem de kimyasal reaksiyonlara karşı iyi dayanırlar (Bahadır, 2007).

4.9.5. Karma lif donatılı betonların genel özellikleri

Beton bileşiminde birden fazla farklı lifin birlikte kullanılması ile beton üzerinde değişik liflerin üstün özelliklerinin betona taşınması hedeflenir.

Mikro boyutlu lifler mikro çatlakları makro boyuta varmadan önler ve betonun elastik davranış özelliğini geliştirirler. Makro boyutlu lifler ise, betonun çekme ve eğilme dayanımını artırır ve büyük çatlakları önlerler. Yük etkisi ile meydana gelen ilk çatlak yapıları mikro çatlaklardır. Makro lifler arasında olan uzaklığın fazla oluşu bu liflerin mikro çatlaklar için bir katkısının olmayacağı anlamına gelir. Dolayısıyla

makro lifler, mikro çatlakların büyüyerek büyük çatlaklar haline gelmesi durumunda etkilidir (Taşdemir ve Barramov, 2002).

4.9.6. Lifli betonların üstünlükleri

Lifli betonların üstünlükleri aşağıdadır (Bahadır, 2007);

- 1- Başta çekme dayanımları olmak üzere genel dayanımları iyidir.
- 2- Çatlakları çok az ve çatlakları büyümeyen betonlardır.
- 3- Kılcal rötre çatlakları çok azdır.
- 4- Yüzeyle iyi yapışır ve bu yüzden püskürtme betonlarda kullanılırlar.
- 5- Daha küçük kesitlerde fazla dayanım sağlarlar.
- 6- Korozyona karşı dirençlidirler.
- 7- Alkali direnci ve donma-çözülme dirençleri fazladır.
- 8- Suyu daha az geçirirler.
- 9- Kalıp sökümü esnasında az zayıf alırlar.
- 10- Bakım işçiliği azdır.
- 11- Betonun kohezyonu arttığı için inşaat kalitesi yükselir.

4.9.7. Lifli betonların hazırlanma ilkeleri ve yerleştirilmesi

Lifli betonlar üretilirken nerede, hangi yöntemle üretileceği hem liflerin düzgün dağılıp dağılmaması hem de betonun segregasyonu için büyük önem taşır.

Çelik liflerin %2'den fazla kullanılması betonda karıştırma işlerini zorlaştırır. Lifli beton üretirken seçilecek su/çimento oranı 0.4-0.6 arasında ve çimento miktarı 250 ile 430 kg/m³ arasında olmalıdır. Su miktarını düşüren, hava sürükleyiciler ve süper akışkanlaştırıcılar gibi çeşitli katkı malzemeleri lifli betonlarda kullanılabilir. %25 ile %35 arası puzolanik madde kullanımı uygundur. Yüksek çimento miktarı ve ince agrega oranı ve düşük iri agrega miktarları nedeniyle karıştırma yöntemleri bakımından lifli betonlar normal betonlardan farklıdır (Durmaz, 2007).

Kıvamının biraz katı olması, lifli betonların yerleştirilmesini zorlaştırır. Beton yerleştirilirken ayrışma olmamalıdır.

Diğer liflerde de küçük farklılıklar göstermekle birlikte karıştırma kuralları yönünden çok kullanılan çelik lifler özel bir öneme sahiptir.

4.9.8. Çelik lifli betonlara ait özel karışım kuralları

TS 10514'te betonlara çelik lif karıştırılması ve kontrol yöntemleri açıklanmıştır. İyi bir çelik lifli beton üretilmesi için aşağıdaki kurallara uyulmalıdır.

4.9.9. Çelik lifli beton için malzemeler ve kullanım kuralları

- Doğal agrega en büyük agrega çapı 28 mm, kırmataşta 32 mm olmalıdır.
- 14 mm'den daha iri agrega oranı %15 ile %20 arasında olmalıdır.
- Kum miktarı bütün agreganın %40 ile %45'i arasında olmalıdır.
- En az çimento miktarı 320 kg/m^3 olmalıdır.
- Su/çimento oranı en fazla 0.55 olur.
- Akışkanlaştırıcılar kullanılabilir.
- Betonun en düşük karakteristik basınç dayanımı 20 MPa olmalıdır.
- Betonda olması gereken 0.25 mm'den küçük ince malzeme miktarı aşağıdaki Çizelge 4.11'de verilmiştir..

Çizelge 4.11. Betonda bulunması gereken ince malzeme miktarı (TS 10514, 1992)

Maksimum agrega çapı	İnce malzeme miktarı (0.25 mm'den küçük)	
	kg /m ³	Litre/m ³
8 mm	525	180- 185
16 mm	450	150- 155
32 mm	400	130- 135

NOT: Çimento özgül ağırlığı=3.1 g/cm³

Kum özgül ağırlığı =2.65 g/cm³ olarak alınmıştır.

Beton karışımı sırasında gözle kontrol gereklidir ve topaklanma kalmayınca kadar karıştırılmalıdır. Transmikserde taşıma sırasında, dönüş hızları normal betona göre daha düşük ayarlanmalıdır. Kritik çelik lif miktarları aşılmamalıdır. Aşağıda

Çizelge 4.12’de TS 10514’e göre en büyük agrega çapına göre kullanılacak en fazla çelik lif miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.12. En büyük agrega tane çapına göre kullanılacak maksimum lif miktarları (TS 10514, 1992)

En büyük agrega çapı	Kullanılacak lif miktarı (kg/m ³)					
	Uzunluk/çap=60		Uzunluk/çap=75		Uzunluk/çap=100	
	Normal beton	Pompa beton	Normal beton	Pompa beton	Normal beton	Pompa beton
4	160	120	125	95	95	70
8	125	95	100	75	75	55
16	85	65	70	55	55	40
32	50	40	40	40	30	25

4.9.10. Çelik liflerin betonlara karıştırılması

Çelik lifler betona, beton santrallerinde veya transmikserlerde karıştırılırlar. İlave edilirken TS 10514’e uyulmalıdır (TS 10514, 1992).

4.9.11. Polipropilen lifin beton içinde oranı ve betona karıştırılması

ASTM C1116 (2000) için %100 saf polipropilen malzeme ile üretilen lifler, hacimce %0.1 yani 1 litre olması 1 m³ beton için yeterlidir. Polipropilen lifin yoğunluğu 0.9 kg/litre olduğundan, önerilen lif miktarı en az 0.9 kg/litre olmalıdır. Bu oranların hacimce %0.05 ile %2 arasında hatta %5’e kadar yükseltilebilmektedir. İçerdiği özel katkıları nedeniyle polipropilen lifler, topaklanmadan, her aşamada betona eklenebilir. Polipropilen liflerin su emme özelliği olmadığından, beton karışım oranlarını etkilemezler. Yüksek devirde sadece 5 dakika karıştırıldıktan sonra polipropilen demetleri ayrışır ve homojen olarak beton içerisinde dağılır. Polipropilen lifli betonu yerleştirmek kolay ve ekonomiktir. Polipropilen lifler için tavsiye edilen kullanım oranları aşağıdaki Çizelge 4.13’de verilmiştir (Karahan, 2006).

Çizelge 4.13. Kullanılacak polipropilen lif dozajları (Karahana, 2006)

Polipropilen	İç mekan kullanımı	Dış mekan kullanımı	Ağır hizmet
Minimum dozaj (g/m ³)	600	900	1800
Tam etki (g/m ³)	1200	2700	3600
Uzunluk (mm)	6-9-12-15	6-9-12-15-19-25 (İç mekan harici)	

4.9.12. Lifli betonların kontrol kuralları

Lifli betonların kontrolü (çelik lifli beton için) TS 10514'e göre yapılır.

- Kontrolün amacı, sürekli bir kalitenin sağlanmasıdır.
- Her kontrolde, her 1000 m³'lük beton karışımından 3 adet 10 litrelik beton örneği alınır.
- Alınan beton örneği su ile yıkanır ve kalan çelik lifler mıknatıs yardımı ile toplanılarak tartılır.
- 3 örnekte bulunan ortalama çelik lif miktarı en çok %10, her bir numunedeki miktar ise en çok %15 olması gerekenden farklı olabilir.
- Bu oranlar elde edilene kadar, beton santralinde gerekli tedbirler alınıp, üretilmeye öyle başlanmalıdır (TS 10514, 1992).

4.10. Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri

Lifli betonlar, taze ve sertleşmiş beton özellikleri bakımından normal betonlardan farklılıklar gösterirler. İşlenebilirlik bakımından zayıf olan lifli betonların karışımına akışkanlaştırıcıların %0.3'ten daha çok eklenmesi işlenebilirliği artırır (Durmaz, 2007).

Lifli betonlar sertleştiğinde de normal betondan farklı özellikler sergilemektedir. Bu farklı özellikler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir

4.10.1. Lifli betonların basınç dayanımları

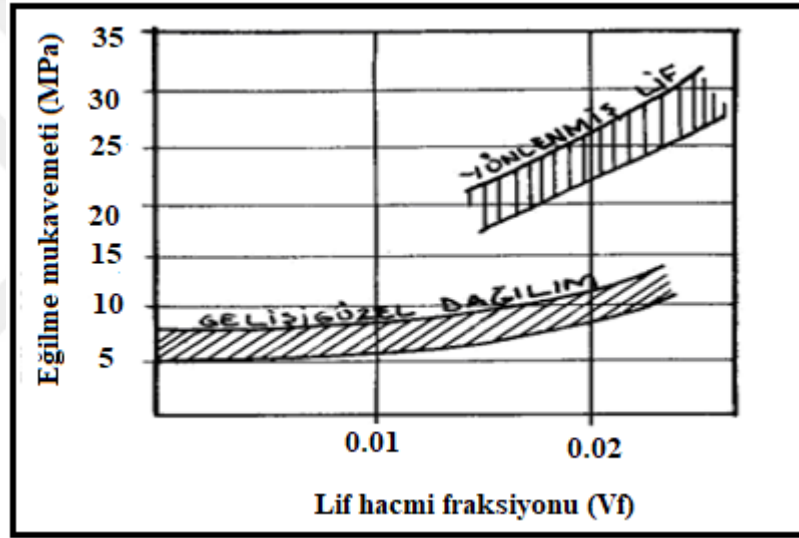
Betona liflerin eklenmesinin, beton basınç dayanımlarına etkisi, betonun eğilme dayanımları ile kıyaslanamayacak derece da azdır. Basınç dayanımındaki artış bütünüyle beton içinde lif dağılımına bağlıdır. Basınç yönüne dik lifler basınç

dayanımını artırmazken, bu yöne paralel lifler basınç dayanımını artırmaktadır (T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1994).

4.10.2. Lifli betonların eğilme dayanımları

Liflerin betonların eğilme dayanımlarına etkisi, lifin çeşidi ve boyuna, narinlik oranına, lif dağılımına ve bunun gibi birçok etkene bağlıdır. Genellikle çelik lifler betona eklendiğinde eğilme dayanımını normal betonlara göre %50-100 oranında artırır (Durmaz, 2007).

Aşağıdaki Şekil 4.24'de lif miktarı (Lif hacim fraksiyonu) ile eğilme dayanımı arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Lif miktarı, dağılımı ve eğilmede çekme dayanımı ilişkisi (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1994)

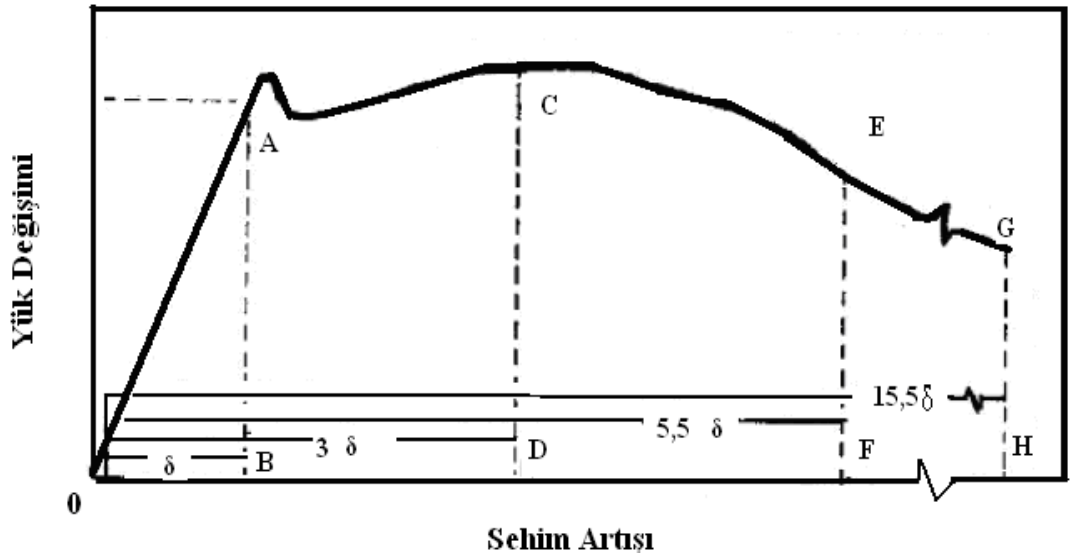
4.10.3. Lifli betonların enerji emme kapasitesi (tokluk özellikleri)

Lifli betonlar için eğilme zorlanmasından oluşan enerjinin emilmesi çok önemlidir. Malzemenin birim hacmine düşen plastik şekil değiştirme enerjisine tokluk denir. Tokluk bir malzemenin kırılmaya kadar gösterdiği enerji depolama veya emme yeteneğini gösterir. Tokluk, genellikle gerilme şekil değiştirme eğrisinin altında kalan kısmın alanının hesaplanması ile bulunur. "Tokluk İndeksi" şeklinde tokluğu ifade eden birimsiz bir değişken vardır. Yükleme hızı, beton lif miktarı, lifin boyu, narinliği ve geometri gibi değişkenler tokluğu etkilemektedir. Lifli betonun gerilme-birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında

kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı, Tokluk İndeksi olarak tanımlanmıştır. (Barr vd, 1982)

Aşağıdaki Şekil 4.25’de görüldüğü gibi, ilk çatlak tokluğu OAB üçgeninin alanı ile hesaplanır. Burada A noktası ilk çatlak oluşturan gerilmedir. İlk çatlak gerilmesi alanının 3 katındaki deformasyona kadar yükleme devam ettirilir ve OACD alanı belirlenir. Bulunan OACD alanı, OAB alanına oranlanırsa I_5 elastik şekil değiştirme indeksi hesaplanır. I_{10} ve I_{30} (TS 10515’te I_{30} yerine I_{20} kullanılır) indeksleri ise ilk çatlak gerilmesinin 5.5 ve 15.5 (TS 10515’e göre 10.5) katı kadar yapılan deformasyonlar sonucu bulunan alanların OAB alanına oranlanması ile bulunur.

Geleneksel betonlarda bu endeks değeri 1’dir. Çünkü lif içermeyen betonlar ilk çatlak oluşumu sonrasında hemen kırılırlar. Tokluk indeksi lifli betonlar için çatlamanın meydana geldiği noktaya, lif çeşidine, narinlik oranına, liflerin hacimsel oranına ve liflerin dağılımına göre değişiklik gösterir (T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1994).

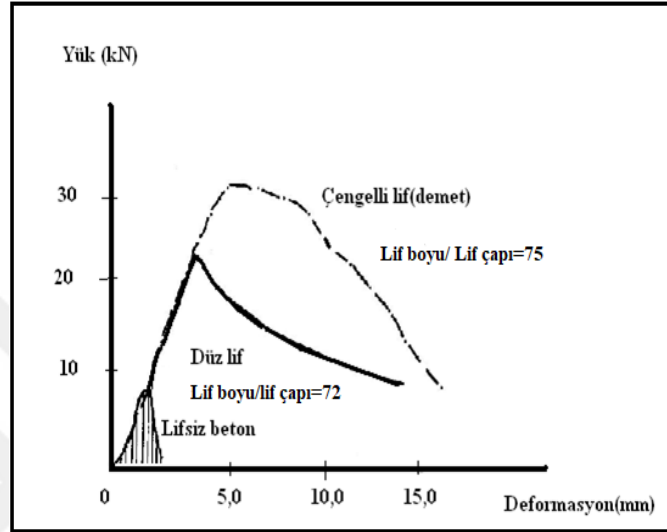


Şekil 4.25. Tokluk indekslerinin hesabında kullanılan yük-sehim eğrisi (T.C. Bayındırlık Bakanlığı, 1994)

Elastik şekil değiştirme indeksleri için aşağıda Çizelge 4.14 esas alınır ve Şekil 4.26’da da lif çeşidi ve narinlik oranına göre tokluk grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.14. Tokluk indekslerinin değerlendirme kriterleri (Durmaz, 2007)

Alan	İndeks	Eğilme kriteri	Lifsiz beton	Elastik-plastik malzeme	Lifli beton için aralık
OACD	I ₅	3	1	5	1-6
OAEF	I ₁₀	5.5	1	10	1-12
OAGH	I ₂₀	10.5	1	20	1-25



Şekil 4.26. Lif çeşidi ve narinliğe göre tokluk (T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 1994)

4.10.4. Lifli betonların kesme dayanımları

Liflerin betona eklenmesi, betonların kesme dayanımlarını ve aynı zamanda sünekliliğini artırmaktadır (Yardımcı, 2007).

4.10.5. Lifli betonların darbe dayanımları

Lifli betonların darbe dayanımları onların tokluk özellikleriyle alakalıdır ve betona eklenen lifler, beton darbe dayanımını artırır. Darbe dayanımları kullanılacak çelik lifler ile normal betonlara kıyasla %100-1200 arasında yükselir. Çelik liflerin kullanımı ile kırılma enerjisi normal mukavemetli betonlar için 2.5 ve yüksek mukavemetli betonlar için ise 3.5 kat artar (ACI 544.1R-96, 1996).



5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda deneysel çalışmalar ile deneysel çalışmalarda uygulanan metodlar ve malzemeler açıklanmıştır.

Deneysel çalışmalar için farklı karışımlara sahip olmak üzere kendiliğinden yerleşen, kendiliğinden yerleşen lifli, kendiliğinden yerleşen hafif ve kendiliğinden yerleşen hafif lifli beton serileri üretilmiştir. Bu betonlar üzerine hem taze beton deneyleri, hem de sertleşmiş beton deneyleri yapılmıştır.

Silis, uçucu kül, portland çimentosu, su, hava sürükleyici ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları, iki farklı çelik lif, tek çeşit sentetik lif, normal agrega ve hafif agrega (pomza) değişik oranlarda birleştirilerek beton karışımları hazırlanmıştır. Beton karışım hesapları yapıldıktan sonra gerekli özellikleri elde edinceye kadar deneme betonları dökülmüştür. Üretilecek hacimde beton için karışımda kullanılacak malzeme miktarları tartılıp hazırlanmıştır. Taze betonların hazırlanması, taze beton deneylerinin yapılması ve sertleşmiş beton deneyleri için bu betonların numune kalıplarına doldurulması işlemleri yapılmış, her farklı serinin taze beton deneyleri tamamlanmıştır.

Toplamda üretilen 12 beton serisinin ilk ikisi; kendiliğinden yerleşen ve kendiliğinden yerleşen lifli beton serileridir ve kontrol amaçlı üretilmişlerdir. Geriye kalan 10 seride normal agrega ile pomza değişik oranlarda ve yer değiştirilerek kendiliğinden yerleşen hafif betonlar üretilmiştir. İki farklı çelik ve bir sentetik lif bu 10 serinin beş tanesinde kullanılmıştır.

Farklı karışımlara sahip bu 12 seri beton üzerine taze beton deneylerinden; birim hacim ağırlık, serbest yayılma, J-halkası, L-kutusu ve V-hunisi deneyleri yapılmıştır. Sertleşmiş beton deneyleri için hazırlanan numunelere de; basınç, eğilmede çekme, betonarme kirişçiklerde eğilmede çekme, yarmada çekme, aderans deneyi, ağırlıkça ve hacimce su emme, ısı iletkenlik, ultrases geçiş hızı ve yangın dayanımı deneyleri uygulanmıştır. Basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme deneyleri hem 7. gün hem de 28. gün periyodlarında yapılmış, diğer deneyler numunelere 28 günlük süre sonunda uygulanmıştır.

Sertleşmiş beton deneyleri için küp (150x150x150 mm ve 100x100x100 mm olarak iki çeşit), silindir (çapı 100 mm, yüksekliği 200 mm ve çapı 150 mm, yüksekliği 300 mm olan iki farklı çeşit), prizmatik kiriş (150x150x550 mm) ve prizmatik geometrili (60x300x300 mm) numuneler üretilmiştir.

Yapılan deneylere ait sonuçlar incelenmiş ve bu sonuçlar birbiriyle ilişkilendirilmeye çalışılmıştır. Kendiliğinden yerleşen, hafif ve hafif lifli betonların olumlu ve olumsuz yönleri ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

Genel hatlarıyla açıklanan bu deneyler için aşağıda özellikleri verilen malzemeler, deney aletleri ve yöntemler kullanılmıştır.

5.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmalarda kullanılan malzemeler özellikleriyle birlikte aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

5.1.1. Çimento

Deneylerde kullanılan çimento Nuh Çimento Sanayi A.Ş'nin ürettiği portland çimentosu CEM I-42,5-R'dir. Çimento kullanılacağı zaman rutubetsiz ve kuru ortamda saklanan çimento torbalarından alınmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel bileşenler aşağıdaki Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Betonda kullanılan çimentoya ait bazı fiziksel ve kimyasal özellikler
(<http://www.nuhcimento.com.tr/tr/home/urunler.asp>)

Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	Birimi	Miktar veya değeri
Özgül ağırlık	g/cm ³	3.1
Blaine özgül yüzeyi	cm ² /g	3510
Kızdırma kaybı	%	2.66
2 günlük dayanım	MPa	28
28 günlük dayanım	MPa	58.6
Priz başlangıcı	Dakika	175
Priz sonu	Dakika	210
S ₀₃	%	2.69
C ₃ S	%	58
C ₃ A	%	4.3
Klorür	%	0.008
Toplam alkali	%	0.61
MgO	%	1.19
Serbest kireç	%	1.27
Çözünmeyen kalıntı	%	0.55

5.1.2. Viskozite artırıcı olarak uçucu kül

Deney çalışmaları için viskozite artırıcı uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül, Park Termik Santralinden (Çayırhan Termik Santrali) temin edilmiştir. Çayırhan termik santrali linyit kömürü kullanmaktadır ve üretilen uçucu kül, ASTM C 618'e göre C sınıfı olarak kabul edilmektedir. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Beton Tekniği Bölümü laboratuvarında TS EN 450 ve TS 24'e göre yapılan deneylerde, uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler belirlenmiştir (Tuygun, 2002). Uçucu küle ait özellikler aşağıda Çizelge 5.2, Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.2. Çayırhan termik santrali uçucu kül özellikleri (Tuygun, 2002)

Bileşim	Bileşimin yüzdesi (%)	C sınıfı uçucu küller için TS EN 450 ve ASTM C 618	F sınıfı uçucu küller için TS EN 450 ve ASTM C 618
SiO ₂	50.21	-	-
Al ₂ O ₃	14.74	-	-
Fe ₂ O ₃	9.85	-	-
S+A+F	74.80	>50 ASTM C 618	>70 ASTM C 618
CaO	13.03	>10(Yüksek kireç) ASTM C 618	<10 (Düşük kireç) ASTM C 618
MgO	1.09	-	-
SO ₃	3.27	<5 TS EN 450	<5 TS EN 450
K ₂ O	2.36	-	-
Na ₂ O	3.12	-	-
TiO ₂	0.72	-	-
P ₂ O ₅	0.54	-	-
Mn ₂ O ₃	0.10	-	-
Cl ⁻	0.0186	<0.1 TS EN 450	<0.1 TS EN 450
Kızdırma Kaybı	0.75	<5 TS EN 450	<5 TS EN 450
Serbest CaO	0.78	<1 TS EN 450	<1 TS EN 450

Çizelge 5.3. Çayırhan uçucu külünün fiziksel özellikleri (Tuygun, 2002)

	Özgül ağırlık (g/cm³)	2.10
Priz süresi	Başlangıç (saat: dakika)	3:45
	Bitiş (saat: dakika)	5:05
	Hacim sabitliği (Le Chatelier) toplam (mm)	1
İncelik	Özgül Yüzey (Blaine) cm ² /g	2670
	200 µm elek üstünde kalan yüzde (%)	4.1
	90 µm elek üstünde kalan yüzde (%)	17.8
	45 µm elek üstünde kalan yüzde (%)	32.8

Çizelge 5.4. Çayırhan uçucu külünün puzolanik aktivite endeksi (Tuygun, 2002)

Gün	Aktivite endeksi (%)	TS EN 450
7	64	-
28	74	>75

5.1.3. Silis dumanı

Kullanılan silis dumanı ferrosilikon veya metal alaşım endüstrisinin bir yan ürünü olarak Antalya Ferrokrom tesislerinde üretilmektedir, Dost kimya firmasından temin edilmiştir ve aşağıdaki Çizelge 5.5 ve Çizelge 5.6'da fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir.

Silis dumanının ağırlıkça çimento ile yerine %15 ikame oranında katılması durumunda, basınç dayanımı yaklaşık %12 ile %23 arasında artmaktadır (Beycioğlu vd, 2010; Tohumcu ve Bingöl, 2013).

Çizelge 5.5. Silis dumanı kimyasal analizi (Tohumcu ve Bingöl, 2013)

Kimyasal analiz	
Madde	Miktar (%)
SiO ₂	93.4
Al ₂ O ₃	0.30
Fe ₂ O ₃	0.35
CaO	0.38
MgO	0.85
C	-
S	-
Kızdırma Kaybı	4.45

Çizelge 5.6. Silis dumanı fiziksel özellikler (Türkel ve Kadiroğlu, 2007)

Fiziksel özellikler	
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2.30
Özgül Yüzey (cm ² /g)	210800
45 µm elek üstü	2.30

5.1.4. Agregalar

Yapılan deneyler için en önemli yapı malzemelerinden biri olan agregalar, hafif beton üretiminin en temel gereksinimi konumundadır. Ülkemiz doğal hafif agregalar bakımından çok zengindir ve bu agregalarla üretebilecek nitelikli beton ülkemize büyük katkılar sağlayacaktır.

Deneylerde kullanılacak agregalar, normal agregalar ve hafif agregalar olarak iki kısımdır. Hafif agregaların, normal agregalarla, belli oranlarda yer değiştirecek şekilde kullanılması planlanmıştır. Tasarımda betonun, hafif agrega kullanımı sayesinde hafifleştirilmesi sağlanmıştır.

Deneylerde kullanılan hafif agregalar Kayseri bölgesinden Soylu Madencilik Şirketinden temin edilen pomza agregalarıdır. Bu agregalara ait özellikler aşağıda Çizelge 5.7, Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’da verilmiştir. Aynı zamanda Şekil 5.1’de de normal agregaya ait tane dağılımı (granülometri) eğrisi gösterilmiştir.

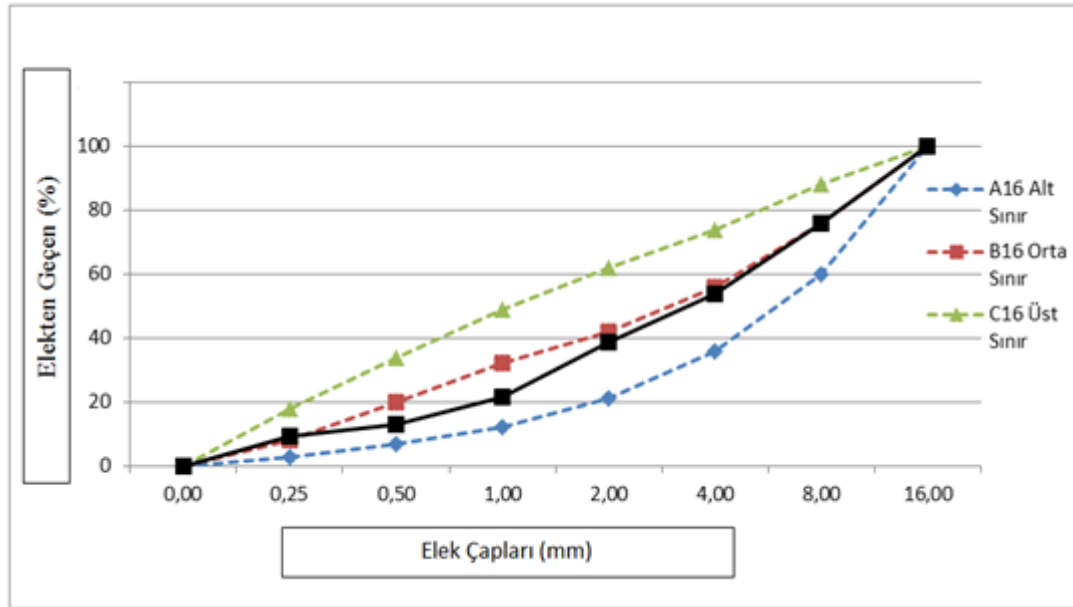
Beton üretilirken lif ilave edileceği için ve yüksek akıcılık istendiğinden kullanılacak agreganın en büyük tane çapı 16 mm olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.7. Kullanılan normal agreganın fiziksel özellikleri

Normal agregata tane sınıfı	Normal agregata özellikleri				
	Yoğunluk (kg/dm ³)	Su emme (%)	İnce madde oranı (%)	Aşınma oranı (%)	
				100 devir	500 devir
Kırma kum (0-4)	2.66	1.01	1.65	-	-
İnce kırma çakıl (4- 8)	2.71	0.39	-	3.7	17.9
İri kırma çakıl (8- 16)	2.70	0.44	-	2.9	15.1

Çizelge 5.8. Normal agregaya ait elek analizi sonuçları

Elek (mm)	Elekler üzerinde kalan (g)	Elekler üzerinde yığışımli ağırlık (g)	Elekler üzerinde ağırlık (%)	Yığışımli ağırlık		TS 706 sınır değerleri		
				Kalan (%)	Geçen (%)	Alt sınır A ₁₆	Orta sınır B ₁₆	Üst sınır C ₁₆
16	0	0	0	0	100	100	100	100
8	2404	2404	24.04	24.04	75.96	60	76	88
4	2213	4617	22.13	46.17	53.83	36	56	74
2	1499	6116	14.99	61.16	38.84	21	42	62
1	1736	7852	17.36	78.52	21.48	12	32	49
0.5	832	8684	8.32	86.84	13.16	7	20	34
0.25	396	9080	3.96	90.80	9.20	3	8	18
Tepsi	920	10000	9.20	100	0			



Şekil 5.1. Normal agregaya ait granülometri eğrisi ve sınır değerler

Çizelge 5.9. Kayseri pomza agregası ve normal agregası değerleri ve karşılaştırma

Özellikleri	Pomza agregası			Normal agregası		
	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm	0-4 mm	4-8 mm	8-16 mm
Kuru gevşek birim hacim ağırlık (kg/m ³)	698	389	356	1694	1628	1522
Kuru sıkışık birim hacim ağırlık (kg/m ³)	794	442	382	1797	1738	1654
Kuru özgül ağırlık faktörü	1.50	1.19	1.03	-	-	-
Kullanılacağı durumdaki özgül ağırlık faktörü	1.52	1.22	1.14	-	-	-
Özgül ağırlıklar (Doygun, kuru yüzey) (kg/m ³)	-	-	-	2660	2710	2700
Su emme (%)	31	45	51	1.01	0.39	0.44
63µm'den geçen (%)	8.6	4.3	4.2	8.6	9.4	0.6

5.1.5. Karışım suyu

Beton üretiminde şehir şebekesinden temin edilen içme suyu kullanılmıştır.

5.1.6. Kullanılan kimyasal katkı

Deneyde üçüncü nesil yüksek performanslı bir beton katkısı olan Sika ViscoCrete Hi-Tech 18 kullanılmıştır. Yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı olan bu katkı, betonda yüksek oranda su azaltır ve yeterli işlenebilirlik sağlar. Sika ViscoCrete Hi-Tech 18 beton katkısı aşağıda bildirilen kullanım alanları için uygundur (<http://www.sika.com.tr>).

- 1- Kendiliğinden yerleşen beton üretimi için kullanılır.
- 2- Çok yüksek oranda su azaltma ihtiyacı olan beton (%30'a kadar) üretimi için kullanılır.
- 3- Mükemmel işçilik ve yüksek dayanım istenen uygulama alanlarında kullanılır.

4- Yüksek performanslı beton üretiminde kullanılır.

Kimyasal katkıya ait bazı özellikler Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Pomza agregasının ayrışma riskine karşı Sika Aer hava sürükleyici katkısı kullanılmıştır. Bu katkının kullanım yerleri; beton yollar, havaalanları pist ve taksi yolları, barajlar ve su depoları ve kütle betonlarıdır. Sika Aer kullanımını aşağıdaki avantajları sağlar ([http:// www.sika.com.tr](http://www.sika.com.tr)).

- 1- Donma-çözülme direncini artırır.
- 2- Buz çözücü tuzların etkilerine karşı direnci artırır.
- 3- İşlenebilmeyi iyileştirir.
- 4- Durabiliteyi artırır.
- 5- Ayrışma riskini azaltarak kohezyonu artırır.
- 6- İşlenebilme kaybı olmaksızın su miktarında azalma sağlar.
- 7- Yüksek dozda bile prizi geciktirmez.

Çizelge 5.10. Sika ViscoCrete Hi-Tech 18 ve Sika AER katkılarının bazı teknik özellikleri (<http://www.sika.com.tr>)

Özellikler	Sika ViscoCrete Hi-Tech 18	Sika Aer hava sürükleyici
Görünüm ve renk	Açık kahverengi sıvı	-
Kimyasal yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer	Özel yüzey aktif maddelerden oluşan sıvı
Yoğunluk	1.10±0.02 kg/l. 20 °C' de	0.99-1.03 kg/l
pH değeri	3-7	3-7
Donma noktası	-10 °C	0 °C
Suda çözünebilirlik ve klorür (%)	En fazla %0.1 ve Klorür içermez	Klorür içermez
Alkali miktarı (% Na ₂ O eşdeğeri)	En fazla %4	En fazla %3
Dozaj	Kendiliğinden yerleşen beton için kullanılan bağlayıcının ağırlıkça %1 ile %2'si arasında	Ağırlıkça çimento miktarının %0.03-0.15'i
Beton karışımına eklenmesi	Karışım suyuna katılmalıdır.	Karışım suyuna katılmalıdır.

5.1.7. Kullanılan lifler (elyaf)

Deneyleerde kullanılmak üzere üç farklı lif çeşidi belirlenmiştir. Bekaert İzmit Çelik Kord Sanayi Ticaret A.Ş'nden temin edilen Dramix adlı lifler, beton içerisinde kullanılacak çelik liflerdir. Dramix ZP 308 ve Dramix RC 65/60 BN denilen bu iki farklı çelik lif tutkallıdır, uçlarından kancalıdır ve Dramix ZP 308, 30 Kg'lık, Dramix RC 65/60 BN ise 15 kg'lık torbalar şeklinde piyasaya sunulmaktadır. Bu çelik liflerin elastisite modülü 210000 MPa'dır.

Dramix ZP 308, kısa olan bu lif, geçmiş çalışmalarda daha iyi sonuç verdiğiinden 5 farklı seride kullanılmıştır (Keskiner, 2016; Sahmaran vd, 2005; Korkmaz, 2011). Bunun yanısıra Dramix RC 65/60 BN, yani uzun olan lif, sonuçları kıyaslamak amacıyla yalnızca bir seride Dramix ZP 308 yerine kullanılacaktır.

Sika firmasının yeni ürettiği M-48 adlı sentetik makro-lifi, sonuçlarını görmek adına tamamı pomza agregası içeren seride kullanılmıştır. M-48 betonarmede enerji emme kapasitesini, çekme dayanımını artıran, betonu güçlendiren, paslanmayan ve yüzeysel pullanmayı azaltan bir liftir. Ergime noktası 440 derecedir ve elastisite modülü 6200 MPa'dır.

Liflere ait özellikler aşağıdaki Çizelge 5.11'de verilmiş ve Şekil 5.2'de liflere ait fotoğraflar gösterilmiştir.

Çizelge 5.11. Beton karışımında kullanılan lif özellikleri

Lifler	Özgül ağırlık (kg/dm ³)	Uzunluk (mm)	Eşdeğer çap	Boy/çap (Oran)	Çekme dayanımı (MPa)	Şekli
Çelik liflere ait özellikler						
Dramix RC 65/60 BN	7.85	60	0.90 mm	67	1160	Kancalı
Dramix ZP 308	7.85	30	0.75 mm	40	1225	Kancalı
M-48 sentetik lif						
Sika Fiber	0.9	48	0.93 mm	51.61	400	Düz



a) Dramix ZP308



b) Dramix RC 65/60 BN



c) M-48 Sentetik lif

Şekil 5.2. Beton karışımlarında kullanılan lif çeşitleri

5.2. Beton Karışımları ve Seriler

Beton karışımlarında ağırlıkça çimento 434 kg/m^3 , uçucu kül 80 kg/m^3 , silis 44 kg/m^3 ve su 180 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı, toplam bağlayıcının ağırlıkça %1.09 ve hava sürükleyici toplam bağlayıcının ağırlıkça % 0.09 olarak bütün serilerde kullanılmıştır.

Beton serilerinin 2 tanesi normal agregayla üretilmiştir ve kontrol betonu (şahit numune) amaçlıdır. Bu normal agregayla üretilen betonların birinde 40 kg/m^3 kısa çelik lif kullanılmıştır. Diğer 10 seride ise normal agreganın yerine pomza agregası belirli oranlarda koyularak betonlar hafifleştirilmiştir. Normal agregası, pomza agregası değişimi yapılırken ağırlığın azaltılması ve hacmin değişmemesi hedeflendiğinden, eksiltile normal agregası hacmi kadar su emdirilmiş pomza agregası karışımlara ilave edilmiştir. Pomza kullanılan 10 seriden 4 tanesinde kısa çelik lif, 1 tanesinde uzun çelik lif ve yine 1 tanesinde sentetik lif kullanılmıştır.

Çelik liflerin miktarına karar verirken hem akışkanlık parametreleri hem de dayanım parametreleri dikkate alınmıştır. Hafif betonda 30 ile 50 kg/m^3 çelik kısa lif kullanılması, hafif beton basınç dayanımını artırdığı ve 40 kg/m^3 çelik kısa lifin enerji yutma kapasitesini 1.5 kat artırdığı bazı çalışmalarda bulunan sonuçlar arasındadır (Altun, 2006; Keskiner, 2016). Bir seride de uzun çelik lif kullanılarak sonuçları görülmek istenmiştir.

M-48 lif miktarı, üreten firma tarafından 3 ile 8 kg/m^3 olarak önerildiğinden, yaklaşık 5 kg/m^3 alınmıştır.

Liflerin kullanıldığı serilerde, kullanılan lif hacmi, (4-8) kaba agregası hacmi azaltılarak eklenmiştir.

Aşağıda Çizelge 5.12'de beton karışımlarına ait bileşenlerin hacimce yüzdeleri verilmiş ve çizelgenin altında da ağırlıkça miktarlar verilmiştir.

Çizelge 5.12. Beton karışımlarında kullanılan malzeme hacimce (%)

Seri No	Çim.	Su	Silis	Uçucu Kül	İnce Agrega		Kaba Agrega				Lif	* Süper Akış.
					(0-4) mm		(4-8) mm		(8-16) mm			
					Normal	Pomza	Normal	Pomza	Normal	Pomza		
1	14	18	1.91	3.81	32	-	17.64	-	12.64	-	-	1.09
2	14	18	1.91	3.81	32	-	17.13	-	12.64	-	0.509kl	1.09
3	14	18	1.91	3.81	21.34	10.66	11.76	5.88	8.43	4.21	-	1.09
4	14	18	1.91	3.81	21.34	10.66	11.25	5.88	8.43	4.21	0.509kl	1.09
5	14	18	1.91	3.81	16	16	8.82	8.82	6.32	6.32	-	1.09
6	14	18	1.91	3.81	16	16	8.31	8.82	6.32	6.32	0.509kl	1.09
7	14	18	1.91	3.81	16	16	8.31	8.82	6.32	6.32	0.509ul	1.09
8	14	18	1.91	3.81	8	24	4.41	13.23	3.16	9.48	-	1.09
9	14	18	1.91	3.81	8	24	3.90	13.23	3.16	9.48	0.509kl	1.09
10	14	18	1.91	3.81	-	32	-	17.64	-	12.64	-	1.09
11	14	18	1.91	3.81	-	32	-	17.13	-	12.64	0.509kl	1.09
12	14	18	1.91	3.81	-	32	-	17.08	-	12.64	0.556sl	1.09

* Süper akışkanlaştırıcı %100'lük hacme fazladan toplam bağlayıcının ağırlıkça % 1,09'u olarak eklenmiştir.

Hava Sürükleyici serilere bağlayıcının ağırlıkça % 0.09 oranında eklenmiştir.

Çelik lifler 40 kg/m³ olarak (4mm-8mm) grubu agrega eksiltiilerek eklenmiştir.

M-48 Sentetik lif önerildiği üzere 5 kg/m³ kullanılmıştır.

Liflerin yanında yazan kl (kısa çelik lif), ul (uzun çelik lif) ve sl (sentetik lif) 'tir.

Ağırlıkça oranlar; Çimento 434 kg/m³

Uçucu kül 80 kg/m³

Silis 44 kg/m³

Su 180 kg/m³

1. seri; Kendiliğinden yerleşen normal agregalı beton olarak üretilmiştir. Yukarıda bu beton için karışım oranları hacim olarak verilmiştir ve isimlendirme olarak bu betona **K** serisi denilecektir. K, kendiliğinden yerleşen betonu ifade etmektedir. Kontrol amaçlı üretilmiştir.

2. seri; Kendiliğinden yerleşen normal agregalı beton olarak üretilmiş ve içerisine 40 kg/m³ çelik kısa lif koyulmuştur. Bu seriye isim olarak **Kkl** adı verilmiştir. Burada kl kısa çelik lifi ifade etmektedir.

3. seri; Normal agrega hacmi 1/3 eksiltilmiş ve yerine bu hacmi tamamlayacak kadar su emdirilmiş pomza koyulmuştur. Seriyeye **K2NP** denmiştir. Burada 2N hacimce 2 normal agrega olduğunu P ise yalnızca 1 hacim pomza olduğunu ifade etmektedir.

4. seri; 3. seri agrega oranlarına 40 kg/m³ çelik kısa lif eklenmiştir. İsim olarak **K2NPkl** adı verilmiştir.

5. seri; Hafifleştirilmiş kendiliğinden yerleşen betona, hacimce 1/2 pomza ve 1/2 normal agrega koyulmuştur. Seriyeye **KNP** adı verilmiştir.

6. seri; 5. seriyeye, 40 kg/m³ kısa çelik lif eklenmiştir. Seri **KNPkl** olarak adlandırılmıştır.

7. seri; 5. serinin, 40 kg/m³ uzun çelik lif eklenmiş halidir. İsmi **KNPul**'dir. Burada ul uzun çelik lifi göstermektedir.

8. seri; Toplam agrega hacminin, 1/4'ü normal agrega ve 3/4'ü pomza agregası olacak şekilde karışıma koyulmuştur. Seri **KN3P**'dir.

9. seri; 8. serinin 40 kg/m³ kısa çelik lif içeren halidir. Adı **KN3Pkl** olmuştur.

10. seri; Beton karışımı tamamen pomzayla üretilmiştir. İsim olarak seriyeye **KP** denilecektir.

11. seri; 40 kg/m³ kısa çelik lif içeren, tamamı pomzalı seridir. **KPkl** ile gösterilmiştir.

12. seri; Tamamı pomza olan seriyeye 5 kg/m³ sentetik lif eklenmiştir. Seri **KPsl** olarak adlandırılmıştır. Burada sl ifadesi sentetik lifi göstermektedir.

Aşağıda Çizelge 5.13'te serilerin içerdiği agrega miktarı, lif çeşit ve oranları ve serilere verilen isimler gösterilmiştir.

Çizelge 5.13. Serilerin içerdiği agrega, lifler ve isimlendirme

Seri no	İçerdiği agreganın hacimce oranı	İçerdiği lif hacimce (%)	İsimlendirme
1	% 100 normal agrega	-	K
2	% 100 normal agrega	%0.509 Kısa çelik lif	Kkl
3	%66.7 normal+%33.3 pomza	-	K2NP
4	%66.7 normal+%33.3 pomza	%0.509 Kısa çelik lif	K2NPkl
5	%50 normal+%50 pomza	-	KNP
6	%50 normal+%50 pomza	%0.509 Kısa çelik lif	KNPkl
7	%50 normal+%50 pomza	%0.509 Uzun çelik lif	KNPul
8	%25 normal+%75 pomza	-	KN3P
9	%25 normal+%75 pomza	%0.509 Kısa çelik lif	KN3Pkl
10	% 100 pomza agregası	-	KP
11	% 100 pomza agregası	%0.509 Kısa çelik lif	KPkl
12	% 100 pomza agregası	%0.556 Sentetik lifli	KPsl

5.3. Deneilerin Yapıldığı Laboratuvarlar ve Yapılan Deneiler

Bu çalışmada yapılacak deneylerin büyük bir kısmı Hitit Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Laboratuvarında yapılmıştır. Beton karışımları bu laboratuvarında hazırlanmış ve taze beton deneyleri yapılmıştır. Bu laboratuvarında yapılan taze beton deneyleri; taze beton birim hacim ağırlık, serbest yayılma, J-halkası, L-kutusu ve V-hunisi deneyleridir. Sertleşmiş beton deneylerinden, basınç, eğilmede çekme deneyi ve betonarme kirişçiklerde eğilmede çekme deneyi, yarmada çekme deneyi ve su emme deneyleri yine bu laboratuvar ortamında yapılmıştır. Deneyler EFNARC standartlarına uygun olarak yapılmıştır.

Beton donatı aderansı deneyi Hitit Üniversitesi Bilimsel Teknik Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarlarında (HÜBTÜAM) yapılmıştır.

Beton numunelere ait ultrases geçiş deneyi Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Betonların yangın dayanım deneyleri için numunelerin yüksek sıcaklıklara ulaştırılması, Hitit Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Seramik

Bölümü Laboratuvarında bulunan fırın ile yapılmıştır. Laboratuvarlara ait resimler Şekil 5.3’te verilmiştir.



Şekil 5.3. Laboratuvarlara ait bazı fotoğraflar

5.4. Betonların Hazırlanması

Hesaplamalar (beton tasarımları) ve deneme beton üretimleri sonucunda bulunan karışım miktarları pan tipi 52 dm³ hacim kapasiteli karıştırıcıya koyularak karıştırılmıştır. Pomza agregası kullanılacak serilerde pomzalar su içinde bekletilmiş ve ön emdirilme işlemi uygulanmıştır. Birçok araştırmacı taşıyıcı hafif betonda oluşma ihtimali yüksek olan rötrenin önlenmesi için üretimde kullanılacak hafif agreganın suya doymun olmasını önermişlerdir (Ulus, 2007). Karıştırma aşağıda verilen sıra ile yapılmıştır (Yardımcı, 2007; Kurt, 2009). Karıştırma yapmadan önce karıştırıcı nemlendirilmiştir.

- 1- Karıştırıcıya agrega çeşitleri konulmuş ve 30 saniye süre ile kuru karışım uygulanmıştır.
- 2- Çimento, silis ve uçucu kül de karıştırıcıya eklenmiş 30 saniye ilave karıştırma uygulanmıştır.
- 3- Kimyasal katkı maddelerinin yarısı, karışım suyunun içine boşaltılmış ve bu bileşim de karıştırıcı içerisine koyularak 1.5 dakika daha alet çalıştırılmıştır.
- 4- Kimyasal maddelerin kalan yarısı çok az bir miktar kalan suyla tekrar karışım içine dökülmüş ve yine 1.5 dakika daha karıştırılmıştır.
- 5- İşlemler sonucu karıştırıcı durdurularak, 1 dakika bekletilmiştir.
- 6- Su kasma ve ayrışma kontrollerinden sonra tüm karışım 30 saniye daha karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.
- 7- Lifli serilerde, kimyasalların eklenmesinden sonra, akıcı kıvamda beton elde edilmiş, daha sonra lifler katılmıştır. Lif eklendikten sonra 2 dakika süreyle sürekli karıştırılmıştır.

5.5. Taze Beton Deneyleri

Üretilmiş betonların taze beton yapılarının kendiliğinden yerleşebilirliğini test etmek amacıyla sırasıyla serbest yayılma, J-halkası, V-hunisi ve L-kutusu deneyleri yapılmış ve her beton serisine ait taze birim hacim ağırlıklar ölçülmüştür. Taze beton deneylerinde kullanılacak aletler kullanım öncesi nemlendirilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar taze beton deney sonuçları kısmında verilmiştir.

5.5.1. Taze birim hacim ağırlık

8 dm³ kapasiteli birim hacim ağırlık kabı betonla doldurulmuş ve terazide tartılmıştır. Toplam ağırlıktan kabın darası çıkarılarak net beton ağırlığı bulunmuş ve hacme oranlanarak taze beton birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Aşağıdaki Şekil 5.4'te kullanılan birim hacim ağırlık aleti görülmektedir.



Şekil 5.4. Birim hacim ağırlık deney aleti

5.5.2. Serbest yayılma deneyi

Bu deney için yayılma tablası üzerine Abrams hunisinin koyulacağı yeri gösteren 20 cm çaplı bir daire çizilmiştir ve T_{50} ölçümünü yapabilmek için de 20 cm'lik daireyle aynı merkezli başka bir 50 cm çaplı daire daha çizilmiştir. Beton karıştırıcısında hazırlanan beton herhangi bir sıkıştırma işlemi uygulanmadan huniye doldurulmuş ve bir miktar yerleşme beklendikten sonra huni dik olarak kaldırılmıştır. 50 cm'lik çapa sahip daireye betonun ulaşma süresi kronometre yardımıyla ölçülmüştür. Yayılmanın tamamlanması sonrası, birbirine dik iki doğrultudan yayılma çapı ölçülmüş ve ortalamaları hesaplanmıştır. Şekil 5.5'de serbest yayılma çapı ölçümü gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Serbest yayılma çapı ölçümü

5.5.3. J-halkası deneyi

Bu deney yapılırken, Abrams hunisi çizilen yerine yerleştirilmiş ve bunun etrafına da J-Halkası geçirilmiştir. J-Halkasının koyulacağı yer daha önceden belirlenmiştir. Abrams hunisi sıkıştırma yapmadan beton ile doldurulmuş, yerleşmenin

tamamlanmasından sonra huni kaldırılmıştır. Yayılma bitiminde bloklanma oluşumları, lif kümelenmeleri, halka içi ve dışı yükseklik farkları incelenmiştir. Şekil 5.6'da deney uygulamasına ait bir fotoğraf verilmiştir.



Şekil 5.6. J-halkası deneyi

5.5.4. V-hunisi deneyi

Şekil 5.7'de görülen V-hunisi aletinin boşaltım ağzı 65x65 mm'dir ve huninin alt tarafındadır. V-hunisi aleti sıkıştırma yapılmadan betonla doldurulmuş ve üzeri düzeltilmiştir. Beton hacmi dolu iken alt kapağın açılması ile başlatılan zaman ölçümü, boşalırken alttan ışığın görüldüğü an durdurulmuş ve süre kaydedilmiştir.



Şekil 5.7. V-hunisi aleti ve deneyin uygulaması

5.5.5. L-kutusu deneyi

Bu deney aşağıda Şekil 5.8'de verilen L şeklindeki alet yardımıyla yapılmıştır. Aletin iç yüzeyi nemlendirilip çıkış kapağı kapatıldıktan sonra dikey kol taze betonla,

şışleme yapılmadan doldurulmuş ve yaklaşık 1 dakika betonun yerleşmesi sağlandıktan sonra kapak kaldırılarak betonun donatılar arasından geçip yatay hazneye dolması sağlanmıştır.

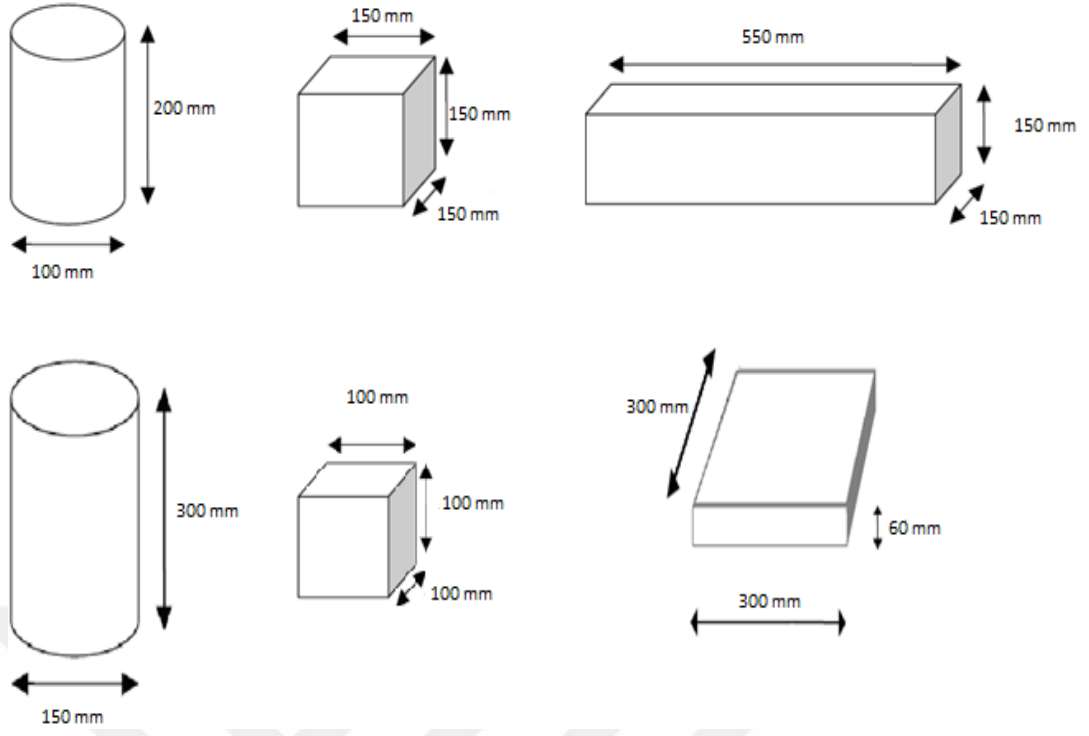
Deney yapılmadan yatay kol üzerinde kapaktan itibaren 200 mm ve 400 mm'lik mesafeler işaretlenmiştir. Kapağın kaldırılmasıyla süre başlatılmış ve betonun bu mesafelere ne kadar sürelerde ulaştığı ölçülmüştür. Akış tamamlandıktan sonra yatay kolun her iki ucundaki beton seviyeleri ölçülerek birbirine oranlanıp, bloklanma oranı bulunmuştur.



Şekil 5.8. L-kutusu aleti ve deneyin uygulanışı

5.6. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneyler

Sertleşmiş beton deneylerinin uygulanabilmesi için 6 farklı geometride numuneler dökülmüştür. Aşağıda Çizelge 5.14'te sertleşmiş beton deneyleri için kullanılan numune geometrisi ve boyutları verilmiştir. Deneyleri yapmak için hazırlanan 3'er adet numune, kalıplardan çıkarılmış ve kür havuzunda bekletilmiştir. 7. ve 28. günlerde numunelere basınç ve çekme deneyleri uygulanmıştır. Numuneler deney yapılmadan önce kür havuzundan çıkarılmış ve hava ortamında bekletilmiştir. Şekil 5.9'da deney numunelerinin şekli ve boyutları verilmiştir ve Şekil 5.10'da da kalıplara yerleştirilmiş ve kür havuzuna koyulmuş bazı numuneler gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Deney numunelerinin şekli ve boyutları



Şekil 5.10. Kalıplara yerleştirilmiş ve kür havuzunda bazı beton numuneler

Çizelge 5.14. Sertleşmiş deney numunelerinin şekli ve boyutları

Sertleşmiş beton deneyi	Beton yaşı (gün)	Numune şekli	Numune boyutları (mm)
Basınç	7 ve 28	Küp	150x150x150
Eğilmede çekme deneyi	7 ve 28	Kiriş	150x150x550
Eğilmede çekme deneyi donatılı	28	Kiriş	150x150x550
Yarmada çekme deneyi	7 ve 28	Silindir	Ø150X300
Yüksek sıcaklık dayanımı	28	Küp	100x100x100
Aderans deneyi	28	Silindir	Ø100X200 (Donatı yerleşik)
Ultrases geçiş hızı deneyi	28	Silindir	Ø150X300
Isı iletkenlik katsayısı	28	Prizma	300x300x60
Ağırlıkça ve hacimce su emme	28	Küp	100x100x100

5.6.1. Basınç dayanımı deneyleri

Toplam 12 seriye ait numunelerde basınç dayanımı deneyi 7. ve 28. günde ve 150x150x150 mm boyutlarındaki küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. Deneylerde basınç değeri ölçümü için Baz marka 3000 kN kapasiteye sahip hidrolik yük kontrollü ve dijital göstergeli otomatik basınç aleti kullanılmıştır. Cihazın yük artırım hızı 180 kgf/s olarak ayarlanmış ve bu durumda numune üzerinde deney hızı 0.23 MPa/s olarak belirlenmiştir. Basınç deneyi sonrasında kırılan numune sonuçları deney föylerine işlenmiş ve bilgisayar ortamında da grafikleri görülmüştür. Şekil 5.11’de beton basınç ve kiriş eğilme deneylerinin yapıldığı birleşik Baz marka alet görülmektedir



Şekil 5.11. Beton basınç ve kiriş eğilme deney aleti

5.6.2. Yarmada çekme dayanımı

Yarmada çekme dayanımında 150 mm çapında ve 300 mm boyunda silindir numuneler kullanılmıştır. Basınç deneyinin yapıldığı hidrolik pres kullanılarak ve aparatlar yardımıyla silindirler üzerinde gerekli çizgisel yük sağlanarak deney yapılmıştır. Deneyde yük artırımı için 90 kgf/s uygun görülmüştür. Bu deney 7 ve 28 günlük numuneler üzerinde uygulanmıştır. Bulunan değerler her bir seri için kaydedilmiştir. Şekil 5.12’de yarma deneyi uygulanmış silindir numunelerden biri görülmektedir.

Yarmada çekme dayanımı aşağıdaki Bağıntı 5.1 yardımıyla hesaplanmıştır (Kurt, 2009)

$$\sigma_{yc} = (2 \cdot P) / (\pi \cdot D \cdot L_s) \quad (5.1)$$

Burada;

σ_{yc} : Yarmada çekme dayanımı (MPa)

P : Kırılma yükü (N)

D : Silindir numune çapı (mm)

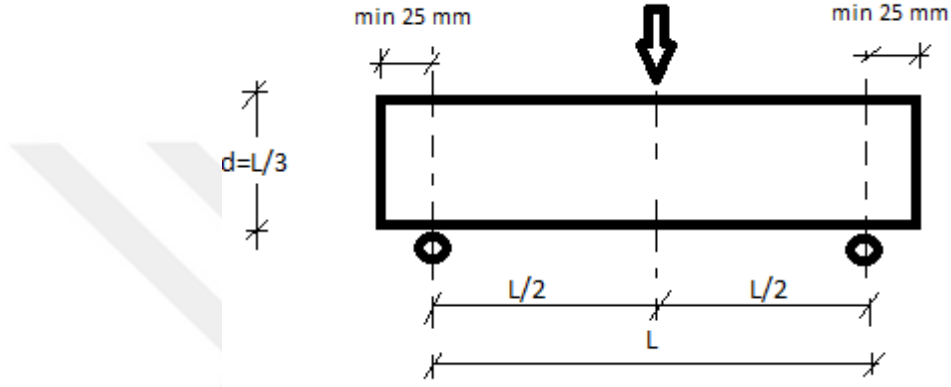
L_s : Silindir numune boyu (mm)



Şekil 5.12. Yarmada çekme deneyi (silindir numune)

5.6.3. Eğilmede çekme dayanımı

Eğilmede çekme dayanım deneyi 150x150x550 mm ebatlarında prizmatik kirişler üzerinde uygulanmıştır. 3 noktalı eğilmede çekme deneyi şeklinde uygulanmıştır. Basınç ve yarmada çekme dayanımı deneylerinde olduğu gibi eğilmede çekme dayanımı değerleri de 7. ve 28. günlerde uygulanmıştır. Şekil 5.13’de kirişe ait deney geometrisi verilmiş ve eğilmede çekme dayanımı deneyi uygulaması da Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Prizmatik kirişe ait deney geometrisi

Eğilmede çekme dayanımı aşağıda Bağntı 5.2 yardımıyla hesaplanmıştır (Yardımcı, 2007).

$$\sigma_{ec} = (3 \cdot P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot d^2) \quad (5.2)$$

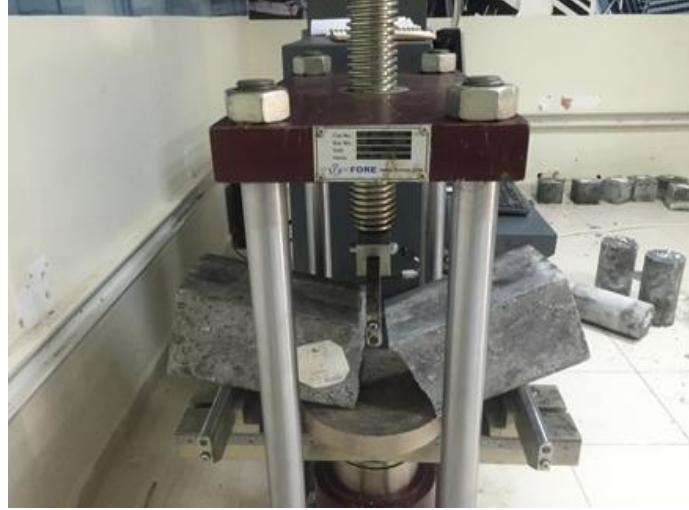
σ_{ec} : Eğilmede çekme dayanımı (MPa)

P : Kırılma yükü (N)

L : Mesnetler arası kiriş uzunluğu (mm) (L=450 mm olarak uygulanmıştır.)

d : Kiriş kesiti yüksekliği (mm)

b : Kiriş kesiti eni (mm)

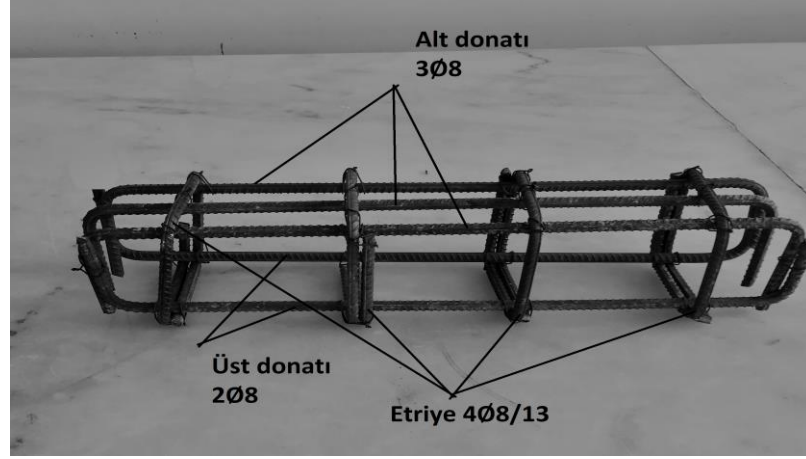


Şekil 5.14. Prizmatik kiriş üzerinde eğilmede çekme deneyi

5.6.4. Betonarme kiriş numunelerin eğilmede çekme dayanımları

Prizmatik 150x150x550 mm ebatlarında kirişlere aşağıda Şekil 5.15’de fotoğrafları verilen S420 sınıfı inşaat çeliği koyulmuş ve 3 noktalı eğilmede çekme deneyi uygulanmıştır. 28 günlük kirişlere ait en büyük kırılma yük değerleri bulunmuştur. Bu deney, beton prizmatik kirişlere uygulanan eğilmede çekme deneyinde anlatıldığı şekilde uygulanmış ve geometrisi aynı kirişler üzerinde bulunan en büyük kırılma yükü değerleri elde edilmiştir.

Deney küçük kirişlerde hem donatının farklı beton serileri üzerinde olan etkisini, hem de donatı ve lifin birlikte oluşturduğu etkiyi görmek üzere yapılmıştır. Bu kirişlerde donatı yerleşiminde paspayı 10 mm olarak seçilmiştir. Donatı yerleşiminde, üretilen serilerin basınç dayanımları farklı olduğu için, bütün serilerin birbiriyle daha kolay kıyaslanması bakımından aynı oranda ve maksimum, minimum donatı oranlarına uygun esas donatılar, çekme bölgesine yerleştirilmiştir. Basınç bölgesine de konstrüktif olarak donatılar koyulmuştur. Şekil 5.16’da da bu deney numunelerinin üretimine ait bir fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Prizmatik küçük kiriş içerisinde donatı düzeni



Şekil 5.16. Betonarme küçük kirişlerin laboratuvar ortamında üretimi

5.6.5. Beton-donatı aderans deneyi

Aderans dayanımı ve kenetlenme boyları için birçok deney türü üretilmiştir. Çekip çıkarma deneyi, itip çıkarma deneyi, geliştirilmiş çekip çıkarma deneyi, eksantrik çekip çıkarma deneyi, uç uca çekme deneyi, ek çubuklu uç uca çekme deneyi ve tek deney çubuklu çekme deneyi bunlardandır. Ayrıca kiriş numunelere uygulanan; bureau deneyi, teksas deneyi, standart belçika mafsallı kiriş deneyi ve kiriş çatlama deneyi bu aderans deneylerinin diğer türleridir. Aderans deneyleri içinde en eski, yaygın ve pratik olanı aksenal çekip çıkarma deneyidir (Tanyıldızı, 2006).

Bu çalışmada, karşılaştırma yaparak daha doğru fikirler elde etmek amacıyla numuneler üzerine literatürde daha sık karşılaşılan aksenal çekip çıkarma deneyi uygulanmıştır. Bu deneyin numuneleri, çapı 100 mm olan ve boyu 200 mm olan silindir şeklindedir. Taze beton halinde 400 mm uzunluğundaki Ø12'lik inşaat çeliğinin bu numunelere 150 mm girmesi sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler kür havuzunda bekletilmiş ve 28. günde deney yapılmıştır. Bu deney için özel bir aparat yaptırılmış ve şekil 5.17'de gösterilmiştir. Hitit Üniversitesi HÜBTÜAM laboratuvarında bulunan Zwick/Roell Z330RED marka donatı çekme aletiyle, donatının betondan ayrılma kuvveti belirlenmiş ve aderans gerilmesi hesaplanmıştır. Bu aletin maksimum donatı çekme kuvveti 330 kN'dur ve deneylerde çekme hızı 2 mm/dakika olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu deneye ait numune resmi, deney aleti ve deney çalışması yine Şekil 5.17' de gösterilmiştir.

Aderans gerilmesi aşağıda gösterilen Bağntı 5.3 yardımıyla hesaplanmıştır (Coşkun vd, 2006).

$$\tau = F_k / (\pi \cdot \phi \cdot l) \quad (5.3)$$

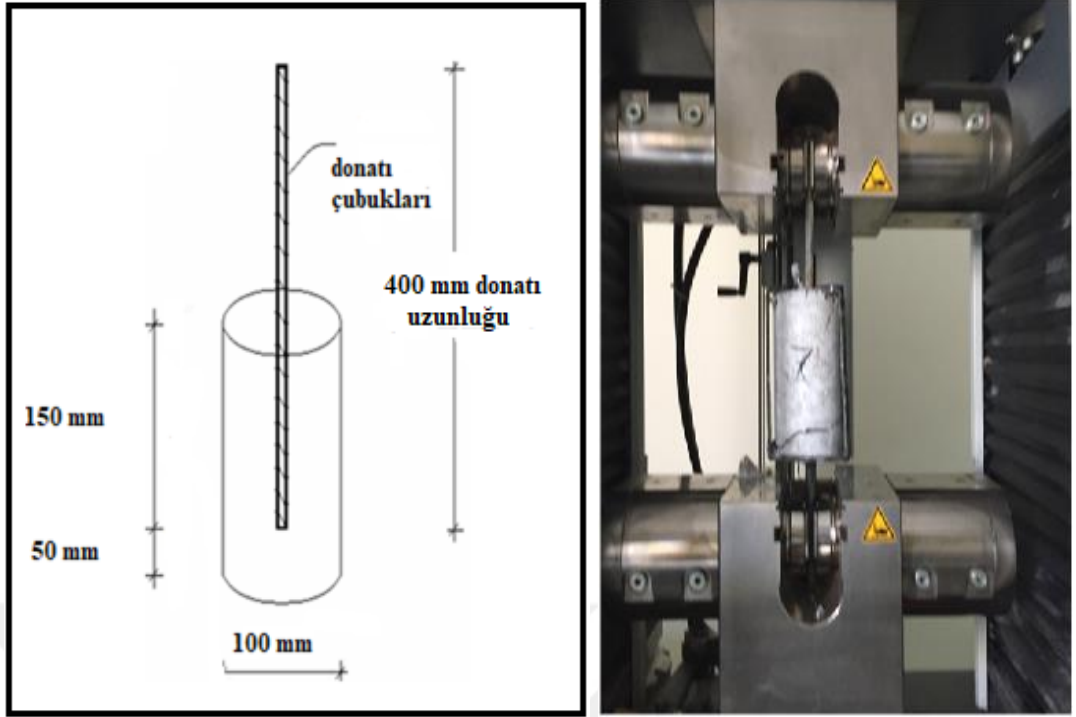
Bu formülde kullanılan ifadeler;

T : Aderans gerilmesi (MPa)

F_k : Aderans kuvveti (N)

ϕ : Donatı çapı (mm)

l : Aderans boyu (Beton içinde kalan boy) (mm)



Şekil 5.17. Beton-donatı aderans deneyine ait resimler

Amerika Beton Enstitüsü (ACI), değişik beton karışımlarının aderans dayanımlarını karşılaştırabilmek için normalleştirilmiş aderans dayanımı kavramını ortaya çıkarmıştır (ACI 318, 2002). ACI'ya göre aderans dayanımı, betonun basınç dayanımının kareköküyle orantılıdır ve Normalleştirilmiş aderans dayanımını elde etmek için, bulunan aderans dayanımı, beton basınç dayanımının kareköküne bölünür.

$$\tau_{nz} = \tau / \sqrt{f'_c} \quad (5.4)$$

τ_{nz} : Normalleştirilmiş aderans gerilmesi (MPa)

τ : Aderans gerilmesi (MPa)

f'_c : Beton basınç dayanımı (MPa)

Çalışmalarda genel olarak aderans gerilmesi kullanılmakta ise de, bazı yeni çalışmalarda normalleştirilmiş aderans dayanımı kavramına da rastlanmaktadır (Sancak vd, 2011; Hossain, 2007; Al Shannag ve Charif, 2017).

5.6.6. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emme oranları

Numunelerin ağırlıkça ve hacimce su emme deneyleri yapılırken, numuneler (20±5) °C sıcaklıkta bekletildikten sonra, plastik bir kür tankı içerisine su emmesi için bırakılmıştır. 100x100x100 mm boyutlarındaki küp numuneler, kür tankı içindeki içilebilir ve yüksekliği numune yüksekliğinin 50 mm üzerinde olan suyun içinde kalacak şekilde 30'ar mm arayla yerleştirilmiştir. Kür tankı içerisinde 3 gün bekletilen numuneler, her 24 saatte tartılmış ve iki tartım arasındaki ağırlık farkı %0.1'den daha düşük olunca, sabit doygun kütleye ulaştığı kabul edilmiştir. Her tartım öncesi nemli bezle numuneler üzerindeki fazla su alınmıştır. Suya doygun hale gelen numuneler tartılmış ve ağırlıkları kaydedilmiştir. Numuneler etüv içerisinde 20'şer mm arayla koyulmuş ve hava dolaşımı bu etüv ile (105±5) °C sıcaklıkta 3 gün kurutulmuştur. Kurutma sırasında her 24 saat arayla yapılan tartımlarda ağırlıkça farkın % 0.1'den daha düşük olduğu durumlarda sabit ağırlığa ulaştığı ve kurutma işleminin yeterli olduğu kabul edilmiştir. Tartma işlemlerinden önce numuneler, oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Aşağıda Bağıntı 5.5 ile yüzde olarak ağırlıkça su emme değeri ve Bağıntı 5.6 ile yüzde olarak hacimce su emme değeri hesaplanmıştır.

$$W_a = \frac{M_1 - M}{M} \cdot 100 \quad (5.5)$$

$$W_h = \frac{M_1 - M}{V} \cdot 100 \quad (5.6)$$

Burada;

W_a : Ağırlıkça su emme (%)

M_1 : Suya doygun numune ağırlığı (g)

M : Etüv kurusu ağırlığı (g)

W_h : Hacimce su emme (%)

V : Numune hacmini (cm^3) göstermektedir.

5.6.7. Beton serilerinin yüksek sıcaklık dayanımları

Beton serilerine ait numuneler, 20, 200, 500 ve 900 °C sıcaklıklarda deneye tabi tutulmuşlardır. Bu deney için üretilen 100x100x100 mm boyutlu küp numunelere, 200 °C sıcaklık deneyi etüv kullanılarak uygulanmıştır ve 200 °C'ye ulaşan sıcaklıkta, numuneler 2 saat bekletilmişlerdir. 500 ve 900 °C için kullanılacak numuneler 105 °C'de 24 saatten az olmamak koşuluyla önce yine etüv içerisinde kurutulmuşlar ve oda sıcaklığına ulaştıktan sonra ısınma hızı 6 °C/dakika olan 1200 °C maksimum sıcaklığa ulaşabilen laboratuvar tipi fırın içine koyularak hedeflenen ısılarla çıkarılmışlardır. 105 °C'de etüvde kurutulma nedeni, numuneleri sabit ağırlığa getirmek olmayıp, nemli olan numunelerin deney sırasında patlayarak fırına zarar vermesini önlemektir (Hızal, 2010). Numuneler istenen sıcaklığa ulaştınca 2 saat bu sıcaklıkta bekletilmiş ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Deneye tabi tutulan numuneler tartılarak ağırlık kayıpları kaydedilmiş ve beton pres aletinde basınç dayanımları ölçülmüştür. Şekil 5.18'de deneyde kullanılan fırın görülmektedir.



Şekil 5.18. Deneyde kullanılan fırın

5.6.8. Beton serilerinin ultrases ölçümleri

Ultrases geçiş hızı deneyi Ø150x300 mm boyutlarında üretilmiş silindir numunelere, Ondokuz Mayıs Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında bulunan Tıco marka cihazla yapılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Genel olarak malzemelerde yoğunluğun fazla olması dayanımı, ses ve ısı geçişini artıran etkiye sahiptir. Tahribatsız bir deney olan Ultrases geçiş deneyi, betonun dayanımı ve içyapısı hakkında bilgi veren bir deneydir. Bu deney yüzey pürüzlülüğü, numune nem durumu, donatı varlığı ve beton çatlakları gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Bu yüzden deney tecrübeli ve dikkatli operatörlerle yapılmalıdır (Long vd, 2001).

Deney ASTM C 597’ye uygun olarak yapılmıştır. Alete ultrases gönderen ve alan uçlar takıldıktan sonra bu uçlara jel sürülmüş ve cihazda mevcut aparatla kalibrasyon okumaları yapılmıştır. Daha sonra numunelerin yan yüzeylerine jel sürülmüş geçiş süreleri mikrosaniye biriminde elde edilmiştir. Aşağıda verilen Bağıntı 5.7 yardımıyla ultrases geçiş hızları bulunmuştur.

$$U=L_x/t \quad (5.7)$$

Bu bağıntıda;

U : Ultrases geçiş hızını (km/s)

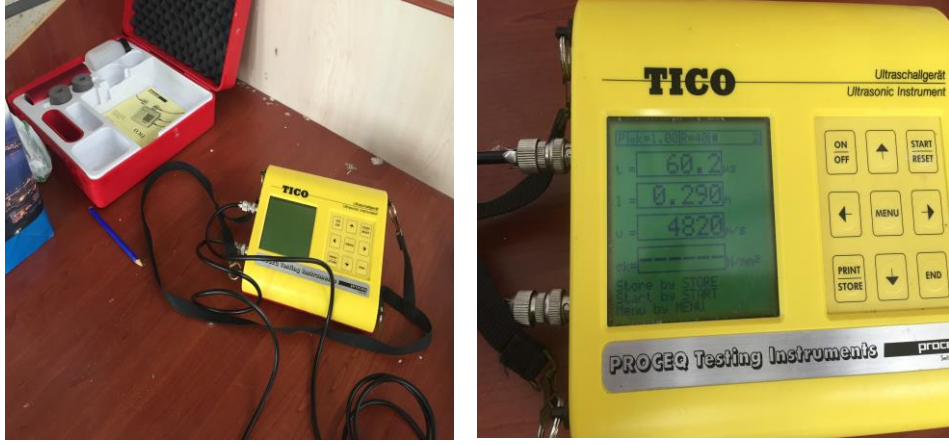
L_x : Numunede dalga gönderilen yüzeyler arası mesafe (mm)

t : Ultra ses geçiş süresi (μ s)’dir.

Whitehurst yoğunlukları 2400 kg/m³ civarı olan betonlar üzerinde deneysel bazı çalışmalar yapmış ve ultrases dalga hızı ölçülen betonların kalitesini aşağıda Çizelge 5.15’de olduğu gibi belirlemiştir (Erdoğan, 2003).

Çizelge 5.15. Ultrases hızıyla beton kalitesi arasındaki ilişki

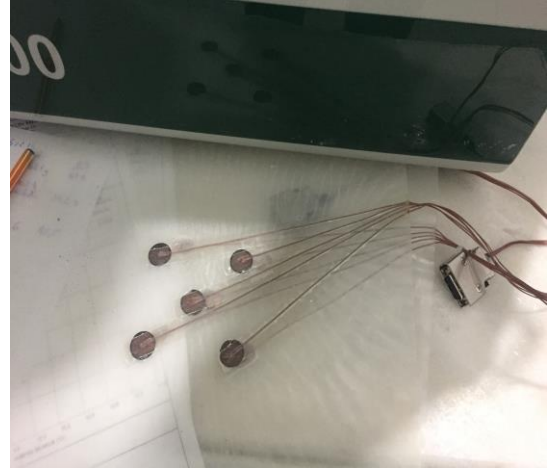
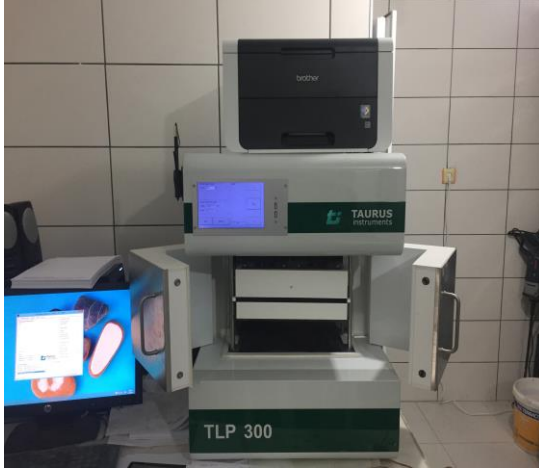
Ultrases hızı (m/s)	Beton kalitesi
>4500	Mükemmel
3500-4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
<2000	Çok zayıf



Şekil 5.19. Ultrases deney aleti

5.6.9. Beton serilerinin ısı iletkenlik katsayıları

Homojen bir malzeme için ısı iletkenliği, denge durumunda iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkının $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğunda, birim zamanda (1 saat), birim alanından (1 m^2) ve bu alana dik doğrultuda, birim kalınlığından (1 m) geçen ısı miktarıdır diye tanımlanır ve birimi W/mK 'dir (Taşdemir, 2003). Genel olarak birim ağırlığı küçük olan malzemelerin ısı iletkenlikleri düşüktür. Deney, $300 \times 300 \times 60$ mm boyutlarındaki prizma numunelere TS EN 12664 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneyde kullanılacak numunelerin yüzeylerinin düzgün olması gerekmektedir ve bu yüzden pürüzlü yüzeyleri zımparalanmıştır. Taurus TLP 300 DTX-1 marka ısı iletkenlik ölçüm cihazı kullanılarak numunelerin ısı iletkenlik katsayıları bulunmuştur. Yüzeyler arasında oluşturulan ısı farkının geçişi sayesinde malzemeler için ısı iletkenlik katsayıları belirlenmektedir. Şekil 5.20'de deney için kullanılan cihaz ve bu cihazın numuneye alttan ve üstten bağlanan plakaları görülmektedir.



Şekil 5.20. Isı iletkenlik için kullanılan alet ve numuneye bağlanan kablolar ve numuneler



6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneylelerden elde edilen sonuçlar, bu bölümde taze beton deneyleri ve sertleşmiş beton deneyleri olmak üzere iki bölümde incelenmiş ve sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilmiştir.

6.1. Taze Beton Üzerinde Yapılan Deney Sonuçları

Yapılan taze beton deneylerine ait, deney gözlemleri ve sonuçları bu bölümde başlıklar halinde verilmiştir.

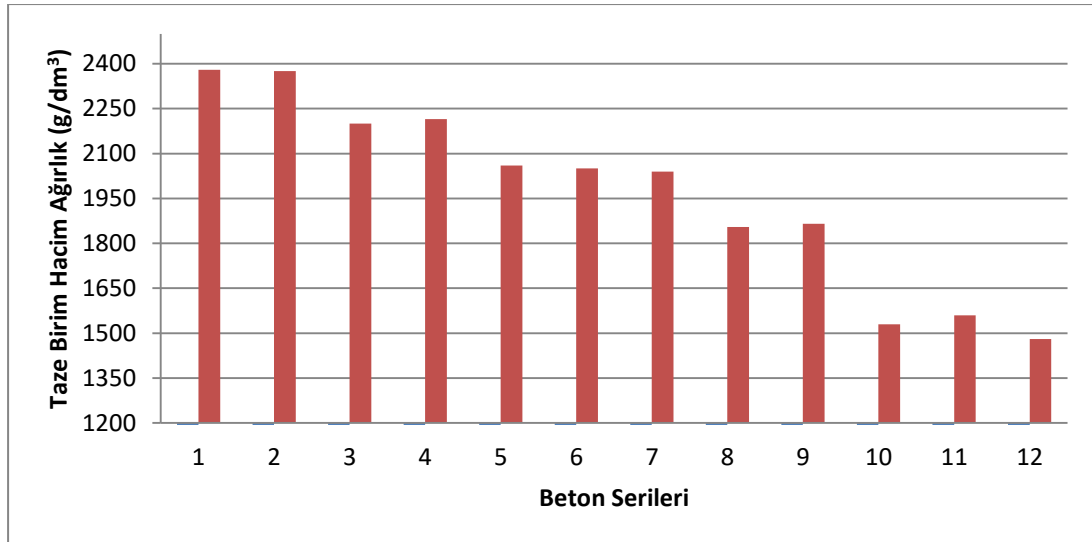
6.1.1. Taze beton birim hacim ağırlığı

12 seri beton üzerinde taze beton birim hacim ağırlık ölçümü yapılmıştır. En büyük birim hacim ağırlıklar kontrol serileri olan 1. seri (K) ve 2. seri (Kkl) betonlarından elde edilmiştir. Karışımlara eklenen pomza agregası miktarı arttıkça beklenen bir sonuç olarak birim hacim ağırlıklar azalmıştır. En düşük ağırlık 12. seriden (KPs1) yani tamamı pomza agregalı ve sentetik lifli seride ölçülmüştür. Mevcut karışım içerisinde sentetik liflerin iyi yayılmadığı, topaklanmalara ve büyük boşluklara neden olduğu görülmüştür. Sentetik liflerin yoğunluklarının düşüklüğü aynı hacme fazla miktarda lif girmesine, karışım içerisinde liflerin yüzey alanlarının artıp, liflerin tutuculuğunun artmasına ve akış özelliklerinin bozulup, boşluklu bir yapı sergilemelerine neden olmaktadır. Tamamı pomzalı ancak kısa çelik lifli 11. serinin (KPkl) ağırlığı, hem sentetik lifli seriden hem de tamamı pomzalı lifsiz 10. seriden (KP) daha fazladır. Yoğunluğu fazla olan betonlarda genel olarak çelik lif katılmasının az da olsa birim hacim ağırlıkları azalttığı ve yoğunluğu düşük olan betonlarda ise çelik lif eklenmesinin az da olsa taze birim hacim ağırlıkları artırdığı görülmüştür. Buna neden olarak yoğunluğu fazla olan betonlarda eklenen liflerin boşluğa neden olması, yoğunluğu düşük olan betonlarda ise boşluğu doldurması gösterilebilir. Ayrıca dikkat çeken bir nokta da yarı yarıya normal ve pomza agregası kullanılan serilerden kısa çelik lif kullanılan 6. serinin (KNPkl) taze birim hacim ağırlığı, uzun çelik lif kullanılan 7. seriden (KNPul) daha fazla olmasıdır. Buna neden olarak, lif uzunluğunun beton boşluğunu artırması düşünülmektedir.

Beton serilerine ait taze birim hacim ağırlık ölçümleri Çizelge 6.1’de verilmiş ve Şekil 6.1’de grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Taze betonların ölçülen birim hacim ağırlıkları

Beton seri no (İsimlendirme)	Taze birim hacim ağırlık (g/dm ³)
1 (K)	2380
2 (Kkl)	2375
3 (K2NP)	2200
4 (K2NPkl)	2215
5 (KNP)	2060
6 (KNPkl)	2050
7 (KNPuI)	2040
8 (KN3P)	1855
9 (KN3Pkl)	1865
10 (KP)	1530
11 (KPkl)	1560
12 (KPsI)	1480



Şekil 6.1. Serilerin taze birim hacim ağırlık değişimi

6.1.2. Taze beton serilerinin serbest yayılma deneyleri ve T₅₀ süreleri

Toplam 12 beton serisinin tamamında serbest yayılma deneyi yapılmış ve T₅₀ süreleri ölçülmüştür.

Deneylerde beton serilerine pomza agregasının eklenmesinin, yani beton birim ağırlığının azalmasının serbest yayılma çapını düşürdüğü görülmüştür. Kontrol betonu seri 1'de (K), 750 mm olan yayılma çapı, pomza agregasının beton içerisinde artmasına bağlı olarak azalmıştır. Tamamı pomza agregası ile üretilen serilerden olan; seri 10 (KP), seri 11 (KPkl) ve seri 12 (KPsl) en düşük serbest yayılma çaplarına sahip serilerdir. Buradan betonun akış parametrelerinin kendi ağırlığına bağlı olduğu ve normal bir betonun ağırlığının azaldığı durumlarda, yayılmanın da azaldığı görülmüştür.

Kendiliğinden yerleşen betonlara lif eklenmesi serbest yayılma çapını düşürmektedir. Lifsiz kendiliğinden yerleşen seri 1 (K) betonunda 750 mm olan yayılma çapı, kısa çelik lifli kontrol betonu seri 2'de (Kkl), 710 mm'ye düşmüştür. Bütün serilerde lif eklenmesinin yayılma çapını düşürdüğü, yalnızca tamamı pomzalı kısa çelik lifli seri 11'de (KPkl), yayılmanın aynı kaldığı görülmüştür. Bu seride hafifleşen ve yayılımı düşen serinin, kısa çelik lifin ağırlığı sayesinde aynı yayılıma ulaştığı düşünülmektedir. En kötü serbest yayılma değeri seri 12 (KPsl) yani tamamı pomzalı olan ve sentetik lifli beton serisinden elde edilmiştir. Sentetik liflerin karışımında hem hafiflikleri hem de yüzey alanlarının fazlalığı nedeniyle oluşan tutuculuk özelliği serbest yayılmayı düşürmüştür.

Kısa ve uzun çelik lif kullanılan aynı karışımlı beton serileri, seri 6 (KNPkl) ve seri 7 (KNPul) kıyaslandığında, kısa çelik lifli serinin 660 mm, uzun çelik lifli serinin ise 650 mm yayıldığı görülmüştür. Çelik lif kullanılan serilerde, çelik lif uzunluğunun artmasının da serbest yayılmayı az da olsa engellediği (azalttığı) görülmüştür. Karışımlarda lif kullanılması durumunda, serbest yayılmada dairesel görüntünün de bozulduğu görülmektedir.

Beton serilerinin T₅₀ sürelerine bakıldığında, karışıma giren pomza miktarının artmasıyla sürenin azaldığı görülmektedir. Aslında su emdirilmiş pomza agregasının varlığı 500 mm'lik dairesel çapa varma süresinin kısalmasında önemli bir yere sahiptir. Çünkü agrega yüzeyinde oluşan sulu tabaka, hareketi hızlandırmakta ancak kaybolan ağırlık sebebiyle ani duruşlar sergilemektedir. En düşük T₅₀ süresi seri 10

(KP) yani tamamı pomza ile hazırlanmış beton serisinden ölçülmüştür. En yüksek süre değeri ise kısa lifli kontrol betonu seri 2’de (Kkl) ölçülmüştür. Pomzalı serilerde yayılma hızlı olmakta ve ani durmalar yaşanmaktadır. Oysa kontrol betonu seri 1’in (K), yayılması ve durması daha düzenlidir.

Bütün serilerde lif eklenmesinin T_{50} süresini artırdığı görülmektedir. Karışım içerisinde lifler hareketi yavaşlatıcı etkiye sahiptir ve özellikle çelik lifler ağırlıkları nedeniyle T_{50} sürelerini artırmıştır. Aynı karışımlı kısa ve uzun çelik lif kullanılan serilerden seri 6 (KNPkl) yani kısa lifli seri, uzun lifli seri 7’den (KNPul) daha az sürede (daha hızlı) 500 mm’lik çapa ulaşmıştır. Çelik liflerde lif boyunun artması T_{50} süresini artırmıştır. Sentetik lifli tamamı pomzalı seri yani seri 12’nin (KPl), T_{50} süresinin, tamamı pomzalı lifsiz seriden çok yüksek olmadığı çünkü hafif olan sentetik liflerin süreyi daha az etkilediği görülmüştür. Betonlar hafifleştikçe yani içindeki pomza agregası arttıkça, ağırlığı fazla olan çelik liflerin hareketi daha fazla yavaşlattığı görülmektedir.

EFNARC (2002)’de kendiliğinden yerleşen betonlar için serbest yayılma deneyinde belirlenen ortalama çapın 650 mm ile 800 mm değerleri arasında ve T_{50} sürelerinin de 2 ile 5 saniye arasında olması istenmektedir. 2005 yılında bir proje kapsamında çıkarılan kendiliğinden yerleşen betonlar için Avrupa Kuralları (The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2005) adlı yayında serbest yayılma çaplarına göre kendiliğinden yerleşen betonlar SF1 (550-650 mm) , SF2 (660-750 mm) ve SF3 (760–850 mm) olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

Şekil 6.2’de bu çalışmada yapılan deneylere ait bir fotoğraf gösterilmiş ve Çizelge 6.2’de de 12 seriye ait serbest yayılma değerleri ve T_{50} süreleri verilmiştir.

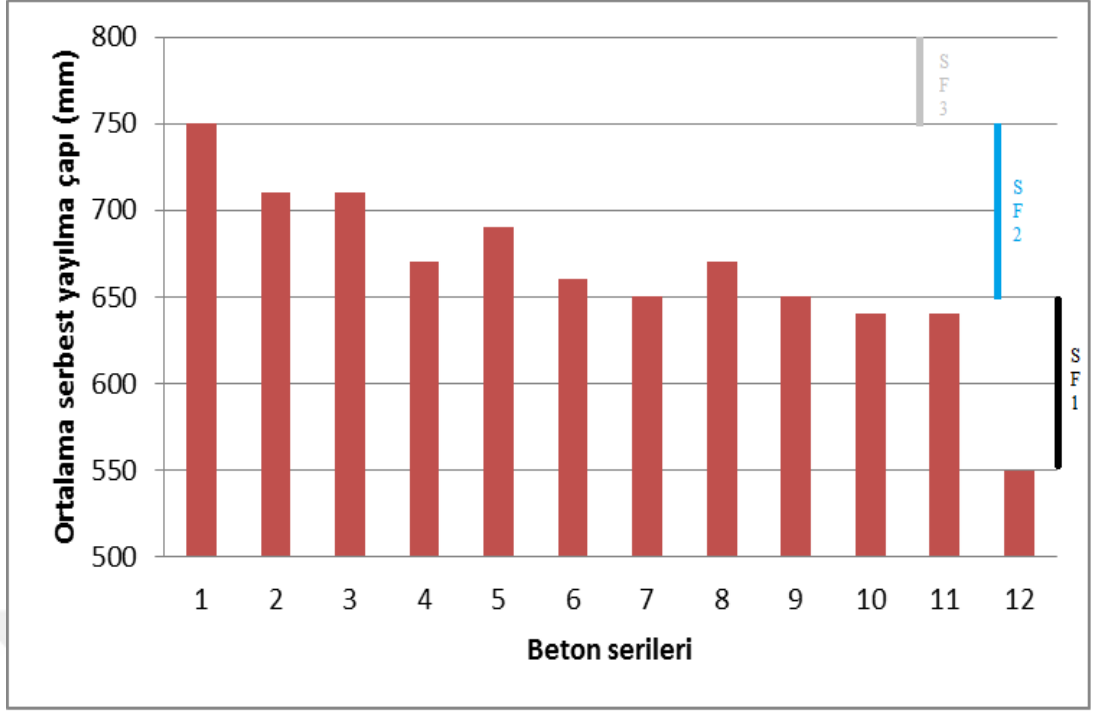
Çizelge 6.2. Beton serilerinin ortalama serbest yayılma değerleri ve T₅₀ süreleri

Beton seri no (İsimlendirme)	Ortalama serbest yayılma çapı (mm)	T ₅₀ süreleri (s)
1 (K)	750	2.21
2 (Kkl)	710	3.20
3 (K2NP)	710	2.04
4 (K2NPkl)	670	2.94
5 (KNP)	690	1.85
6 (KNPkl)	660	2.60
7 (KNPul)	650	2.80
8 (KN3P)	670	1.56
9 (KN3Pkl)	650	2.86
10 (KP)	640	1.38
11 (KPkl)	640	2.95
12 (KPsI)	550	1.49

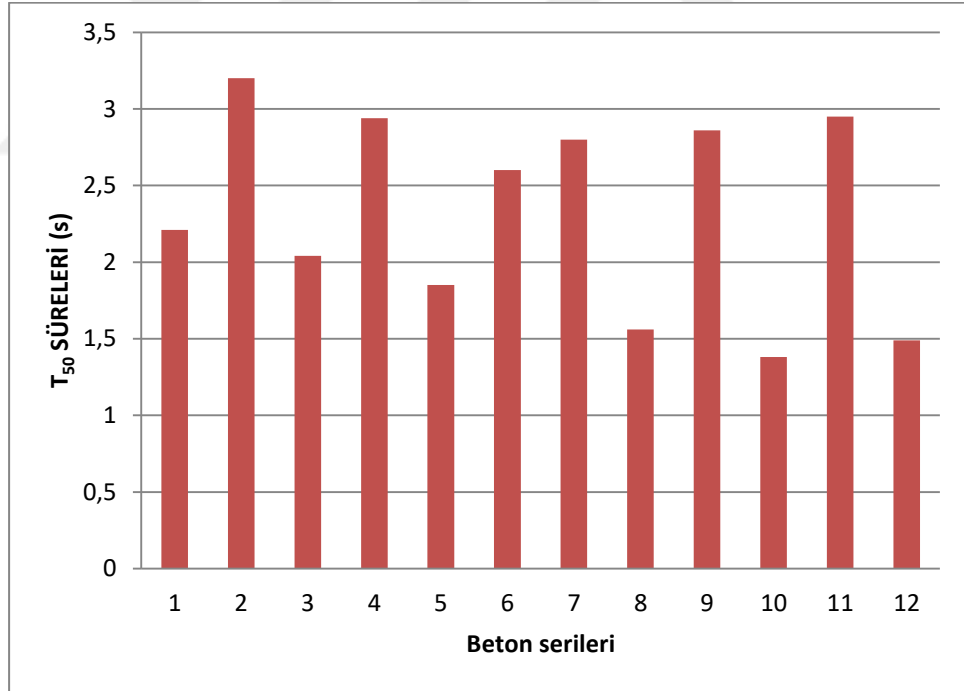


Şekil 6.2. Yapılmış bir serbest yayılma deneyi

Şekil 6.3’de serilerin serbest yayılma çapı ve Şekil 6.4’de de T₅₀ süreleri grafik halinde verilmiştir.

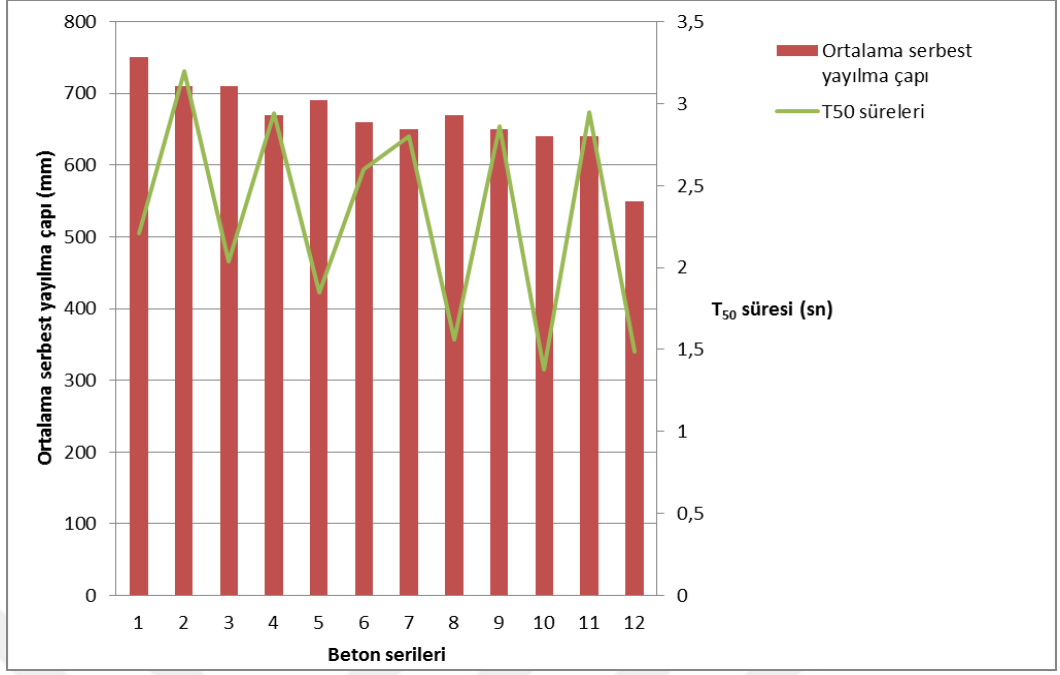


Şekil 6.3. Beton serilerine ait ortalama serbest yayılma çapı



Şekil 6.4. Serilere ait T₅₀ süreleri

Şekil 6.5’de ise serbest yayılma ile T₅₀ süreleri birbiriyle ilişkilendirilmiştir.



Şekil 6.5. Serilere ait serbest yayılma çapı T₅₀ süresi değişimi

6.1.3. Taze beton serilerinin J-halkası sonuçları

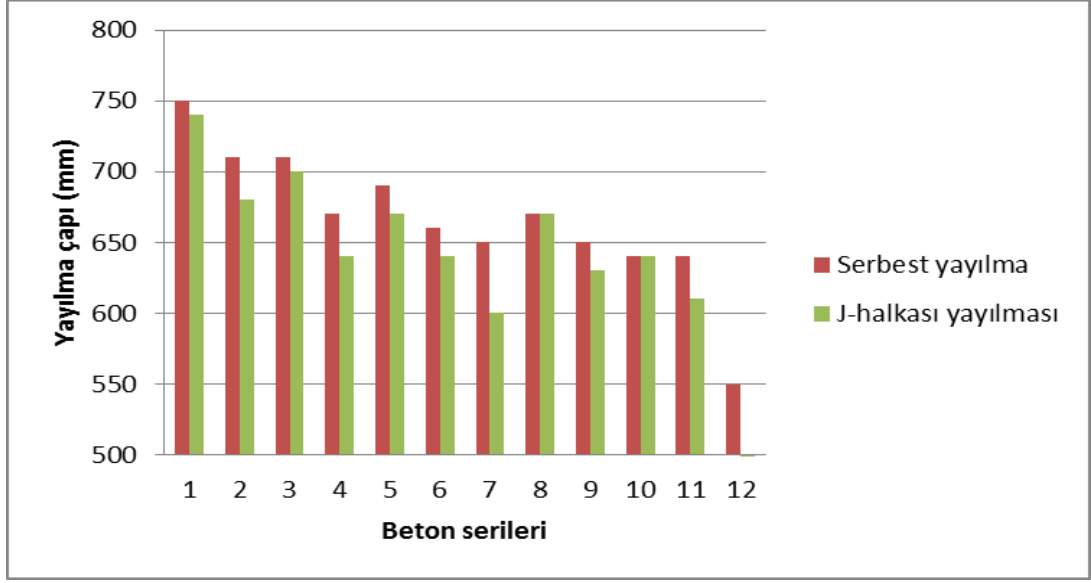
J-halkası deneyi ile kendiliğinden yerleşen betonların donatılar arasından geçişi ölçülmektedir. J-halkası üzerinde bulunan donatılar beton yayılmasını engellemekte ve J-halkası çemberinin içinde kalan beton ile dışına çıkan beton yüksekliği arasında farklar oluşmaktadır.

EFNARC (2002)'ye göre, 300 mm çaplı bir J-halkası için betonda iç ve dış yükseklik farkı 10 mm'den çok olursa bu bloklanma göstergesidir. Çizelge 6.3'de 12 seri için yapılan J-halkası deneyi sonuçları gösterilmektedir.

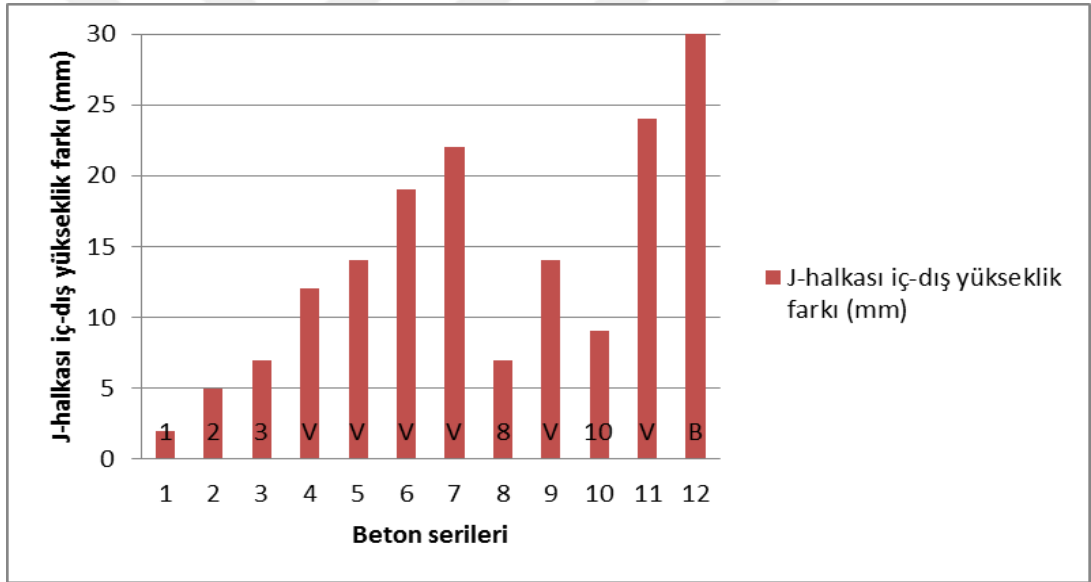
Çizelge 6.3. J-halkası çember iç-dış beton yükseklik farkları ve bloklanma

Beton seri no (İsimlendirme)	Ortalama J-halkası yayılma çapı (mm)	J-halkası çember içi ve dışı yükseklik farkı (mm)	Bloklanma
1 (K)	740	2	Yok
2 (Kkl)	680	5	Yok
3 (K2NP)	700	7	Yok
4 (K2NPkl)	640	12	Var
5 (KNP)	670	14	Var
6 (KNPkl)	640	19	Var
7 (KNPul)	600	22	Var
8 (KN3P)	670	7	Yok
9 (KN3Pkl)	630	14	Var
10 (KP)	640	9	Yok
11 (KPkl)	610	24	Var
12 (KPsI)	-	-	Var

Şekil 6.6’da serilere ait Serbest yayılma ve J-halkası sonuçları birlikte verilmiş ve Şekil 6.7’de de beton serilerinin J-halkası iç-dış yükseklik farkları verilmiştir. Şekil 6.7’de J-halkası dışına çıkmayan seri 12 (KPsI), tamamen bloklandığı için “B” ile gösterilmiş, iç-dış farkı sınır değeri 10 mm’yi aşan serilerde, bloklanma olduğunu göstermek için “V” ile işaretlenerek gösterilmiştir. Sınır değeri aşmayan seriler kendi seri değerleriyle (seri no şeklinde) ifade edilmiştir.



Şekil 6.6. Beton serilerinin Serbest yayılma ve J-halkası değerleri



Şekil 6.7. Beton serilerin J-halkası iç-dış yükseklik farkı

Deneyler sonucunda lif kullanılmayan serilerden, seri 1 (K) ve seri 3 (K2NP) için J-halkasını kullanmak serbest yayılma çapını sadece 10 mm azaltmıştır. Pomza oranının yarı yarıya ulaştığı 5. seride (KNP), 20 mm'lik bir kayıp oluşmuştur. Lifsiz ama pomza oranı artan serilerde yani seri 8 (KN3P) ve seri 10 (KP) için herhangi bir kayıp oluşmamıştır. Pomza ve normal agreganın eşit kullanıldığı seride 20 mm'lik kayıp, farklı ağırlığa sahip agreganın birbirini daha fazla engellemesiyle açıklanabilir. Lifsiz beş serinin ölçülen iç-dış farkı bakımından yine en büyük değer 5. seride (KNP) oluşmuştur ve yalnızca bu serinin bloklanma değeri 10 mm'in

üzerinde kalmıştır. En az iç-dış farkı kontrol serisinde yani seri 1’de (K) ölçülmüştür. Seri 3 (K2NP) ve seri 8 (KN3P) için bloklanma 7 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç olarak bir beton karışımında normal veya pomza agregasının fazla olması durumunda yayılmanın benzer değerler aldığını göstermiştir, yani eşit olan pomza ve normal agrega durumunda normal agrega pomzayı engelleyebilmektedir. Seri 10’da (KP), tamamı pomza olduğundan, beton ağırlığı azalmış ve bu yüzden 10 mm’lik bir iç-dış farkı ölçülmüştür.

Lif kullanılan seriler, lif kullanılmayan serilere göre çok daha fazla yayılma kaybına uğramaktadır. Bunun nedeni kullanılan liflerin donatılar arasından geçmeyi zorlaştırmalarıdır. Lifli serilerden kısa çelik lifin ve normal agreganın kullanıldığı seri 2 (Kkl), serbest yayılmaya göre 30 mm’lik bir yayılma kaybına uğrasa da, kısa liflerin normal agrega içerisinde iyi hapsolmesinden dolayı iç-dış farkı 5 mm olmuş ve sınır değer altında kalmıştır. Bunun dışındaki bütün lifli serilerin iç-dış farklarının 10 mm’den fazla olduğu görülmektedir. Seri 4 (K2NPkl) ve seri 11 (KPkl) için yine 30 mm’lik yayılma kaybı oluşmuş, ancak tamamı pomzalı ve kısa lifli seride 24 mm’lik iç-dış farkı ölçülmüştür. Yine tamamı pomza agregasıyla üretilmiş ve içerisinde sentetik lif kullanılmış 12. serinin (KPl), zaten iyi olmayan serbest yayılma değeri, J-halkası kullanılmasıyla tamamen halka içinde bloklanmaya neden olmuş ve hiç dışarı çıkamamıştır. Uzun, hafif olan sentetik liflerin beton içinde artan aderansı ve tutuculuğu bu tıkanıklığa neden olmaktadır. Seri 7 (KNPul), 50 mm’lik bir yayılma çapı kaybına uğramış ve 22 mm’lik bir iç-dış farkı sergilemiştir. Bunun nedeni uzun çelik liflerin yayılmayı daha fazla engellemesi ve donatılar arasında daha fazla bloklanmasıdır. Seri 6 (KNPkl) ve seri 9 (KN3Pkl)’da sadece 20 mm olan yayılma kaybı, zaten düşük serbest yayılmaya sahip olmaları ile açıklanabilir.

J-halkası deneyinde çelik lifli seriler dairesel olarak yayılmamış, bazı kısımlarda daha fazla lif tıkanması oluşmuştur. Buradan, çelik lifler için lif boyu ve miktarının, J-halkası deneyi için büyük olumsuzluklar ortaya çıkardığı söylenebilir. Ayrıca agregaya göre daha yoğun olan çelik liflerin, normal agregayla daha uyumlu çalıştığı söylenebilir. Sentetik lifler hafifliği, uzunluğu ve beton içerisinde yaptığı güçlü aderansı nedeniyle yayılmayı kötüleştirmektedir.

6.1.4. Taze beton serilerinin V-hunisi deneyi sonuçları

V-hunisi deneyi, EFNARC (2005)'te kendiliğinden yerleşen betonlar için viskoziteyi ölçmek için yapılan bir deneydir ve bu deney lifsiz betonlar için uygundur. V-hunisi deneyi için uygun süreler 6 ile 12 saniye arasında olmalıdır. Aşağıda Çizelge 6.4'de 12 seri için ölçülen V-hunisi süreleri verilmiştir.

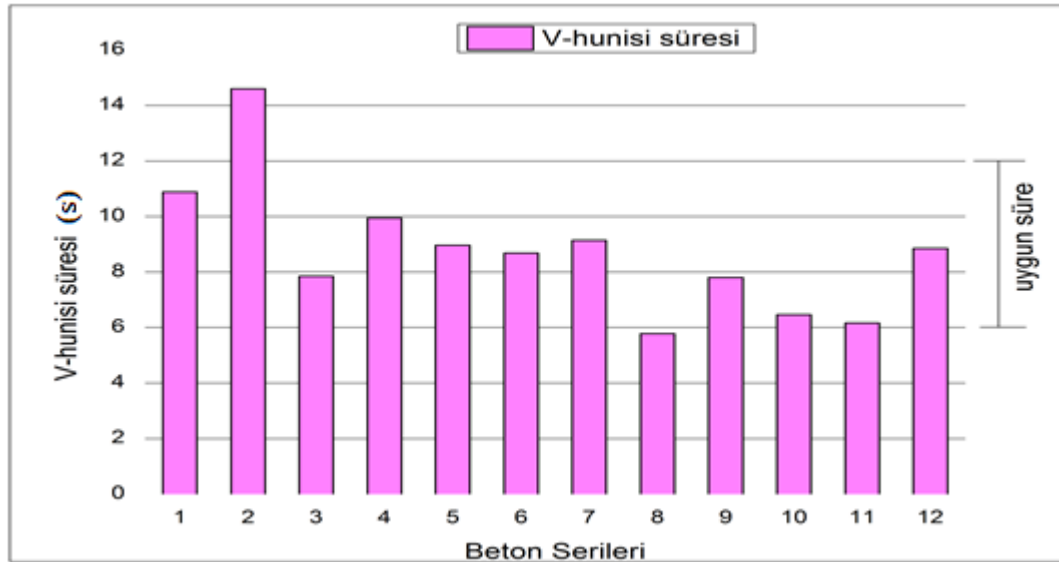
Çizelge 6.4. Beton serileri için ölçülen V-hunisi değerleri

Beton seri no (İsmlendirme)	V-hunisi süresi (s)
1 (K)	10.88
2 (Kkl)	14.60
3 (K2NP)	7.85
4 (K2NPkl)	9.95
5 (KNP)	8.96
6 (KNPkl)	8.68
7 (KNPul)	9.14
8 (KN3P)	5.78
9 (KN3Pkl)	7.80
10 (KP)	6.46
11 (KPkl)	6.16
12 (KPs1)	8.85

Kontrol betonu için ölçülen 10.88 saniye süre, kısa lifin karışıma katılmasıyla 14.60 saniye ile en yüksek değere çıkmış ve 12 saniyelik sınır değerinin üzerinde kalmıştır. Serilere pomza karıştırılmasıyla, hem karışıma giren su miktarının biraz artmış olması ve hem de V-hunisine yerleşim sırasında normal agreganın aşağıya ve pomzanın yukarıya yönelmesinin bir miktar ayrışma oluşturması akış hızını artırmıştır. Karışımda pomza miktarı arttıkça genel olarak V-hunisi süresi azalmıştır. 8. seri (KN3P) yani 1 hacim normal, 3 hacim pomza içeren seri en hızlı boşalan seri olmuş ve sınır değer olan 6 saniyenin altına düşmüştür. Bu serinin tamamı pomzalı seri 10. seriden (KP) bile düşük çıkması az miktarda olan ağır agreganın huni altına yönelip, akışı hızlandırmasıyla açıklanabilir.

Karışımlara lif eklenmesi genel olarak V-hunisi sürelerini artırmıştır, ancak tamamı pomza olan seriye yani 11. seriye (KPkl) kısa lif eklenmesi yine yoğunluğu fazla olan liflerin V-hunisinin altına doğru yönlenmesiyle akış süresini, lifsiz seriye göre azaltmıştır. Buna benzer durum 6. seri (KNPkl), yani yarısı pomza ve yarısı normal agrega olan seride de görülmüş ve lifsiz seriye göre süre bir miktar azalmıştır. Bunun dışında uzun çelik lifin kullanıldığı seri 7’de de (KNPul) süre bir miktar lifsiz seriye göre yüksektir, çünkü 65 mm olan huni çıkış ucu için bu 60 mm olan lif boyutu biraz uzun kalmaktadır. Tamamı pomzalı seride sentetik lifin kullanıldığı 12. serinin (KPs1) akış süresi, lifsiz pomzalı seri 10’a (KP) göre fazla artış göstermiştir, çünkü sentetik lifler akışı engellemiş ve süreyi artırmıştır.

Normal agregalı betonlarda lif kullanılması durumunda sürenin, kabul edilebilir sınırlar dışına çıktığı görülmüştür. Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda da normal agregayla üretilen kendiliğinden yerleşen betonlara özellikle uzun çelik lif veya sentetik liflerin eklenmesinin süreyi uzattığı veya tıkanmalara yol açtığı görülmüştür (Yardımcı, 2007). Bu yüzden genel olarak lifli betonlar için uygun olmayan V-hunisi deneyi, pomza katılan serilerde sınır değerler içinde kalmış ve uygun sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6.8’de V-hunisi değerleri grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 6.8. Beton serilerin V-hunisi boşalma süresi

6.1.5. Taze beton serilerinin L-kutusu deney sonuçları

L-kutusu deneyi, EFNARC (2005)’e göre üç tane donatı arasından, kendiliğinden

yerleşen betonların geçiş yeteneğinin ölçüldüğü bir deneştir. Lifsiz betonlar için kullanılan bu deney, çalışmada hem lifsiz hem de lifli seriler için uygulanmıştır. Bloklanma oranı $H_2/H_1 \geq 0.80$ olduğunda bloklanma riskinin olmadığı kabul edilir. L-kutusu deneyinde kullanılan beton karışımı suya benzer kıvamda olursa bloklanma oranı 1 çıkar. Ayrıca deney sırasında akış hızları T_{200} (s) ve T_{400} (s) süreleri de ölçülmüş ve Çizelge 6.5’de bu değerler verilmiştir. L-kutusu deneyi ve J-halkası deneyi, kendiliğinden yerleşen betonların donatılar arasından geçiş özelliğini ve sürelerini değerlendiren deneylerdir. L-kutusu deneyi, J-halkası deneyinden hem kabın oluşturduğu sürtünme yüzeyi hem de kabın koluna betonu yerleştirirken oluşabilecek ayrışma riskleri bakımından farklılık gösterir.

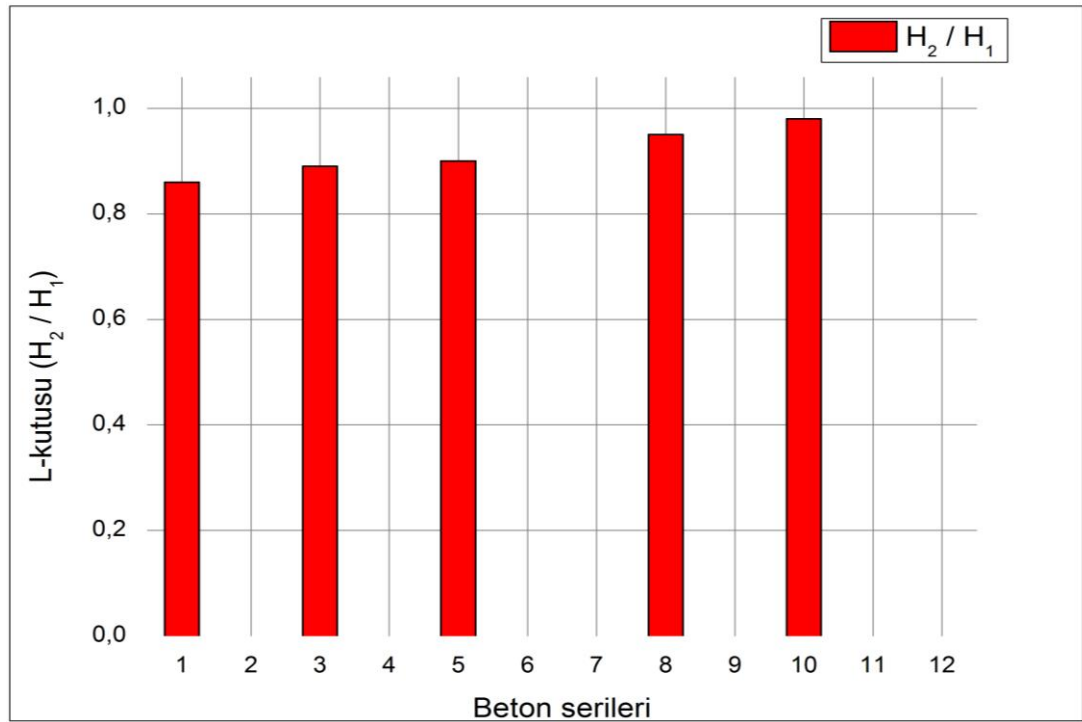
Çizelge 6.5. Beton serileri için ölçülen L-kutusu değerleri

Beton seri no (İsmlendirme)	L- kutusu			
	T_{200} (s)	T_{400} (s)	H_2/H_1	Bloklanma
1 (K)	1.32	3.22	0.86	Yok
2 (Kkl)	-	-	-	Var
3 (K2NP)	1.24	3.08	0.89	Yok
4 (K2NPkl)	-	-	-	Var
5 (KNP)	0.92	5.72	0.90	Yok
6 (KNPkl)	-	-	-	Var
7 (KNPul)	-	-	-	Var
8 (KN3P)	0.94	1.72	0.95	Yok
9 (KN3Pkl)	-	-	-	Var
10 (KP)	0.88	1.26	0.98	Yok
11 (KPkl)	-	-	-	Var
12 (KPl)	-	-	-	Var

Yapılan deneylerde, serilerde pomza agregasının oranı arttıkça karışımda H_2/H_1 oranı yükselmiş ve tamamı pomza olan serilerde bu oran 0.98 olmuştur. Bunun nedeni olarak pomzayla karışıma giren su miktarının pomza agregasının etrafında oluşan sürtünme etkisini azaltması ve pomzanın hafif olması gösterilebilir. İlave

olarak akış süreleri T_{200} için azalmıştır. 5. seride (KNP), pomzalı kısım T_{200} süresini kısaltmıştır, ancak yarısı normal agrega olan bu seride iki agrega tipi birbirini engelleyerek T_{400} süresini artırmıştır. Normal agreganın fazla olduğu serilerde pomzanın etkisi kısıtlı kalmış ve hem T_{200} hem de T_{400} süreleri artmıştır. Pomza agregasının arttığı serilerde de, normal agreganın yavaşlatıcı etkisi kısıtlı olmuş ve T_{200} ve T_{400} süreleri düşük çıkmıştır.

Lif kullanılan serilerin tamamında bloklanma oluşmuştur. 60 mm uzunluğunda çelik lif kullanılan 7. seri (KNPul) ve 48 mm uzunluğunda sentetik lif kullanılan 12. seri (KPsI), L-kutusu deneyinde donatılar arası mesafenin 41 mm olması nedeniyle doğal olarak bloklanmıştır. Ancak 30 mm uzunluğunda çelik lif kullanılan serilerde de gerek liflerin donatılar arası sıkışması, gerek pomza, normal agrega ve lif ayrışmaları, tıkanmaların nedeni olmuştur. Lifli seriler için bu deney uygun sonuçlar vermemiştir. Aşağıda Şekil 6.9'da L-kutusu değerleri grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.9. Bloklanmayan beton serilerin L-kutusu H_2/H_1 sonuçları

6.2. Sertleşmiş Beton Üzerine Yapılan Deneylerin Sonuçları

Sertleşmiş beton özellikleri 9 ana başlık altında araştırılmıştır. Sertleşmiş beton serileri üzerine yapılan deneyler aşağıda sırasıyla açıklanmış ve birbirleriyle olan

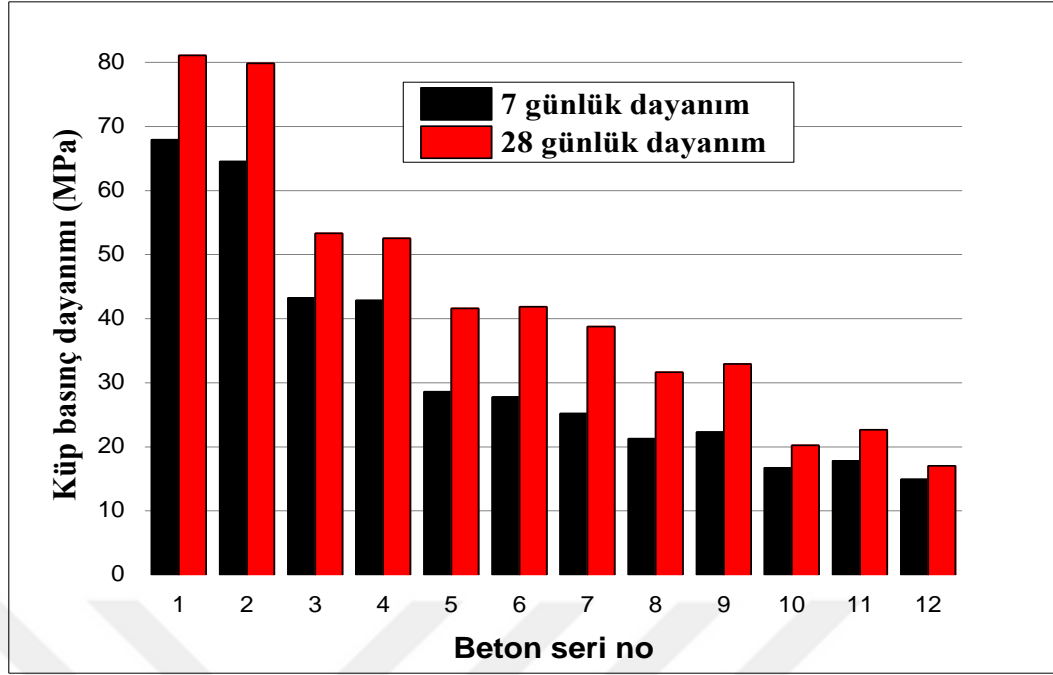
ilişkileri ortaya koyulmaya çalışılmıştır.

6.2.1. Basınç dayanımı deney sonuçları

Toplam 12 farklı beton serisi üzerinde 7. ve 28. günlerde basınç deneyleri yapılmıştır. Deneyler 150x150x150 mm boyutlarında hazırlanmış küp numunelere uygulanmıştır. Deneylerden 6 saat önce kür havuzlarından çıkarılan numunelerin basınç dayanımları hem 7. hem de 28. gün için bulunmuş ve Çizelge 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.10'da ise bu dayanım değerleri grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.6. Beton serilerinin 7. ve 28. gün basınç dayanımları

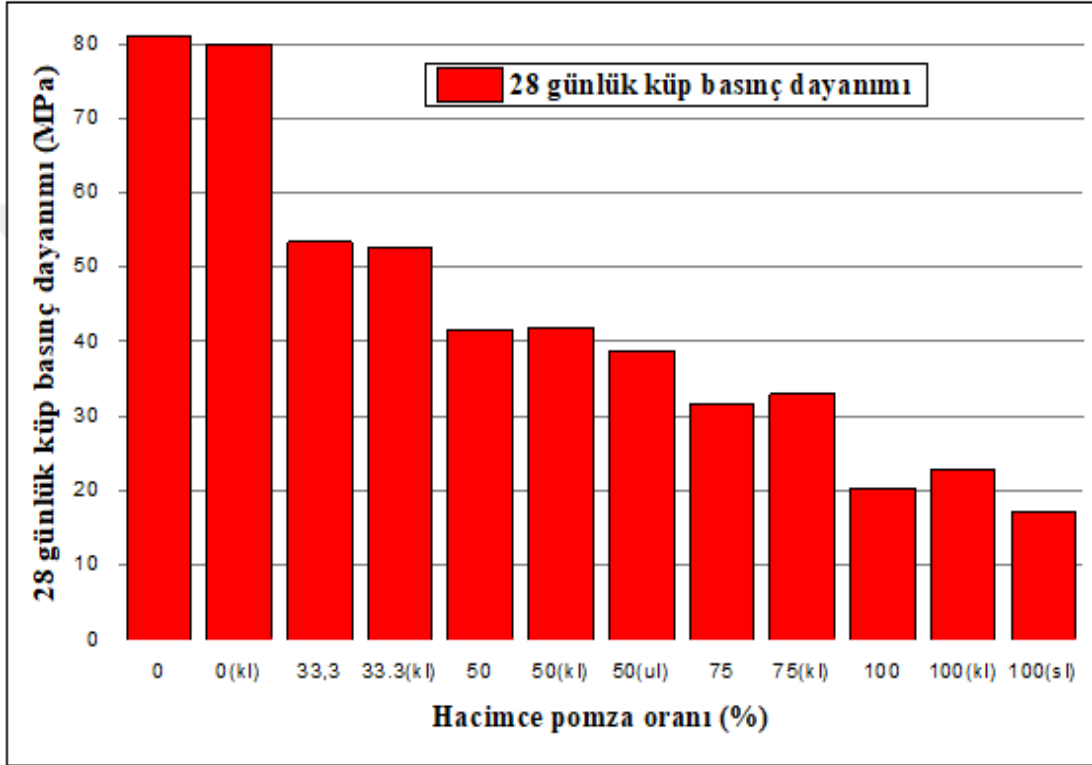
Beton seri no (İsmlendirme)	Kuru birim hacim ağırlık (g/dm ³)	7 günlük küp basınç dayanımı (MPa)	28 günlük küp basınç dayanımı (MPa)
1 (K)	2352	67.96	81.12
2 (Kkl)	2338	64.52	79.88
3 (K2NP)	2117	43.24	53.32
4 (K2NPkl)	2132	42.83	52.56
5 (KNP)	1951	28.58	41.59
6 (KNPkl)	1953	27.79	41.89
7 (KNPul)	1946	25.21	38.77
8 (KN3P)	1747	21.25	31.66
9 (KN3Pkl)	1765	22.29	32.92
10 (KP)	1369	16.74	20.24
11 (KPkl)	1414	17.82	22.67
12 (KPs1)	1312	14.93	17.04



Şekil 6.10. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük küp basınç dayanımları

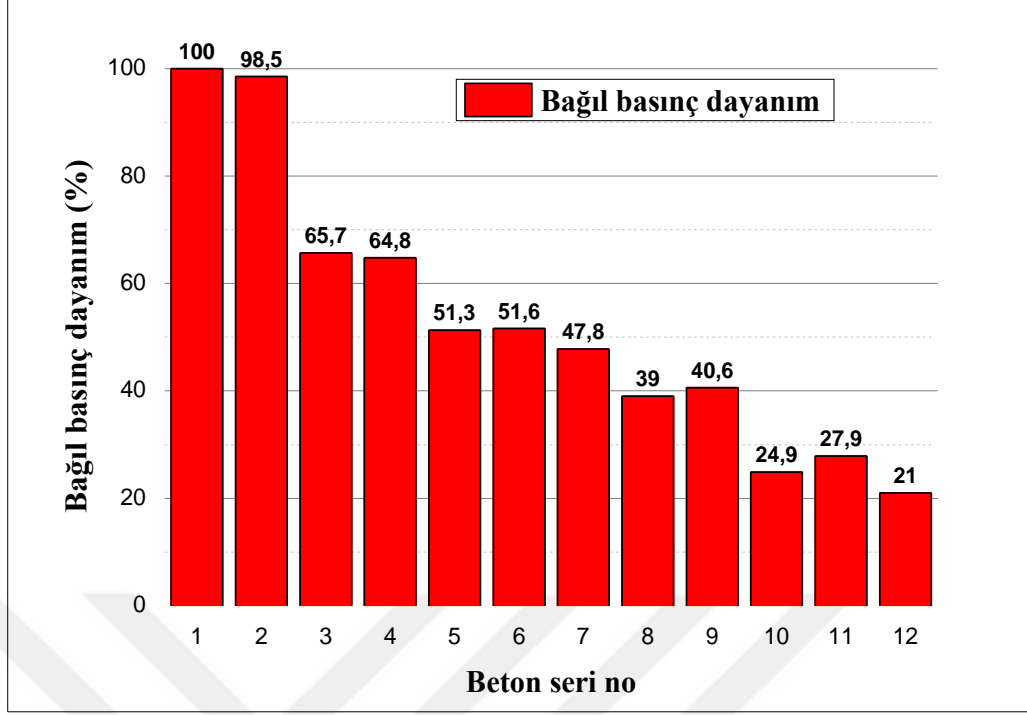
Deney sonuçlarına göre, 1. seriye (K) göre bu serinin kısa çelik lifli üretilmiş hali 2. serinin (Kkl) basınç dayanımlarının hem 7 hem de 28 günlük değerlerinin bir miktar azalmış olduğu görülmektedir. Yani basınç dayanımı yüksek olan betonlar için, karışıma katılan kısa çelik liflerin basınç dayanımını azalttığı görülmektedir. Bu azalma bir miktar düşüş gösterse de, 3. seri (K2NP) ve 4. seri (K2NPkl) için de aynı durum geçerlidir. Pomza eklenerek hafifleştirilen beton dayanımlarının, beklentiler doğrultusunda azaldığı görülmektedir. Pomzanın normal agreganın hacimce üçte bir oranında koyularak, beton ağırlığının yaklaşık $150-200 \text{ kg/m}^3$ azaltıldığı 3. seri (K2NP) ve 4. seri (K2NPkl) için beton dayanımlarının, normal agregalı seriler; 1. seri (K) ve 2. seriye (Kkl) göre dayanım kayıplarının fazla olduğu görülmektedir. 5. seri (KNP) ve 6. seri (KNPkl) için, yani pomza ve normal agreganın hacim olarak yarı yarıya katıldığı serilerde kısa çelik liflerin olumsuz etkisinin ortadan kalktığı görülmektedir. 7. seri (KNPul) yani uzun çelik lifin kullanıldığı seride hem 7 hem de 28 günlük basınç dayanımının değeri 5. seri (KNP) ve 6. serinin (KNPkl) belirgin olarak altındadır. Uzun lifler basınç dayanımını kısa liflerden daha fazla azaltmıştır. Pomza hacminin, normal agreganın hacminin üç katı koyulduğu 8. seri (KN3P) ve bu serinin kısa liflisi olan 9. serinin (KN3Pkl) basınç dayanımları kontrol edildiğinde, 9. seride 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının kısa lif sayesinde arttığı görülmüştür. Tamamı pomza olan 10. seriye (KP) göre 11. seri (KPkl) yani tamamı pomzalı kısa

çelik lifli serinin basınç dayanımının önemli bir biçimde arttığı da gözlenebilir. Tamamı pomzalı ve sentetik lif katılarak üretilmiş 12. serinin (KPs1) 7 ve 28 günlük basınç dayanımları hem lifsiz 10. seri hem de kısa çelik lifli 11. seriden oldukça düşüktür. Çünkü sentetik lifler betonun akışkanlık özelliklerinin bozulmasına, aynı zamanda topaklanmalara neden olmuştur ve bu yüzden beton daha boşluklu bir yapı sergilemiştir. Şekil 6.11’de beton serilerinin hacimce pomza oranına göre 28 günlük basınç dayanımı grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.11. Serilerin hacimce pomza oranına göre 28 günlük basınç dayanımı

Aşağıda Şekil 6.12’de gösterilen grafikte, 1. serinin (K) 28 günlük basınç dayanımının %100 kabul edilmesi durumunda, diğer 11 serinin 28 günlük basınç dayanımlarının bağıl yüzdeleri verilmiştir.

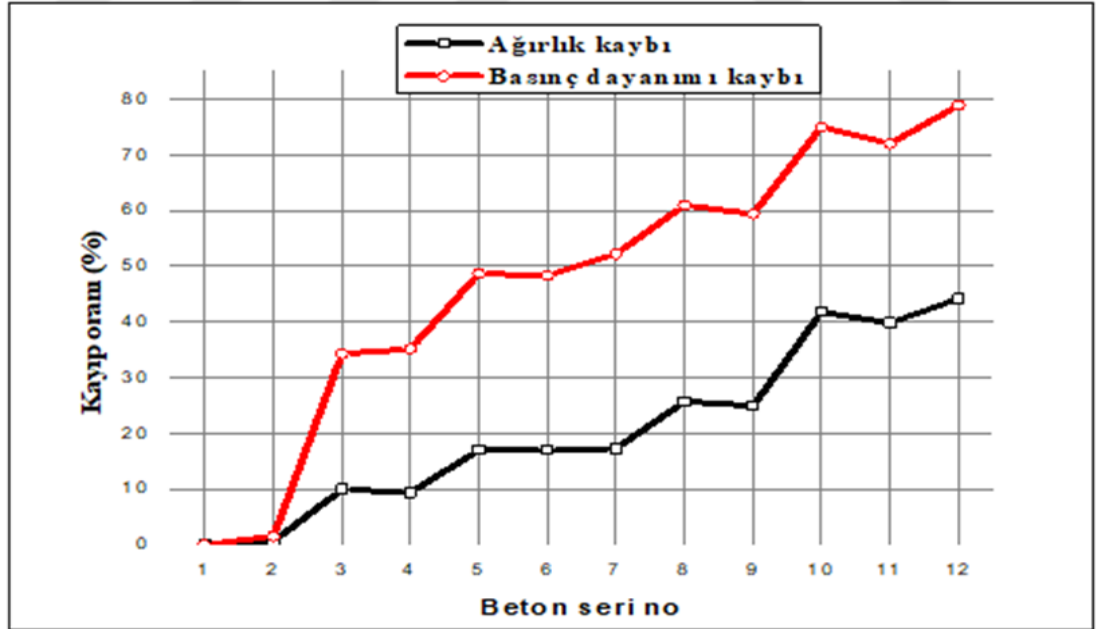


Şekil 6.12. 1 nolu kontrol betonu dayanımı %100 kabul edildiğinde diğer serilerin yüzde dayanımları (28 günlük dayanım için)

Ağırlığın pomza eklenerek azaltılması durumunda 28 günlük basınç dayanımında oluşan kayıplar, 1. seri (K) ağırlığı ve basınç dayanımı esas alındığında aşağıda Çizelge 6.7’de gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 6.13’te bu tabloya ait grafik oluşturulmuştur.

Çizelge 6.7. Serilerin ağırlık kaybı ile 28 günlük basınç dayanım kaybı ilişkisi (1.seri (K) esas alınarak)

Beton seri no (İsmlendirme)	Basınç dayanım kaybı (%)	Ağırlık kaybı (%)
1 (K)	0	0
2 (Kkl)	1.53	0.60
3 (K2NP)	34.27	10
4 (K2NPkl)	35.21	9.35
5 (KNP)	48.73	17.05
6 (KNPkl)	48.36	16.96
7 (KNPul)	52.21	17.26
8 (KN3P)	60.97	25.73
9 (KN3Pkl)	59.42	24.96
10 (KP)	75.05	41.79
11 (KPkl)	72.05	39.88
12 (KPl)	78.99	44.22



Şekil 6.13. Serilerin 28 günlük basınç kayıpları ile ağırlık kayıpları ilişkisi (1 nolu (K) serisi kontrol betonu esas alınarak)

Şekil 6.13'te 1 nolu (K) kontrol betonunun dayanım ve ağırlığı %100 kabul edildiğinde, beton serilerine az pomza agregası eklendiğinde bile dayanımdaki kayıpların dikkat çekici olduğu görülür. 3 nolu (K2NP) serisi toplam normal agreganın hacimce 1/3 oranında pomzayla değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu durumda dayanım kaybı yaklaşık %35 olmuştur. Bir başka ifadeyle ağırlığın yaklaşık %10 azalması durumunda dayanımdaki kayıp yaklaşık %35'tir.

İlk pomza eklemesi yapılan 3 nolu seride oluşan ilgi çekici dayanım azalmasından sonra, ağırlık kaybına paralel gelişen bir basınç kaybı gözlenmektedir. Tamamı pomza olan 10 nolu (KP) serinin basınç dayanımı kaybı ise yaklaşık olarak %75, ağırlık kaybı ise yaklaşık %42'dir.

Çizelge 6.7'de basınç dayanım kaybı farkları incelenirse, kısa çelik liflerin eklendiği serilerde basınç dayanımlarını %0.37 ile %3 arasında değişen değerlerde artırmış veya azaltmış olduğu görülmektedir. Kısa çelik lifler en fazla normal agregalı beton serisinin basınç dayanımını %1.53 olarak azaltmış, en fazla basınç dayanımını da tamamı pomzalı seride %3 olarak artırmıştır. Kısa çelik lifler en az yarı yarıya pomza ve normal agregaya içeren seriye etki etmiş ve sadece %0.37 artış sağlamıştır.

Uzun çelik lif, yarı yarıya pomza ve normal agregaya içeren seride lifsiz benzerine göre %3.48 oranında basınç dayanımını azaltmıştır. Sentetik lifler kullanıldığı pomzalı seride, lifsiz benzerine göre %3.94 oranında basınç dayanımını azaltmıştır.

Yine grafikten görüldüğü gibi çelik lifler yüksek dayanımlı serilerin dayanımlarını %1-2 oranında azaltmışken, dayanımı düşük olan seride örneğin 11 nolu seride dayanımı, 10 nolu seriye göre %3 artırmıştır.

Serilerin basınç dayanımları için genel bir sonuç olarak, pomza miktarının artmasıyla bir azalmanın olduğu, ancak kısa çelik liflerin yüksek beton dayanımında, dayanımı düşürdüğü, orta dayanımlı betonlarda dayanımı pek etkilemediği ancak pomzayla hafifleşen beton serileri için basınç dayanımını artırdığı söylenebilir. Ayrıca sentetik liflerin ve uzun çelik liflerin beton içerisinde boşluk oluşturdukları ve basınç dayanımlarını düşürdükleri de bir diğer sonuçtur.

Yapılan basınç deneylerinden elde edilen liflerle ilgili önemli sonuç, lifli ve lifsiz kendiliğinden yerleşen beton serilerinin örneklerinin, her ikisinin de ani bir

şekilde kırılmış olmalarına rağmen, lifli serilerde deneyin bir miktar daha sürmüş olduğu ve yükün daha geç boşaldığıdır. Bu lifli serilerin sünek bir yapı göstermesindedir. Lifli serilerde oluşan kırılmalarda, numunelerde tamamen ayrılma oluşmamakta, numune genel olarak bütün kalmaktadır. Şekil 6.14'te, anlatılan deneylere ait bazı fotoğraflar gösterilmektedir.



Şekil 6.14. Basınç deneyinden bazı fotoğraflar

6.2.2. Serilerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Yarmada çekme deneyleri silindirik numunelere uygulanmış ve elde edilen kırılma yük değerlerinden yarmada çekme dayanımları hesaplanmıştır. 150 mm çaplı ve 300 mm uzunluklu silindirik numuneler üzerinde yapılan yarmada çekme deneyleri 7. ve 28. günlerde yapılmıştır. Pomza ile hafifletirilen betonların basınç dayanımları gibi yarmada çekme dayanımları da azalmıştır. Artan pomza miktarına bağlı olarak yarmada çekme dayanımları düşmüştür.

Genel olarak basınç dayanımı yüksek olan betonların yarmada çekme dayanımları da yüksektir. 7 ve 28 günlük numunelere uygulanan deneylere ait

sonuçlar izelge 6.8’de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Serilere ait 7 ve 28 günlük yarmada çekme deneyi için sonuçlar

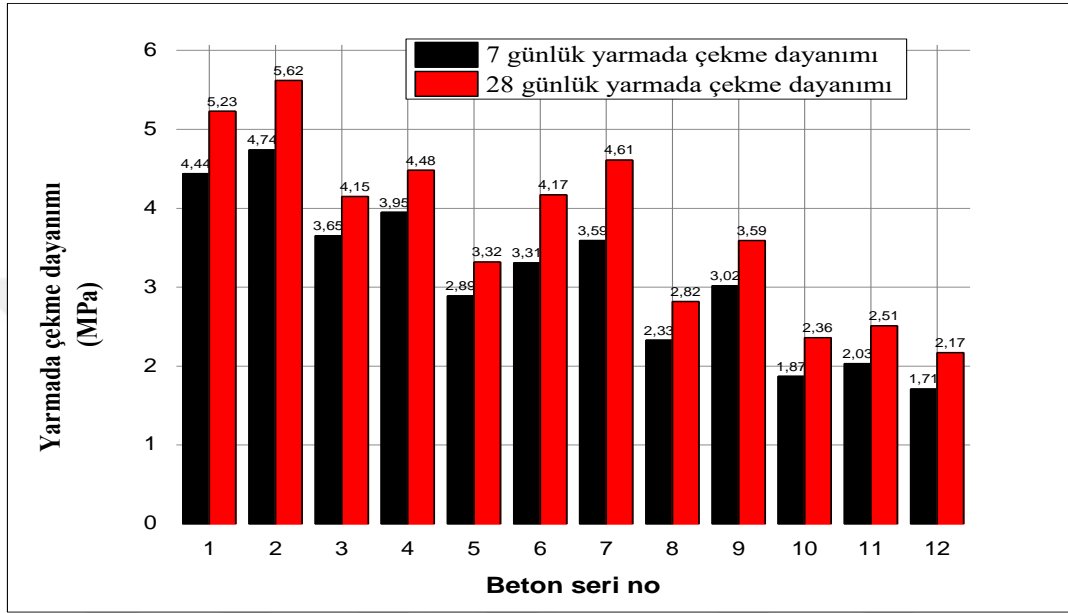
Beton seri no (İsimlendirme)	7 günlük yarmada çekme dayanımı (MPa)	28 günlük yarmada çekme dayanımı (MPa)
1 (K)	4.44	5.23
2 (Kkl)	4.74	5.62
3 (K2NP)	3.65	4.15
4 (K2NPkl)	3.95	4.48
5 (KNP)	2.89	3.32
6 (KNPkl)	3.31	4.17
7 (KNPul)	3.59	4.61
8 (KN3P)	2.33	2.82
9 (KN3Pkl)	3.02	3.59
10 (KP)	1.87	2.36
11 (KPkl)	2.03	2.51
12 (KPsl)	1.71	2.17

1 nolu (K) serinin aynı karışıma kısa elik lif katılmış olan 2 nolu (Kkl) seriye göre yarmada çekme dayanımı, hem 7. gün hem de 28. günde düşük çıkmıştır. Özellikle elik liflerin, betonlara eklenmesi yarmada çekme dayanımını çok artıran bir uygulamadır. Aynı karışımlı lifsiz ve lifli serilerde, 3 ile 4, 5 ile 6, 8 ile 9 ve 10 ile 11 nolu seriler arasında da benzer artışlar görülmektedir. Yani kısa elik lif katılan serilerin hem 7. hem de 28. gün yarmada çekme dayanımları, lifsiz serilerden yüksek bulunmuştur. Liflerin betona katılma nedenlerinin en önemlilerinden biri zaten çekme dayanımını artırmasıdır.

Burada özellikle dikkat çeken seriler 7. seri (KNPul) ve 12. seridir (KPsl). Çünkü 7. seri (KNPul) içinde kullanılan 60 mm uzunluklu elik lifler bir önceki 6. seri (KNPkl) yani 30 mm kısa elik lif kullanılan seriden çok daha yüksek yarmada çekme dayanımı göstermiştir. Buradan artan lif boyunun yarmada çekme dayanımını artıran bir unsur olduğu söylenebilir. Hatta yle ki bu seri kendisinden daha az pomza içerdiği için daha ağır olan ve kısa elik lif içeren 4. seriden (K2NPkl), 28. günde çok daha iyi yarmada çekme dayanımı sergilemiştir.

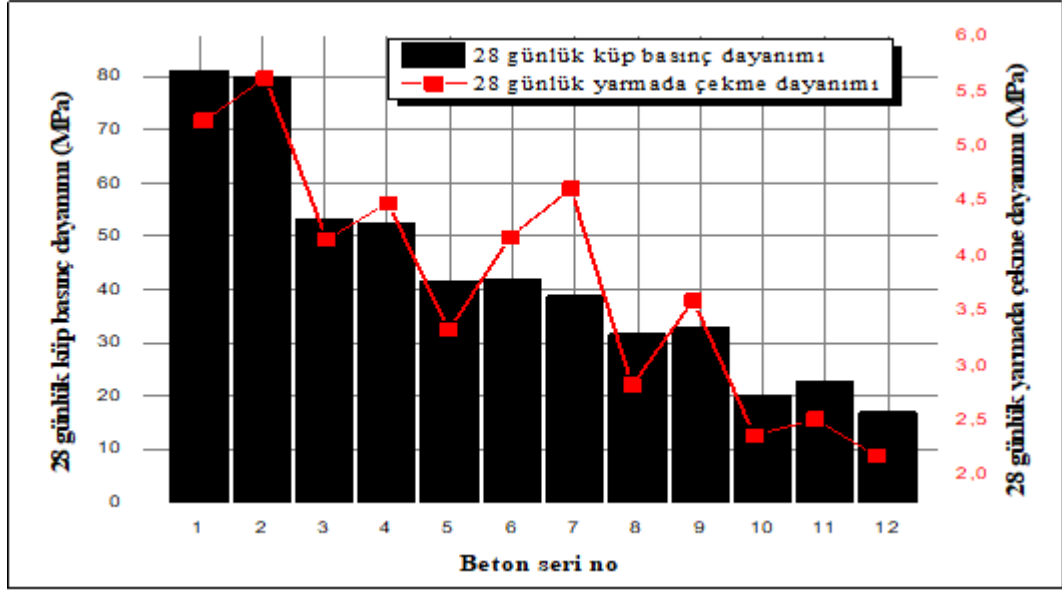
12. seri (KPs1) yani tamamı pomza agregalı ve sentetik lif içeren serinin yarmada çekme dayanımı, lifli bir seri olmasına rağmen 7. ve 28. gün değerleri olarak en düşük seridir. Bunun nedeni bu betonun boşluklu olmasıdır.

Şekil 6.15’de serilere ait 7 ve 28 günlük yarmada çekme deneyinden elde edilen sonuçlar grafik halinde sunulmuştur.



Şekil 6.15. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük yarmada çekme dayanımları

Şekil 6.16’da beton serilerinin 28 günlük küp basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları birlikte gösterilmiştir. Basınç dayanımları yüksek serilerin, genel olarak yarmada çekme dayanımları da yüksektir. 2. seri (Kkl), 4. seri (K2NPkl) ve 7. seri (KNPul) gibi çelik lifli serilerde basınç dayanımları bu serilerin lifsiz hallerine göre yani 1. seri (K), 3. seri (K2NP) ve 5. seriye (KNP) göre bir miktar düşmüş olsa da, yarmada çekme dayanımlarını çok fazla artırmıştır. Her çelik lif katılan seride yarmada çekme dayanımını artırmıştır. Özellikle uzun çelik lifli 7. seride yarmada çekme dayanımı dikkat çekici şekilde artmıştır.



Şekil 6.16. Beton serilerinin 28 günlük küp basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımlarının birlikte gösterimi

Deneylerde dikkat çeken önemli bir gözlem ise lifsiz serilerin numunelerinde silindirler iki parçaya ayrılırken, lifli serilerde numunelerin kırılmadan sonra bir bütün olarak kalması ve deneyin bazen kırılmadan sonra bile bir miktar devam etmiş olmasıdır. Şekil 6.17’de ayrılan veya ayrılmayan numunelerin fotoğrafları gösterilmektedir.

Gözlenen bir diğer sonuç ise lifsiz serilerin ikiye ayrılmış yüzeylerine bakıldığında, pomzalı serilerde kırılmanın pomza agregasının kendisinde oluştuğu, oysa lifsiz kontrol serisi 1 nolu seride (K) bu kırılmanın çimento hamurunda olduğudur.

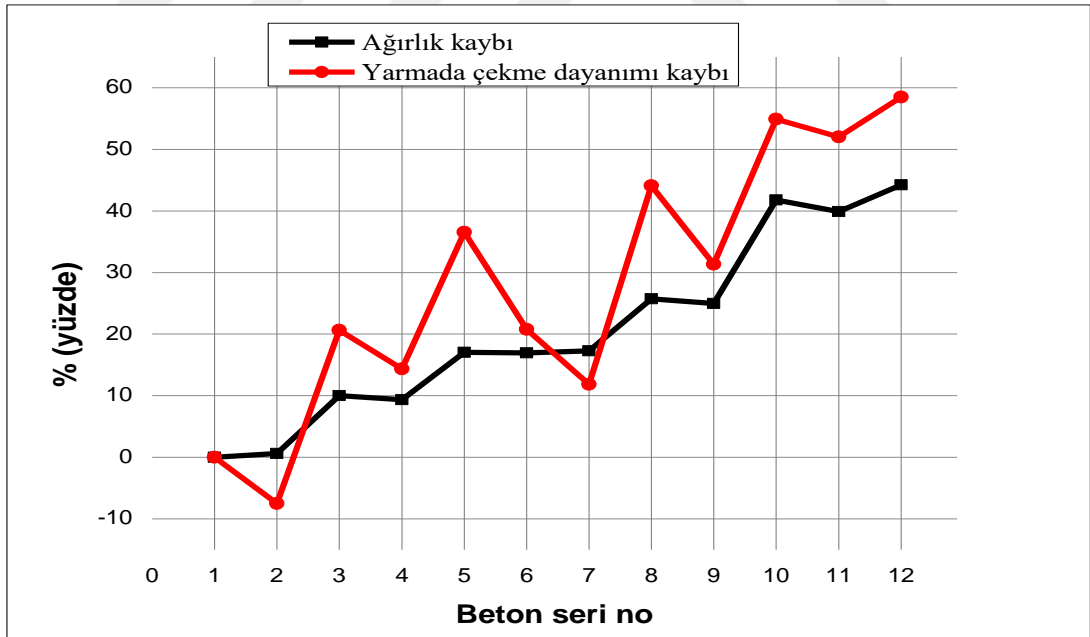


Şekil 6.17. Yarmada çekme deneyinde, ayrılan ve bütün kalan numune örnekleri

Aşağıda Çizelge 6.9'da serilerin pomza kullanılarak hafifleştirildiğinde, 1 nolu (K) kontrol serisine göre ne kadar ağırlık kaybına uğradığı ve yarmada çekme dayanımının ne kadar azaldığı hesaplanmıştır. Şekil 6.18'de de Çizelge 6.9'da gösterilen değerler grafik olarak sunulmuştur.

Çizelge 6.9. Serilerin yarmada çekme dayanım kaybı ve ağırlık kaybı (1.seri esas alınarak)

Beton seri no (İsimlendirme)	Yarma çekme dayanım kaybı (%)	Ağırlık kaybı (%)
1 (K)	0	0
2 (Kkl)	-7.46 (yani artmış)	0.60
3 (K2NP)	20.65	10
4 (K2NPkl)	14.34	9.35
5 (KNP)	36.52	17.05
6 (KNPkl)	20.77	16.96
7 (KNPul)	11.85	17.26
8 (KN3P)	44.08	25.73
9 (KN3Pkl)	31.36	24.96
10 (KP)	54.88	41.79
11 (KPkl)	52.01	39.88
12 (KPs1)	58.51	44.22



Şekil 6.18. Beton serilerinin yarmada çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı grafiği

Kontrol serisi 1. serinin (K) kısa lif eklenerek üretilmiş hali 2. seri (Kkl), ağırlık bakımından liflerin oluşturduğu bir kısım boşluk nedeniyle %0.60 azalmıştır ama kısa lifler yarmada çekme dayanımını %7.46 artırmıştır.

3. seri (K2NP) yani normal agregası üçte bir oranında pomza ile değiştirilen seri, %10'luk ağırlık kaybına karşılık %20.65'lik bir yarmada çekme dayanım kaybına uğramıştır 4. seride (K2NPkl) kısa lif kullanıldığı için, pomzanın oluşturduğu boşluk bir miktar çelik lifle dolmuş ve ağırlık %9.35 azalmıştır. Bu 4. seride yarmada çekme dayanımı sadece %14.34 azalmıştır.

5. seride (KNP) yani yarı yarıya pomza kullanılan seride ağırlık kaybı %17.05 olurken, yarmada çekme dayanım kaybı %36.52 gibi yüksek değerlere çıkmıştır. Aynı serinin kısa lifli üretilmiş 6. seride (KNPkl) ağırlık kaybı, 5. seriye göre bir miktar azalmış ve %16.96 olmuş ve yarmada çekme dayanımı lifler sayesinde sadece %20.77'lik kayba uğramıştır. 7. seri (KNPul) özellikle dikkat çekici bir seridir. 5. serinin (KNP) uzun lifle üretilmiş çeşidi bu 7. seri, uzun liflerin yerleşme sorunu nedeniyle ağırlık kaybının arttığı bir seri olmuştur. Ağırlık kaybı %17.26'ya çıkmış olan 7. serinin, uzun lifler sayesinde yarmada çekme dayanımı çok olumlu etkilenmiş ve dayanım kaybı kontrol serisi 1. seriye göre yalnızca %11.85 olmuştur.

8. seriye (KN3P) göre, 9. seride de (KN3Pkl) yine benzer şekilde hem ağırlık hem de yarmada çekme dayanımı artmıştır.

Tamamı pomzayla üretilmiş 10. seri (KP) ile 11. seri (KPkl) ve 12. serinin (KPs) birbirinden farkı liflerdir. Lifsiz 10. seride ağırlık kaybı %41.79 iken, yarmada çekme dayanım kaybı %54.88 olmuştur. Kısa çelik lifli 11. seride ağırlık ve yarmada çekme dayanımı 10. seriye göre azda olsa artış göstermiştir. 11. seride ağırlık %39.88 ve yarmada çekme dayanımı %52.01 azalmıştır. 12. seri (KPs) yani sentetik lifli seri hem ağırlığın hem de yarmada çekme dayanımının en fazla düştüğü seridir.

Aşağıda Çizelge 6.10'da her farklı karışımdaki liffsiz olan serinin ağırlığı ve yarmada çekme dayanımı %100 alındığında, benzer karışimli lifli serilerin ağırlık ve yarmada çekme dayanımlarındaki değişimler (% artış, azalış olarak) gösterilmiştir.

Çizelge 6.10. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilen diğer lifli serilerin ağırlık ve yarmada çekme dayanımı değişimi

Beton seri no (İsimlendirme)	28. gün yarmada çekme dayanımı (MPa)	Yarma çekme dayanım değişimi (%)	Kuru birim hacim ağırlık (g/dm ³)	Ağırlık değişimi (%)
1 (K)	5.23	0	2352	0
2 (Kkl)	5.62	+7.46	2338	-0.60
3 (K2NP)	4.15	0	2117	0
4 (K2NPkl)	4.48	+7.95	2132	+0.71
5 (KNP)	3.32	0	1951	0
6 (KNPkl)	4.17	+25.60	1953	+0.10
7 (KNPul)	4.61	+38.86	1946	-0.26
8 (KN3P)	2.82	0	1747	0
9 (KN3Pkl)	3.59	+27.30	1765	+1.03
10 (KP)	2.36	0	1369	0
11 (KPkl)	2.51	+6.36	1414	+3.29
12 (KPsI)	2.17	-8.05	1312	-4.16

Yukarıda Çizelge 6.10 incelendiğinde 1. seri (K) ve 2. seri (Kkl) gibi yüksek dayanımlı iki seri için, lif eklenmiş olan 2. seride azda olsa liflerin beton içerisinde boşluğa neden olduğu ve ağırlığı azalttığı söylenebilir. Yarmada çekme dayanımı ise lifler sayesinde %7.46 artmıştır. 2. seride oluşan yarmada çekme dayanımı artışının sınırlı oluşu, betonun zaten yüksek dayanımlı olması ve oluşan kırılmanın bağlayıcı çimento hamuruna aktarılmasıyla açıklanabilir.

3. seri (K2NP) ve 4. seri (K2NPkl) arasındaki ilişkiye bakıldığında 4. seride hem ağırlık hem de yarmada çekme dayanımı artmıştır. Pomzanın oluşturduğu bir miktar boşluğun liflerin yerleşimine izin verdiği söylenebilir.

Yarı agregası pomza olan 5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl) ve 7. seri (KNPul) betonlardan, uzun lif kullanılan seri yani 7. seride lifsiz 5. seriye göre %38.86'lık bir

yarmada çekme dayanımı artışı görülmektedir. Kısa lif kullanılan 6. seride ise artış % 25.60'da kalmıştır. Kısa lifler 6. serinin ağırlığını, 5. seriye göre bir miktar artırırken, uzun lif 7. seride ağırlığı azaltmıştır. Uzun çelik liflerin yarmada çekme dayanımını, kısa çelik liflerden çok daha fazla artırdığı ve yerleşirken bir miktar boşluk oluşturduğu görülmektedir.

8. seri (KN3P) ve 9. serilerde de (KN3Pkl) benzer durum oluşmuş, ağırlık ve özellikle yarmada çekme dayanımı kısa lifler sayesinde artmıştır.

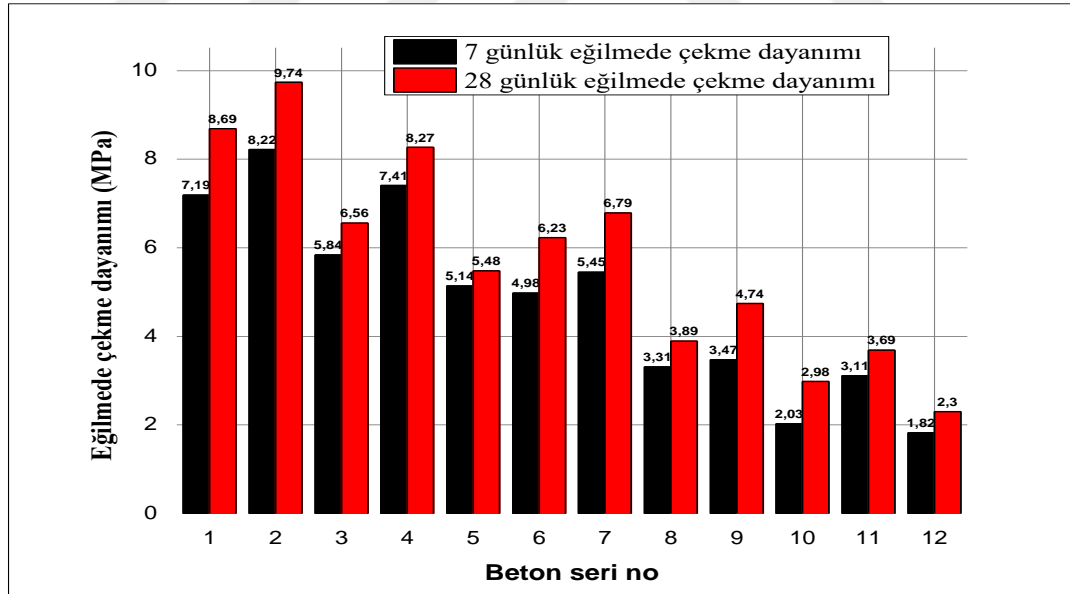
Tamamı pomzalı 10. seri (KP) ve 11. seriye (KPkl) bakıldığında, kısa çelik liflerin 11. serinin ağırlığını diğer serilerden daha fazla artırdığı görülmektedir. Çünkü hafifleşen ve boşluklu yapısı nedeniyle kısa liflerin daha rahat yerleşmesine pomza agregası imkan tanımıştır. Daha önce değinildiği gibi, kırılmanın zayıf olan pomza agregasında olması, yarmada çekme dayanımına kısa çelik liflerin olumlu etkisini büyük oranda sınırlamıştır. 12. seri, hem ağırlığı hem de yarmada çekme dayanımını en çok azaltan seri olmuştur.

6.2.3. Serilerin eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları

Eğilmede çekme deneyinde kullanılan prizmatik kirişlerin ebatlarının yarmada çekme deneyinde kullanılan silindir numunelerden büyük olması ve beton yerleşiminin kolay olması nedeniyle, yarmada çekme dayanımı için kullanılan numunelere göre eğilmede çekme deneyi numuneleri daha homojen yapıdadırlar. Beton serilerinden üretilen prizmatik kirişlere 7 ve 28 günlük eğilmede çekme deneyi uygulanmış ve elde edilen kırılma değerlerinden, bu serilere ait eğilmede çekme dayanımları hesaplanarak Çizelge 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.19'da ise bu değerler grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.11. Serilere ait 7 ve 28 günlük eğilmede çekme deneyi sonuçları

Beton seri no (İsmlendirme)	7 günlük eğilmede çekme dayanımı (MPa)	28 günlük eğilmede çekme dayanımı (MPa)
1 (K)	7.19	8.69
2 (Kkl)	8.22	9.74
3 (K2NP)	5.84	6.56
4 (K2NPkl)	7.41	8.27
5 (KNP)	5.14	5.48
6 (KNPkl)	4.98	6.23
7 (KNPul)	5.45	6.79
8 (KN3P)	3.31	3.89
9 (KN3Pkl)	3.47	4.74
10 (KP)	2.03	2.98
11 (KPkl)	3.11	3.69
12 (KPsI)	1.82	2.30



Şekil 6.19. Beton serilerinin 7 ve 28 günlük eğilmede çekme dayanımları

Yukarıdaki Şekil 6.19'a bakıldığında çelik lifli serilerin genel olarak hem 7 hem de 28 günlük eğilmede çekme dayanımının lifsiz serilerden yüksek çıktığı görülmektedir. Yalnızca sentetik lif kullanılan 12 nolu seri, lifsiz seriden hem 7 hem de 28 günde daha düşük eğilmede çekme dayanımı göstermiştir. 6. seri (KNPkl), 7

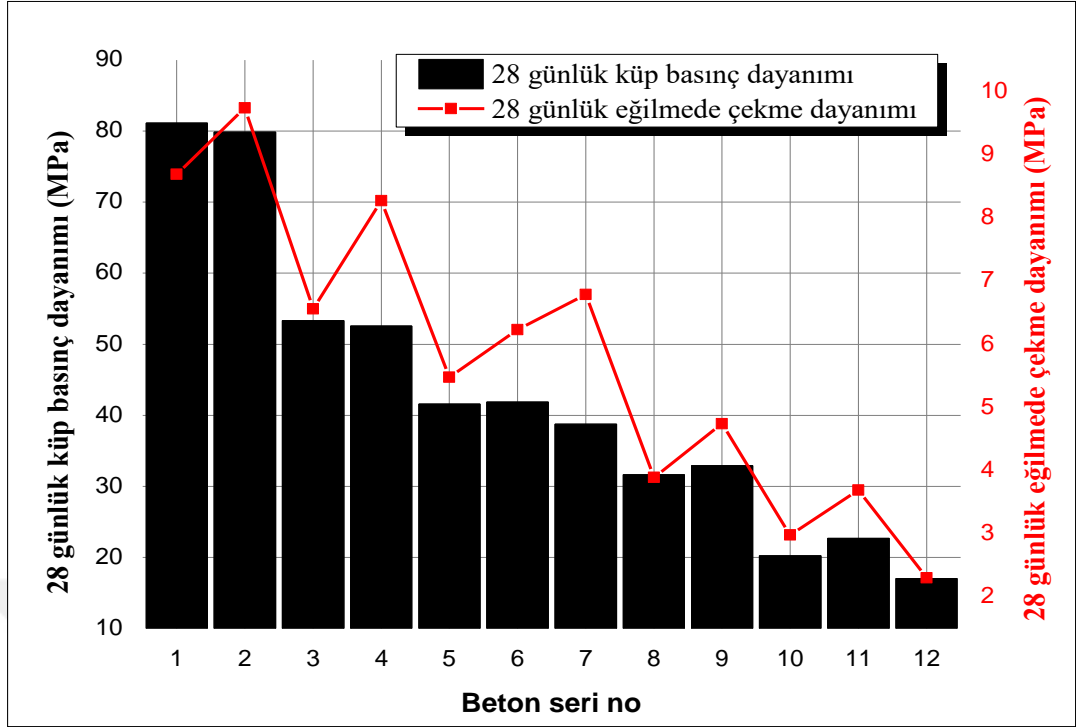
günlük dayanımda lifsiz 5. seriden (KNP) çok az miktarda düşük bir eğilmede çekme dayanımı göstermiş olsa da 28 günlük eğilmede çekme dayanımı yine yüksektir. Beton serilerinin geç dayanım kazanmasına sebep olan uçucu kül kullanımının buna neden olduğu düşünülmektedir.

Bunların dışında her seride çelik lif kullanılması, aynı karışımlı lifsiz serilerden çok daha yüksek eğilmede çekme dayanımına neden olmuştur.

Yarısı pomza, yarısı normal agrega içeren serilerden lifsiz olan 5. seriden (KNP), kısa çelik lifli olan 6. seri (KNPkl), 28 günde daha fazla eğilmede çekme dayanımı göstermiştir. Yarısı pomza olan bir diğer seri, 7. seri (KNPul) yani uzun çelik lifli seri, hem 7 hem de 28 günde kısa çelik lifli 6. seriden çok daha iyi eğilmede çekme dayanım performansı sergilemiştir.

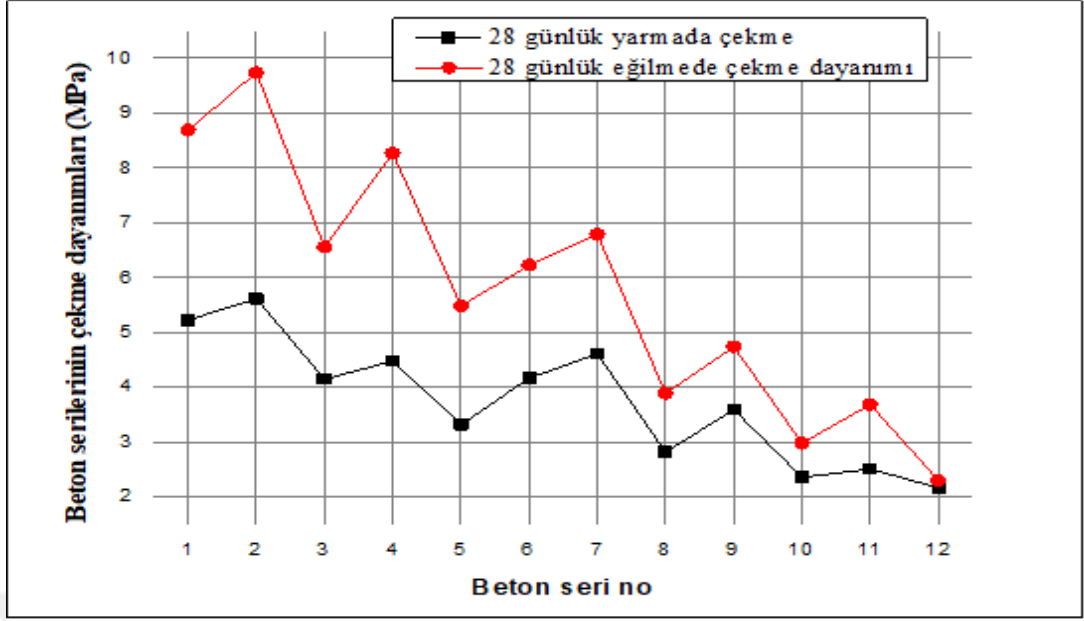
Şekil 6.20'de serilerin 28 günlük basınç ve eğilmede çekme dayanımları karşılaştırılmıştır. Bu grafikten net olarak görülmektedir ki, lif katılınca basınç dayanımının lifsiz benzerlerine göre azaldığı 2. seri (Kkl), 4. seri (K2NPkl) ve 7. seride (KNPul) bile eğilmede çekme dayanımları bir sıçrama yapmıştır. Yani bu serilerde basınç dayanımını azaltan çelik lifler, eğilmede çekme dayanımını artırmıştır.

Yine grafikten kısa çelik liflerin, lifsiz seriye göre basınç dayanımını artırdığı 6. seri (KNPkl), 9. seri (KN3Pkl) ve 11. seride de (KPkl) benzer durumların olduğu ve eğilmede çekme dayanımlarının yüksek çıktığı görülür. Yani pomza katılınca dayanımları azalan serilerde kullanılan çelik lifler, hem basınç dayanımını hem de eğilmede çekme dayanımını artırmıştır. Basınç dayanımına olumsuz etkisi olan uzun çelik life sahip 7. seride (KNPul), eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı yüksek olan 6. seriden (KNPkl) çok daha fazladır. Buradan uzun çelik liflerin eğilmede çekme dayanımını kısa çelik liflerden çok daha fazla artırdığı net olarak söylenebilir.



Şekil 6.20. Beton serilerinin 28 günlük basınç ve eğilmede çekme dayanımları

Şekil 6.21’de serilerin 28 günlük eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımları ilişkilendirilmiştir. Yarmada çekme dayanımları, eğilmede çekme dayanımlarından düşük çıkmaktadır. Ancak pomza katıldığı için dayanımı azalan serilerde, dayanımlar arası makas daralmaktadır. Her iki dayanıma ait grafik çizgileri benzerlik göstermektedir. Kısa çelik liflerin ve özellikle de uzun çelik lifin her iki çekme dayanımını fazlasıyla artırdığı görülmektedir.



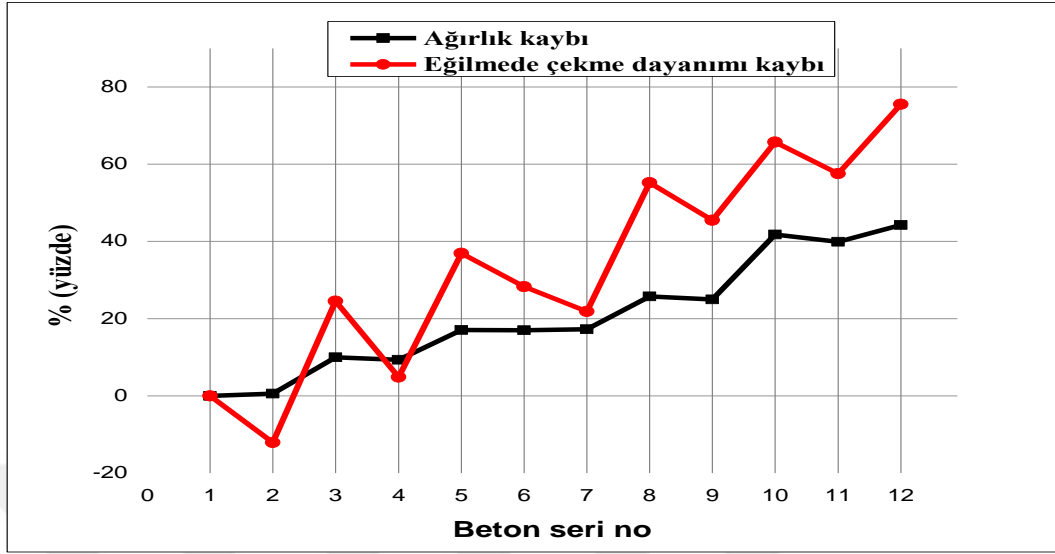
Şekil 6.21. Beton serilerinin yarmada ve eğilmede 28 günlük çekme dayanımları

Çizelge 6.12’de 1 nolu (K) serisinin ağırlığı ve eğilmede çekme dayanımı esas alınarak, diğer serilerin, ağırlıklarındaki kayıp ile eğilmede çekme dayanımında oluşan kayıp hesaplanmıştır.

Çizelge 6.12. Serilerin eğilmede çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı (1. seri esas alınarak)

Beton seri no (İsmlendirme)	Eğilmede çekme dayanım kaybı (%)	Ağırlık kaybı (%)
1 (K)	0	0
2 (Kkl)	-12.08 (Artmış)	0.60
3 (K2NP)	24.51	10
4 (K2NPkl)	4.83	9.35
5 (KNP)	36.94	17.05
6 (KNPkl)	28.31	16.96
7 (KNPul)	21.86	17.26
8 (KN3P)	55.24	25.73
9 (KN3Pkl)	45.45	24.96
10 (KP)	65.71	41.79
11 (KPkl)	57.54	39.88
12 (KPsl)	75.53	44.22

Şekil 6.22’de serilerin eğilmede çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı grafiği 1. seri esas alındığında, grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Serilerin eğilmede çekme dayanım kaybı-ağırlık kaybı grafiği (1 seriye göre)

Yukarıda gösterilen Çizelge 6.12 ve Şekil 6.22’ye bakıldığında, 2. seride (Kkl), 1. seriye göre çok az bir ağırlık kaybı olmuştur, çünkü dayanımları yüksek olan bu serilerde kullanılan kısa çelik lifler, dolu beton yapısı içinde bir miktar boşluk oluşturmuştur. 2. serinin eğilmede çekme dayanımı azalmamış, aksine kısa çelik lifler dayanımı %12.08 artırmıştır. 3. seriden (K2NP) itibaren pomza katılmaya başlandığından ağırlık kayıpları artmış ve 3. seride kayıp %10 olmuştur. Bu seride eğilmede çekme dayanımı kaybı da %24.51’e çıkmıştır. 4. seri (K2NPkl) kısa çelik lif içerdiğinden eğilmede çekme dayanımında olan kayıp, 3. seriye göre azalmış ve sadece %4.83 olmuştur. Daha önce değinildiği üzere pomza kullanılan serilerde pomzanın oluşturduğu boşluk kısa çelik liflere yer oluşturduğundan ağırlık kayıpları, lifsiz serilere göre azalmaktadır. 4. seri ağırlığı, 3. seriye göre az da olsa yüksektir.

5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl) ve 7. seri (KNPul) eğilmede çekme dayanım kayıplarına bakıldığında, en fazla kayıp lifsiz 5. seride %36.94 ile oluşmuş, kısa çelik lif içeren 6. seride %28.31 ve uzun lif içeren 7. seride ise %21.86’ya düşmüştür. Uzun çelik lifler çekme dayanımlarını, kısa çelik liflerden çok daha fazla artıran etkiye sahiptir, ancak uzun çelik lifler beton içerisinde kısa çelik liflerden daha fazla boşluk oluşturmaktadır.

8. seri (KN3P) ve 9. seride (KN3Pkl) aynı zamanda 10. seri (KP) ve 11. seride

de (KPkl) benzer durumlar söz konusudur, yani kısa çelik lif kullanılan serilerde eğilmede çekme dayanımı ve ağırlık artmaktadır. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken husus beton içerisinde pomza miktarı arttıkça, kısa çelik lifler eğilmede çekme dayanımını daha az artırmaktadır. Bunun nedeni kırılmaların pomza agregasının kendisinde oluşmasıdır. Ağırlıklar ise pomza miktarına bağlı olarak azalmakta ve kısa çelik lifler sayesinde bir miktar artmaktadır. Çelik liflerle oluşan ağırlık artışı miktarı, pomza miktarındaki artışla artmaktadır.

Aşağıda Çizelge 6.13’de her farklı karışımdaki lifsiz olan serinin ağırlığı ve eğilmede çekme dayanımı %100 alındığında, aynı karışımli lifli serilerin ağırlık ve eğilmede çekme dayanımlarındaki değişimler (% artış, azalış olarak) gösterilmiştir.

Çizelge 6.13. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilen diğer lifli serilerin ağırlık ve eğilmede çekme dayanımı değişimi

Beton seri no (İsimlendirme)	28 günlük eğilmede çekme dayanımı (MPa)	Eğilmede çekme dayanım değişimi (%)	Kuru birim hacim ağırlık (g/dm ³)	Ağırlık değişimi (%)
1 (K)	8.69	0	2352	0
2 (Kkl)	9.74	+12.08	2338	-0.60
3 (K2NP)	6.56	0	2117	0
4 (K2NPkl)	8.27	+26.07	2132	+0.71
5 (KNP)	5.48	0	1951	0
6 (KNPkl)	6.23	+13.69	1953	+0.10
7 (KNPul)	6.79	+23.91	1946	-0.26
8 (KN3P)	3.89	0	1747	0
9 (KN3Pkl)	4.74	+21.85	1765	+1.03
10 (KP)	2.98	0	1369	0
11 (KPkl)	3.69	+23.83	1414	+3.29
12 (KPs1)	2.30	-22.82	1312	-4.16

Çizelge 6.13'den görüldüğü üzere 1. seri (K) ve 2. seri (Kkl) arasında eğilmede çekme dayanım farkı %12.08 olmuştur. Kısa çelik lifler, zaten yüksek dayanımlı olan 2. seriye olumlu etki yapmıştır, ancak çekme dayanımı çimento harcı bağlayıcılığıyla doğrudan orantılı olduğundan, artış sınırlı kalmıştır. Ağırlık ise daha dolu içyapıya sahip 1. seriye göre liflerin eklenmesiyle biraz boşluklu bir hal almış ve azda olsa (%0.60) azalmıştır.

3. seri (K2NP) ve 4. seriye (K2NPkl) bakıldığında, pomza eklenince hafifleyen bu beton serileri, pomzanın oluşturduğu boşlukta daha rahat yerleşen kısa çelik liflerin 4. seriye eklenmesiyle ağırlığı %0.71 oranında artırmıştır. Ancak bu iki seri arasında eğilmede çekme dayanım farkı %26.07 gibi yüksek bir değerde olmuştur. Çünkü dayanımı pomzayla az miktarda düşen 4. seriye kısa çelik lifler çok olumlu katkı yapmış ve eğilmede çekme dayanımını önemli miktarda artırmıştır.

5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl) ve 7. seri (KNPul) betonlarına bakıldığında eğilmede çekme dayanımını en fazla yine uzun lifin artırdığını görülür, yani 7. seri, lifsiz 5. seriye göre %23.91'lik bir eğilmede çekme dayanımına sahiptir. Aslında yarısı pomza olan bu serinin pomza oranı daha düşük olsaydı uzun liflerin etkisinin çok fazla olacağı düşünülmekteydi, çünkü kırılma çimento bağlayıcısından pomza agregasına doğru bir miktar kaymıştır. Kısa lif kullanılan 6. seride ise artış %13.69 olmuştur. Uzun çelik liflerin hem eğilmede hem de yarmada çekme dayanımını, kısa çelik liflerden daha fazla artırdığı görülür, ancak bu uzun lifler yerleşirken bir miktar boşluk oluşturmaktadır.

8. seri (KN3P) ve 9. seriler (KN3Pkl) arasında da kısa çelik liflerin yüksek eğilmede çekme dayanımı ve ağırlık artışı dikkat çekmektedir.

Lifsiz, agregasının hepsi pomza olan 10. seri (KP), 11. seri (KPkl) ve 12. seri (KPl) arasında da şu tespitler yapılabilir. 11. seride kullanılan kısa çelik lifler ağırlığı bütün diğer serilerden daha fazla oranda artırmış ve bu artış %3.29'a ulaşmıştır. Aynı zamanda %23.83 gibi yüksek bir eğilmede çekme dayanım artışı da sağlamıştır. Yarmada çekme dayanımında da olduğu gibi 12. seri hem ağırlığı hem de eğilmede çekme dayanımını en fazla düşüren seri olmuştur.

Deneylerde elde edilen serilere ait 28 günlük eğilmede çekme dayanımı/yarmada çekme dayanımı oranları hesaplanmıştır. Genellikle bu değerler 1 ile 2 arasında olduğu birçok çalışmanın ortak sonucudur. Bu çalışmada da bu oranlar

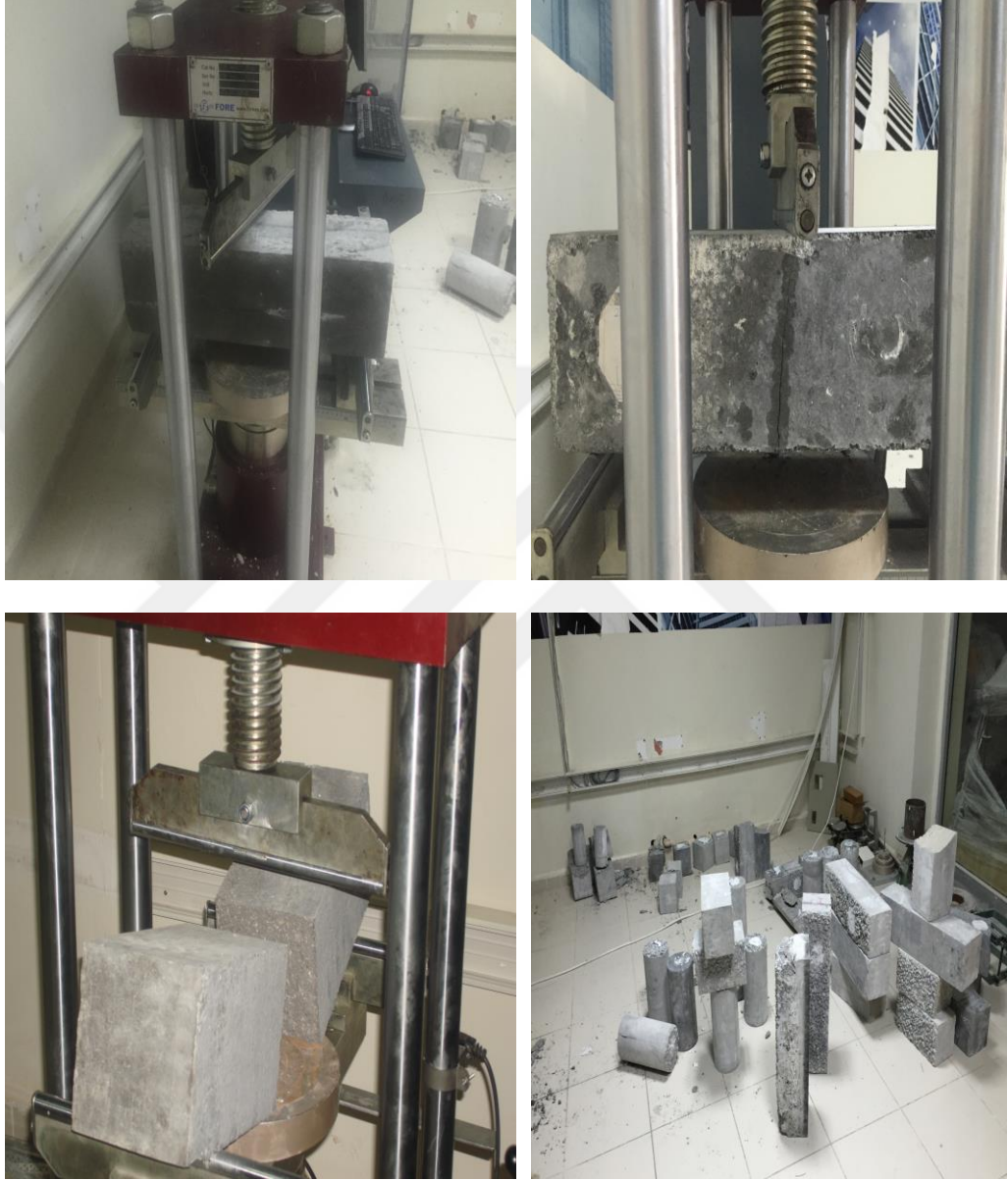
1 ile 2 arasında çıkmıştır. Bir beton serisinin direkt çekme dayanımı bulunurken, o serinin eğilmede çekme dayanımı 2'ye yarmada çekme dayanımı 1.5 değerine bölünür, yani $2/1.5 \approx 1.34$ oranı uygundur (Yazıcı, 2012). Genel olarak basınç dayanımları yüksek, daha az pomza içeren serilerde oran 2'ye yakın iken, dayanım düştükçe oran 1'e yaklaşmaktadır. Bu oranın yüksek çıkma nedenlerinden birinin de betonların numune kalıplarına daha homojen yerleştirilebilmesi olduğu düşünülmektedir. Yarmada çekme dayanımı ve eğilmede çekme dayanım deneyleri için, hazırlanan numunelerin homojen dağılıma ne kadar izin verdiği çok önemlidir. Çünkü silindir numunelere göre, daha büyük olan prizmatik kirişler daha homojen beton yerleştirilmeye imkan sağlar. Çizelge 6.14'de 28 günlük eğilmede çekme dayanımının, yarmada çekme dayanımına oranları verilmiştir.

Çizelge 6.14. Serilere ait 28 günlük eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanım oranları

Beton seri no (İsimlendirme)	28 günlük eğilmede çekme dayanımı (MPa)	28 günlük yarmada çekme dayanımı (MPa)	28 günlük Eğilme/Yarma çekme dayanım oranı
1 (K)	8.69	5.23	1.66
2 (Kkl)	9.74	5.62	1.73
3 (K2NP)	6.56	4.15	1.58
4 (K2NPkl)	8.27	4.48	1.85
5 (KNP)	5.48	3.32	1.65
6 (KNPkl)	6.23	4.17	1.49
7 (KNPul)	6.79	4.61	1.47
8 (KN3P)	3.89	2.82	1.38
9 (KN3Pkl)	4.74	3.59	1.25
10 (KP)	2.98	2.36	1.26
11 (KPkl)	3.69	2.51	1.47
12 (KPs1)	2.30	2.17	1.06

Çizelge 6.14'e göre pomza miktarının arttığı serilerde oran 1'e yaklaşmaktadır. Aşağıda Şekil 6.23'de kiriş numuneler üzerine yapılan eğilmede çekme deneyine ait fotoğraflar görülmektedir. Lif içeren kirişlerde deney sonunda numunelerde tamamen bir ayrılma oluşmamakta ve çatlaklar sınırlı kalmaktadır. Lifsiz serilerde ise deney sonunda numuneler ikiye ayrılmaktadır. Deneyde bir başka

dikkat çeken durum bazı numunelerde kırılma yükünün altında kalan yüklerle deneylerin devam etmesidir ki, bu lif varlığı ve betonların sünekliliği ile açıklanabilir. Oysa lifsiz beton serilerinde ve sentetik lif içeren 12. seride (KPs1) kırılmalar ayrılmalar şeklinde olmuştur.



Şekil 6.23. Eğilmede çekme dayanımı deneyine ait bazı fotoğraflar

6.2.4. Betonarme kiriş numunelerde eğilmede çekme dayanımı sonuçları

Beton serilerinden üretilen küçük donatılı prizmatik kirişlere 28 günlük eğilmede çekme deneyi uygulanmış ve deneyde elde edilen en büyük kırılma değerleri Çizelge 6.15’de verilmiştir. Şekil 6.24’de Çizelge 6.15’te verilen bu değerler grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.15. Donatısız ve donatılı üretilen prizmatik kirişlere ait 28 günlük kırılma yükü

Beton seri no (İsimlendirme)	Donatısız kirişlerde kırılma yükü (kN)	Donatılı kirişlerde kırılma yükü (kN)	Donatı eklendiğinde oluşan fark yüzdesi (%)
1 (K)	43.45	161.63	271.99
2 (Kkl)	48.70	178.24	265.99
3 (K2NP)	32.80	127.26	287.99
4 (K2NPkl)	41.35	149.86	262.42
5 (KNP)	27.40	110.70	304.02
6 (KNPkl)	31.15	122.73	293.99
7 (KNPuI)	33.95	132.55	290.43
8 (KN3P)	19.45	85.97	342.01
9 (KN3Pkl)	23.70	99.78	321.01
10 (KP)	14.90	71.82	382.01
11 (KPkl)	18.45	85.98	366.02
12 (KPsI)	11.50	41.40	260



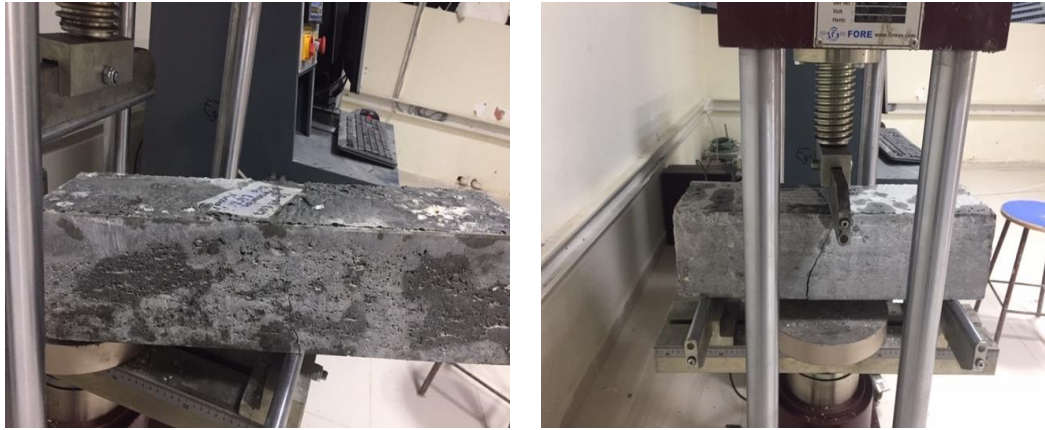
Şekil 6.24. Donatılı ve donatısız kirişlerin en büyük kırılma yükleri grafiği

Şekil 6.25’de donatısız kirişlere göre donatılı kirişlerin kırılma yükü artışları % olarak verilmiştir.



Şekil 6.25. Donatısız kirişlere göre donatılı kirişlerin kırılma yükü artış yüzdeleri

Çizelge 6.15 incelendiğinde kırılma yüklerinin artışında donatı varlığının çok etkili olduğu görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan betonarme kirişlere uygulanan 3 noktalı eğilme deneyinde kırılmalar genellikle kirişin orta noktasından ve tek çatlama biçiminde iken, daha büyük tasarlanmış donatılı kiriş numunelerle yapılan birçok çalışmada 4 noktadan eğilme deneyleri uygulanmış ve ilk çatlama yükünün birkaç katı fazla yükü kirişin göçme durumuna geldiği görülmüştür (Severcan vd, 2016; Altun vd, 2006). Şekil 6.26’da deneyde kullanılan kirişlerde oluşan çatlaklar örneklendirilmiştir.



Şekil 6.26. Donatılı kirişlerde eğilmede çekme deneyi sonrası çatlaklar

1 nolu normal agregalı kontrol betonu (K), donatısız olarak 43.45 kN yükle kırılmışken, donatı varlığı bu kırılma yükünü 161.63 kN'a çıkarmıştır, yani yüzde 271.99'lük bir artış olmuştur. 2 nolu normal agregalı ve kısa lif içeren serinin (Kkl), içerdiği kısa lif nedeniyle hem donatısız hem de donatılı kırılma yükü, lifsiz 1 nolu (K) serisinden yüksektir. Burada dikkat çeken, lifsiz 1 nolu (K) serisine eklenen donatı kırılma yükünü %271.99 artırmışken, kısa lifli 2 nolu (Kkl) seriye eklenen donatı daha düşük oranda yani %265.60 artırmıştır. Bu sonuç, liflerin donatının sağladığı olumlu katkının bir kısmını kendi başlarına sağladığının göstergesidir. Bu durumu genel olarak lifli ve lifsiz seriler arasında açıkça görmekteyiz. 5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl) ve 7. seri (KNPul) yarı yarıya pomza ve normal agregayla üretilmiş serilerdir ve 6. seri kısa çelik lif ve 7. seri uzun çelik lif içermektedir. 5. seride donatı %304.02'lik bir artış sağlamışken, kısa lifli 6. seride bu %293.99'a ve 7. seride %290.43'e düşmüştür. Uzun çelik lifler betona donatının kattığı olumlu etkinin bir kısmını kendisi sağlamaktadır.

Hem Çizelge 6.15 hem de Şekil 6.24 ve Şekil 6.25'den görüldüğü üzere, pomza miktarının arttığı serilerde konulan donatı daha büyük yüzdelerde katkı sağlamaktadır. 1. seride donatı ilavesi %271.99 artış sağlarken, tamamı pomzalı lifsiz seride (10. seri) bu artış %382.01 olmuştur. Pomza miktarının artmasıyla donatının daha etkili katkı sağlaması, pomzanın dayanımının düşük olmasına rağmen pürüzlü yüzeyi nedeniyle aderansının güçlü olmasına ve kırılma yükü değerini, donatı varlığının, beton sınıfından daha fazla etkilemesine borçludur.

Şekil 6.25'ten daha açık görüldüğü üzere pomza oranı artan serilerde genel olarak donatı etkisi daha büyük katkı sağlamaktadır. Tamamı normal agregalı betonlarda (1. seri ve 2. seri) donatı kırılma yükünü yaklaşık %270 artırmışken, yarı yarıya pomza ve normal agregaya içeren serilerde (5. seri ve 6. seri) bu artış yaklaşık %300'ler civarındadır. Tamamı pomzalı serilerde (10. seri ve 11. seri) bu artış yaklaşık %380'lere çıkmıştır. Kırılma yükü büyük oranda donatı varlığından etkilenmektedir. Ayrıca zaten yüksek eğilme dayanımına sahip betonların kırılma yükleri artışının sınırlı olması da normaldir. 12. seri (KPsl) ise boşluklu yapısının olumsuz etkisi nedeniyle biraz daha düşük bir yüzdeye sahip olmuştur.

Yine Şekil 6.25'ten net olarak görüldüğü üzere, donatılı kirişlerin lif içermesi durumunda kırılma yüklerinin artış yüzdeleri azda olsa düşmüştür, çünkü lifler donatının eğilmeye olan katkısının bir kısmını kendileri sağlamaktadır. Çizelge

6.16’da liflerin beton prizmatik kirişlere ve betonarme kirişlere olan etkisi lifsiz seriler %100 alınarak benzer karışımlı lifli serilerdeki değişimleri (% artış, azalış olarak) ayrı ayrı gösterilmiştir.

Çizelge 6.16. Aynı karışımlı donatılı ve donatısız lifsiz seriler esas alındığında, üretilen lifli serilerin kırılma yükü değişimi

Beton seri no	Beton prizmatik kiriş kırılma yükü (kN)	Beton prizmatik kiriş değişim (%)	Betonarme kiriş kırılma yükü (kN)	Betonarme kiriş değişim (%)	Donatılı kirişlerde lif-donatı benzer etki (%)
1 (K)	43.45	0	161.63	0	-
2 (Kkl)	48.70	+12.08	178.24	+10.28	1.8
3 (K2NP)	32.80	0	127.26	0	-
4 (K2NPkl)	41.35	+26.07	148.86	+16.97	9.1
5 (KNP)	27.40	0	110.70	0	-
6 (KNPkl)	31.15	+13.69	122.73	+10.87	2.82
7 (KNPul)	33.95	+23.91	132.55	+19.74	4.17
8 (KN3P)	19.45	0	85.97	0	-
9 (KN3Pkl)	23.70	+21.85	99.78	+16.06	5.79
10 (KP)	14.90	0	71.82	0	-
11 (KPkl)	18.45	+23.83	85.98	+19.72	4.11
12 (KPl)	11.50	-22.82	41.40	-42.36	-19.54

Çizelge 6.16 incelendiğinde beton prizmatik kirişlere eklenen liflerin, betonarme kirişlere eklenen liflerden daha fazla olumlu katkı sağladığı görülmektedir. Çizelgede lifli ve lifsiz benzer karışımlı serilerin kırılma yükü, hem donatısız hem de donatılı kirişler için gösterilmiştir. Çizelge 6.16’dan 1 nolu (K) kontrol serisine kısa lif eklenerek üretilen 2 nolu seride (Kkl), lifin kırılma yükünü artırma yüzdesi %12.08 iken, aynı serilerin donatılı hallerinde lifin artırma yüzdesi

sadece %10.28 olmuş ve bu iki seri donatılı olduğunda kısa lifin katkısı %1.8 azalmış olduğu görülür. Çünkü lif ve donatı benzer dayanım katkıları göstermektedir. Hem donatılı hem de donatısız kirişlerde beton dayanımı azaldıkça yani pomza miktarı arttıkça liflerin kırılma yüklerini genel olarak daha fazla artırdığı görülmektedir. Liflerin, donatının olumlu etkisini daha önceden en fazla karşılamış olduğu seri 4. seridir (K2NPk1), çünkü lifler donatısız beton kiriş kırılma yükünü %26.07 artırmışken, donatılı (betonarme) halinde bu artış sadece %16.97'dir, yani fark % 9.1 olmuştur. Bunun nedeni olarak, hacimce üçte bir pomza kullanıldığında oluşan küçük boşluğun bu seride kısa liflerin beton seriye daha iyi yerleşmesini sağlamış olması diye düşünülmektedir. Oysa bu serinin donatılı halinde, donatı varlığı lif yerleşimine bir miktar olumsuz etki yapmıştır. Sentetik lifin olumsuz etkisi gözardı edildiğinde, diğer bütün serilerde lifin olumlu katkısının donatısız beton kirişlerde daha fazla olduğu görülmektedir.

Kaşıkçı (2018)'de yaptığı çalışmada C20 sınıfında ürettiği 150x200x2300 mm boyutlu kirişlere etriye kullanmadan 1ø8 ve 3ø8 çekme donatıları yerleştirmiş ve kırılma yüklerini deneysel olarak bulmuştur. 1ø8 donatılı kirişte 7.3 kN kırılma yükü ve 3ø8'de ise 22.8 kN kırılma yükü sonuçlarına ulaşmıştır. Çekme bölgesine koyulan donatının 3 katına çıkması, kırılma yükünü 3.12 kat artırmıştır.

Erol (2011)'de yaptığı çalışmada C30 sınıfında betonlar kullanarak, hem donatılı hem de donatısız kirişler üretmiş ve dört noktadan eğilme deneyi ile kırılma yükleri ve eğilme dayanımlarını araştırmıştır. 2300 kg/m³ yaklaşık ağırlığına sahip beton ve betonarme kirişlere 60 mm uzunluğa sahip çelik liflerin değişik oranlarda eklenmesi durumunda oluşacak eğilme dayanımlarını deneysel olarak bulmuştur. 150x150x750 mm boyutlu ürettiği beton kirişlerde lifsiz eğilme dayanımını dört noktadan eğilme deneyi ile 3.81 MPa bulmuş ve 40 kg/m³ uzun çelik lif kullandığı seride eğilme dayanımını 4.71 MPa olarak elde etmiştir, yani lifler eğilme dayanımını %23.62 artırmıştır. Yine bu çalışmada 300x300x2000 mm boyutlarında ürettiği betonarme kirişlere 2ø16 çekme donatısı, 2ø12 basınç donatısı ve ø8/16/8 etriye kullanmış ve kırılma yüklerini dört noktadan eğilme deneyi sonucunda, lifsiz betonarme kirişte 199.5 kN ve lifli betonarme kirişte 235 kN olarak bulmuştur. Yani donatılı kirişlerde lifin katkısı %17.79 olmuştur. Buradan eğilme dayanımları lifsiz betonarme kirişte 13.3 MPa ve 40 kg/m³ uzun lifli betonarme kirişte 15.67 MPa olarak elde edilir. Eğilme dayanımları karşılaştırıldığında koyulan donatı eğilme

dayanımını lifsiz betonda 13.3/3.81 yani 3.49 kat artırmıştır ve bu artış lifli beton ile lifli betonarme kiriş arasında 15.67/4.71 yani 3.32 kat olmuştur.

Severcan vd (2016), dayanımları yaklaşık 20 MPa olan betonlarda 2ø10 basınç donatısı ve ø8/8 etriye kullandıkları 150x200x2400 boyutlarında kirişlere 2ø12 ve 3ø14 oranlarında çekme donatıları yerleştirmişler ve 3 noktadan eğilme deneyi uygulamışlardır. 2ø12 çekme donatısı ile 27.30 kN ve 3ø14 donatı ile 57.30 kN kırılma yükleri sonuçlarına ulaşmışlardır. Kiriş ortasından uygulanan 3 noktadan eğilme deneyinde, çekme bölgesine yerleştirilen donatının %104 artması taşıma gücünü % 109 artırmıştır.

Altun vd (2002), yaptıkları çalışmada 250x350x2000 mm boyutlarında ve C20 beton kullanarak ürettikleri betonarme kirişlerin bazılarında 30 kg/m³ 60 mm uzunluğunda çelik lif koymuşlar ve bazılarını lifsiz üretmişlerdir. Çekme donatısı olarak 2ø12+1ø18 donatı koydukları kirişlerde uyguladıkları deneyler sonucunda lifli betonarme kirişlerin, lifsiz olanlardan yaklaşık %18 daha fazla taşıma gücü olduğunu söylemişlerdir.

Saatçi ve Batarlar (2017) yaptığı çalışmada, 150x250x2300 mm boyutlarında betonarme kirişler üretmişler ve bu kirişlerin bazılarında S420 sınıfında 2ø8 donatıyı hem çekme hem de basınç bölgesinde kullanmışlar, bazı kirişlerde ise 2ø16 donatıyı çekme ve basınç bölgelerinde kullanmışlardır. Lifsiz betonların basınç dayanımları 33.8 MPa, yarmada çekme dayanımlarını 2.3 MPa ve hacimce %0.5 uzun çelik lif (60 mm) kullandıkları beton dayanımlarını ise 36.7 MPa, yarmada çekme dayanımlarını 3.5 MPa olarak bulmuşlardır. Lifsiz ve etriyesiz 2ø8 kullanarak ürettikleri kirişlerde kırılma yükünü 28.7 kN, lifli olanlarda 42.9 kN olarak elde etmişlerdir, yani %49.48 kırılma yükünün arttığını belirtmişlerdir. Lifler etriyenin yokluğu nedeniyle daha yüksek katkı sağlamıştır. 2ø16 donatılı lifsiz kirişlerde kırılma yükü 72.8 kN iken, çelik fiberli kirişlerde kırılma yükü 101.8 kN'a çıkmış ve artış %38 olmuştur. 2ø8 donatılı lifsiz kiriş ile 2ø16 donatılı lifsiz kiriş kırılma yükleri 28.7 MPa'dan 72.8 MPa'ya çıkmış artan donatı oranı 2.54 kat kırılma yükünü artırmıştır. Lifli ve 2ø8 donatılı kirişte kırılma yükü 42.9 kN iken, lifli ve 2ø16 donatıya sahip kirişte kırılma yükü 101.8 kN ulaşmış, yani artış 2.37 kat olmuştur. Lifli donatılı serideki artış ise daha az olmuştur.

Karaca (1996) yaptığı çalışmada, 350 kg/m³ çimento ve su/çimento oranı 0.5

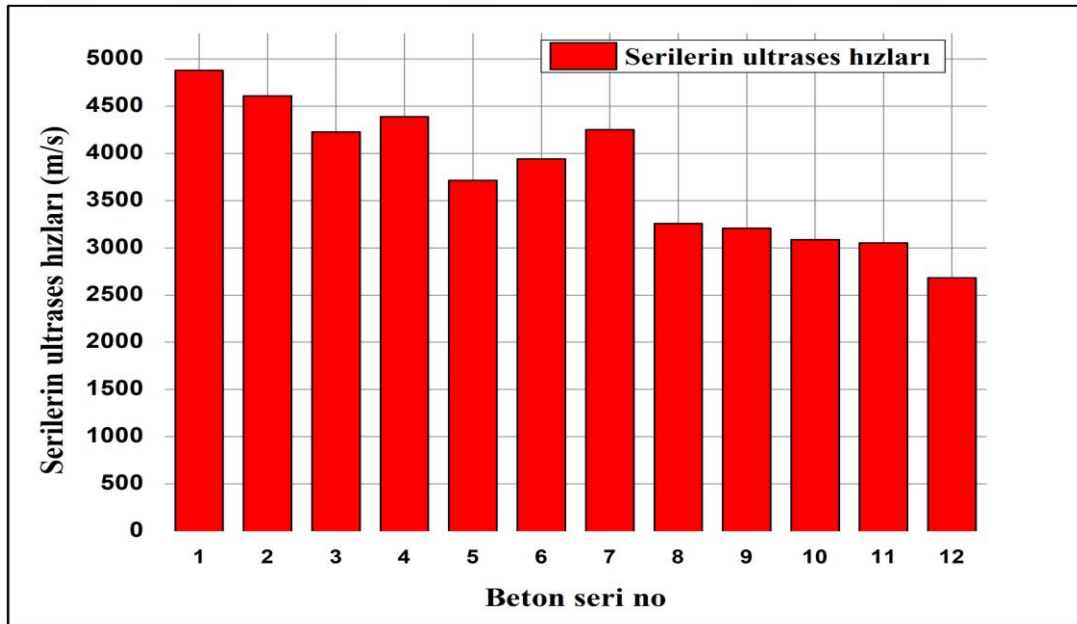
olan ortalama 19 MPa basınç dayanımlı hafif betonlar ve ayrıca ortalama 39 MPa olan geleneksel betonlar üretmiş ve bu betonları donatısız, donatılı, etriyeli ve etriyesiz kirişlerde kullanmıştır. 100x200x2100 mm boyutlarında ürettiği kirişlerde, 4 eksenli eğilme uygulamış ve deneysel olarak göçme momentlerini elde etmiştir. Donatısız ve hafif beton kullanarak ürettiği kirişlerde deneysel göçme momentini 1.65 kN.m ve geleneksel betonlarla ürettiği kirişlerde bu değeri 1.97 kN.m olarak elde etmiştir. Çekme bölgesinde etriyesiz 1ø8 nervürlü donatı kullandığı hafif betonlu kirişlerde ise göçme momentini 4.69 kN.m ve geleneksel betonla üretilen kirişte 5.19 kN.m olarak bulmuştur. Çalışmasında ayrıca çekme bölgesinde 2ø8, basınç bölgesinde 2ø10 ve etriye olarak ø8/10 nervürlü donatı kullanarak ürettiği kirişlerin hafif betonlu olanlarında göçme momentini 7.87 kN.m ve geleneksel betonlu olanlarda 8.21 kN.m olduğu görülmektedir. Donatısız hafif betonlarla üretilenlere göre çekme bölgesine 2ø8 donatı koyulan hafif kirişlerin göçme momentlerinin yaklaşık %377 arttığı, donatısız geleneksel betonlarla üretilen kirişe göre de 2ø8 çekme bölgesinde donatı içerenin yaklaşık %317 fazla olduğunu belirtmiştir. Ayrıca donatı miktarı artan hem hafif kirişlerin hem de geleneksel kirişlerin göçme momentlerinin arttığı çalışmanın bulguları arasındadır. Yapılan bu çalışmada geleneksel betonun basınç dayanımı hafif betonun yaklaşık iki katı olmasına rağmen, deneysel göçme momenti nervürlü donatılı geleneksel betonarme kirişlerde, donatılı hafif betonarme kirişlerden en fazla %14 fazladır.

6.2.5. Serilerin ultrases geçiş hızları

Silindir numunelere uygulanan ultrases deneylerinden elde edilen sonuçlar, bu serilere ait kuru birim hacim ağırlıklar ve 28 günlük basınç dayanımları ile birlikte aşağıda Çizelge 6.17'de birlikte verilmiştir. Şekil 6.27'de serilerin ultrases hızları grafik halinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.17. Serilere ait kuru birim hacim ağırlıklar, 28 günlük küp basınç dayanımları ve ultrases hızları

Beton seri no (İsmlendirme)	Kuru birim hacim ağırlık (g/dm ³)	28 günlük küp basınç dayanımı (MPa)	Serilere ait ultrases hızları (m/s)
1 (K)	2352	81.12	4880
2 (Kkl)	2338	79.88	4610
3 (K2NP)	2117	53.32	4228
4 (K2NPkl)	2132	52.56	4390
5 (KNP)	1951	41.59	3714
6 (KNPkl)	1953	41.89	3940
7 (KNPul)	1946	38.77	4252
8 (KN3P)	1747	31.66	3259
9 (KN3Pkl)	1765	32.92	3208
10 (KP)	1369	20.24	3086
11 (KPkl)	1414	22.67	3053
12 (KPsl)	1312	17.04	2684



Şekil 6.27. Serilere ait ultrases hızlarının grafikte gösterimi

Grafik incelendiğinde 1 nolu (K) kontrol serisinin ultrases hızının en yüksek değeri verdiği görülmektedir. Bu serinin betonları, içyapılarının dolu olması ve normal agregaya kullanılması nedeniyle yüksek değerler almıştır. 2 nolu (Kkl) serisi, ultrases hızı bakımından, 1 nolu (K) seriden biraz düşüktür, çünkü bu seri içinde kullanılan kısa çelik lifler, beton içerisinde bir miktar boşluk oluşturmuştur ve boşluk yapısı ultrases hızlarını düşürmektedir.

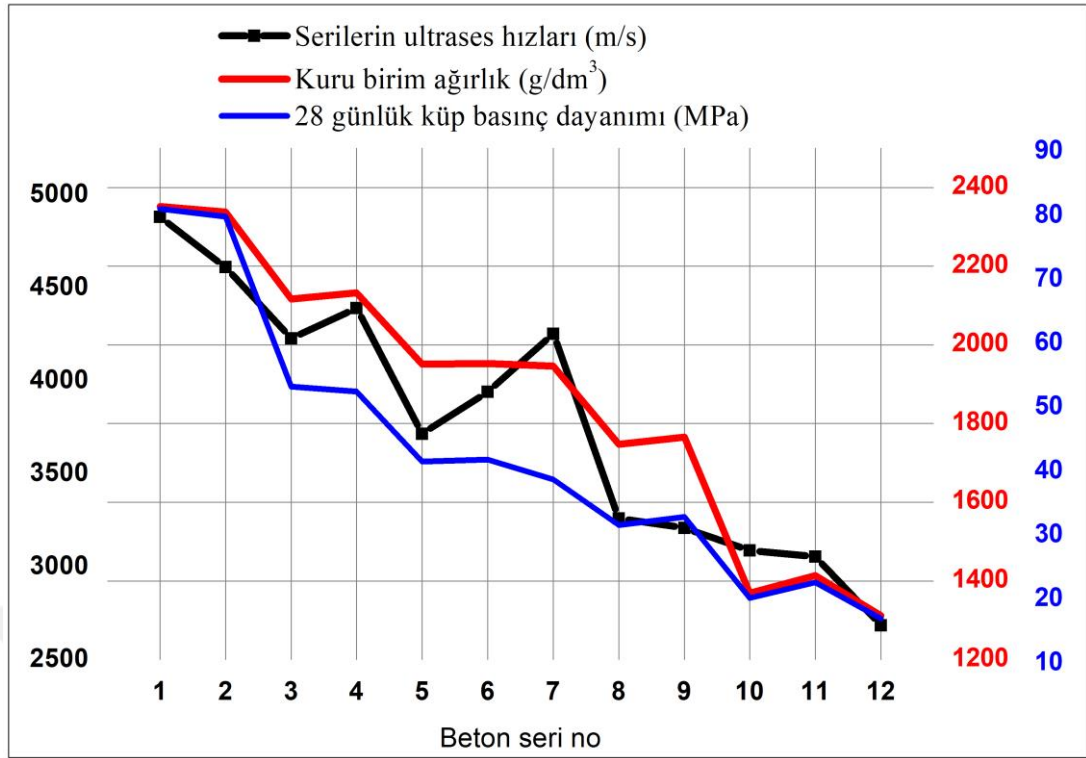
3 nolu (K2NP) seri, beton karışımında kullanılan agreganın hacminin üçte birinin pomza agregası içermesi ve pomzanın boşluklu yapısı nedeniyle, ilk iki seriye oranla daha düşük ultrases hızına sahiptir. Pomza agregasının kullanımı, ultrases hızlarını azaltan bir etkiye sahiptir. 4 nolu seri (K2NPkl), 3 nolu seriye göre bir miktar daha yüksek ultrases hızına sahiptir, bunun nedeni olarak pomzanın oluşturduğu boşlukların bir miktar kısa lifle doldurularak iletimin artmış olabileceğidir.

5 nolu (KNP) serisinin agreganın hacminin yarısının pomza agregası olması, ultrases hızını daha da aşağılara çekmiştir. 6 nolu (KNPkl) serisinde kısa çelik lifler, ultrases hızını 5 nolu seriye göre bir miktar artırırken, esas artış uzun çelik lifin beton karışımında kullanıldığı 7 nolu (KNPul) seride olmuştur. Pomza boşluklarının uzun çelik liflerin yerleşimine imkan tanıdığı ve bu liflerinde geçiş hızını artırdığı düşünülmektedir.

8 nolu (KN3P) seride, pomzanın hacminin fazlasıyla artmış olması, ultrases hızını iyice düşürmüştür, hatta 9 nolu (KN3Pkl), yani bu serinin kısa çelik lif içeren serisinde de kısa liflerin, artan boşluklar nedeniyle ultrases hızına olan olumlu etkisinin kaybolduğu görülmüştür.

10 nolu (KP) seri ve 11 nolu (KPkl) seri tamamı pomza agregası olmaları nedeniyle çok düşük ultrases hızları sergilemişlerdir. 11 nolu seride bulunan kısa çelik liflerin yine hız geçişine olumlu bir etkisinin olmadığını hatta hızın az da olsa düştüğü görülmektedir. 12 nolu seri (KPsl), hem tamamı pomza olması, hem de sentetik lif içermesi nedeniyle daha boşluklu bir beton yapısı göstermektedir ve bütün seriler içinde en düşük ultrases hızına sahip seri olmuştur.

Şekil 6.28'de serilerin ultrases hızları, kuru birim hacim ağırlık ve 28 günlük basınç dayanımıyla birlikte sunulmuştur.



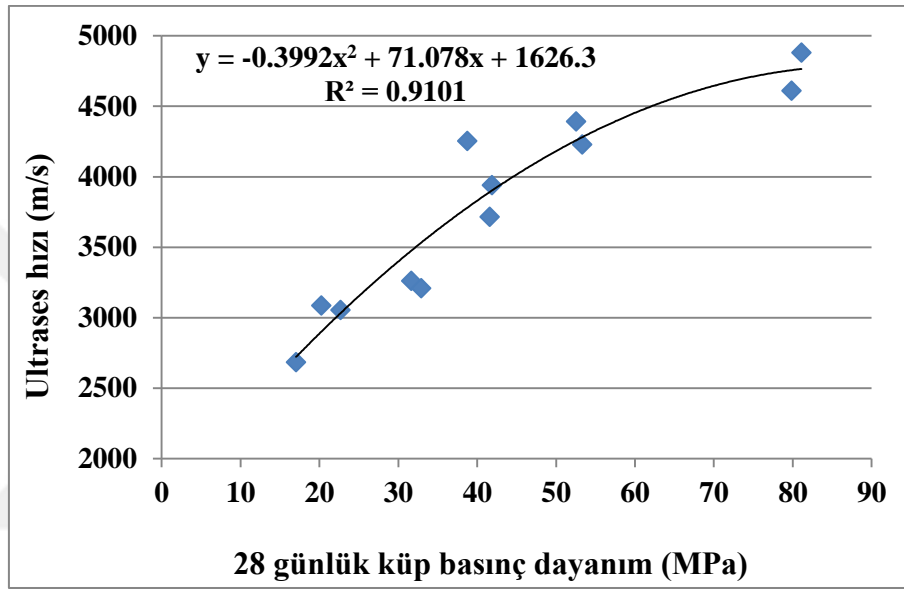
Şekil 6.28. Serilere ait ultrases hızlarının, kuru birim ağırlık ve 28 günlük küp basınç dayanımı ile ilişkisi

Şekil 6.28’de görüldüğü üzere bazı serilerde küçük sapmalar olsa da, genel olarak kuru birim ağırlığın azalması hem ultrases hızlarını hem de basınç dayanımlarını azaltmaktadır.

Kuru birim ağırlıklar, pomza miktarının artmasıyla azalmış ve ultrases hızları da malzemede oluşan boşluklar nedeniyle azalmıştır. Özellikle 7. seri (KNPul) yani uzun lif içeren seri, hem benzer karışıma sahip olan, ancak kısa çelik lif içeren 6. seri (KNPkl) ve hem de lifsiz 5. seriden (KNP) az da olsa yüksek bir ultrases hızı sergilemiştir. Yarı yarıya pomza içeren boşluklu yapıda, uzun çelik liflerin hız dağılımını artırmış olması bunun nedeni olarak düşünülebilir. Bunun yanında bazı kısa lifli serilerde, lifsiz seriye göre kuru birim ağırlıklar bir miktar artmışsa da, ultrases hızlarının azalmış olduğu görülmektedir. 8. seri (KN3P) ile 9. seri (KN3Pkl) ve 10. seri (KP) ile 11. seri (KPkl) değerleri incelendiğinde, kısa lifler, kuru birim ağırlıkları artırmış olmalarına rağmen ultrases hızları düşük kalmıştır, çünkü pomza oranı arttıkça, lifler boşluklarda daha kolay yer bulmakta ve birbirlerine olan temasları azalmaktadır ve bu da ultrases hızlarını düşürmektedir.

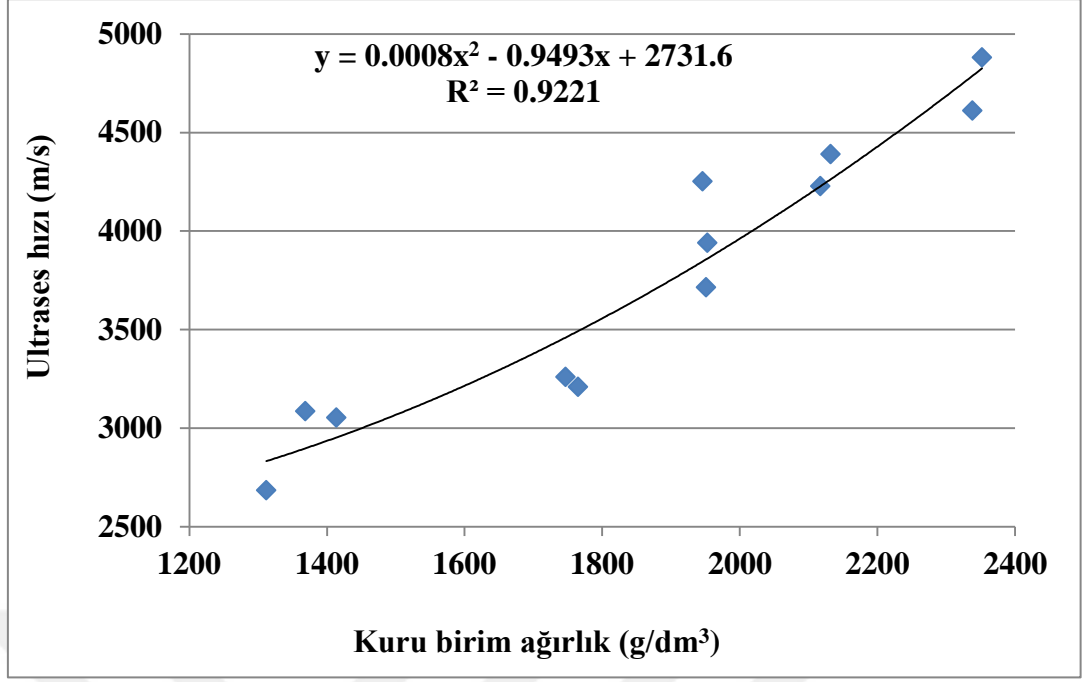
Lif kullanılmayan serilerde pomza oranı arttıkça, hem basınç dayanımı hem de ultrases hızları azalmıştır, ancak lif kullanılan seriler, lifsiz serilere göre basınç ve

ultrases bakımından bazen düşük bazen yüksek değerler alabilmektedir. Buna neden olarak liflerin beton karışımlarında homojen olarak dağılmamış olması gösterilebilir. Örneğin, uzun lif kullanılan seri 7. seri basınç dayanımını hem kısa lifli hem de liffsiz seriye göre azaltmışken, ultrases hızını belirgin bir şekilde artırmıştır. 11. seri kısa lif içermesine rağmen basınç dayanımını artırmış, ancak ultrases hızını azaltmıştır. Ultrases hızı, basınç ve kuru birim ağırlıklar bakımından en kötü değerler 12. Seride (KPsI) ölçülmüştür. Şekil 6.29'da serilere ait ultrases hızları ile küp basınç dayanımları arasındaki ilişki gösterilmiştir



Şekil 6.29. Serilerin ultrases hızları ile 28 günlük küp basınç değerleri ilişkisi

Şekil 6.29'dan görüldüğü üzere beton serilerinin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasında regresyon analizi sonucunda elde edilmiş bir bağıntı mevcuttur. Elde edilen bağıntıda; $y = -0.3992x^2 + 71.078x + 1626.3$ ifadesiyle, basınç dayanımı x olarak (MPa) biriminde verilmiş bir serinin, yaklaşık ultrases hızını (m/s) biriminde y değeri olarak hesaplayabiliriz. Aralarında bulunan mevcut uyum hem grafikten hem de $R^2=0.9101$ değerinden anlaşılmaktadır. Şekil 6.30'da da ultrases hızları ile kuru birim ağırlıklar arasındaki ilişki incelenmiştir.



Şekil 6.30. Serilere ait ultras ses hızları ile kuru birim ağırlık arasındaki ilişki

Şekil 6.30'dan anlaşılacağı üzere kuru birim ağırlıklar ile ultras ses hızları arasında daha yüksek değerli R^2 oluşmuştur. Aralarında $y=0.0008x^2-0.9493x+2731.6$ eğrisel bağıntı ortaya çıkmıştır ve bu bağıntıda x yerine koyulacak (g/dm^3) cinsinden kuru birim ağırlık, y değerinin, yani (m/s) cinsinden ultras ses değerinin güçlü olarak tahmin edilmesini sağlayacaktır. Kuru birim ağırlıklar ile ultras ses hızı arasında oluşan ilişkinin, ultras ses hızı ile basınç ilişkisinden biraz daha güçlü olduğu görülmüştür.

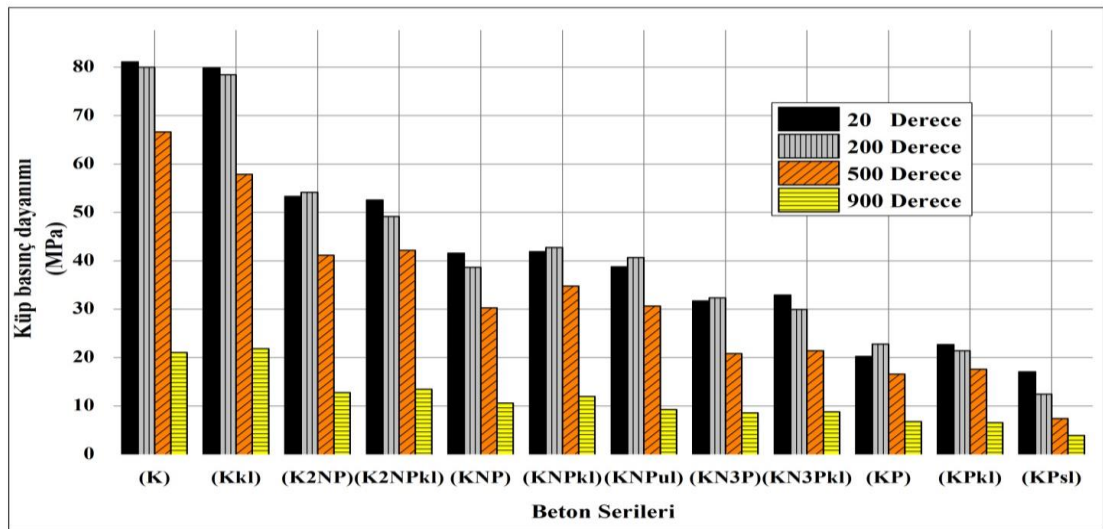
Genel olarak ultras ses hızı yüksek olan betonların basınç dayanımı da yüksektir. Ancak bu durum beton bileşimlerine (çimento miktarı, agrega tipi, beton nemi v.b) ve deney şartlarına da bağlıdır (Sağsöz, 2007). Ultras ses hızlarıyla kuru birim ağırlıklar arasında da güçlü ilişki mevcuttur.

6.2.6. Beton serilerinin yüksek sıcaklık dayanımları

Küp numuneler üzerine yapılan yüksek sıcaklık deneyleri incelemeleri, 20, 200, 500 ve 900 °C deney sıcaklıkları sonrası ölçülen basınç değerleri ve ağırlık kayıplarını içermektedir. Aşağıda Çizelge 6.18'de sıcaklıklara göre ölçülen basınç dayanımları verilmiştir. Şekil 6.31'de, Çizelge 6.18'de verilen değerler grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.18. Serilere ait 20, 200, 500 ve 900 °C’de elde edilen basınç değerleri

Beton seri no (İsimlendirme)	20 °C basınç dayanımı (MPa)	200 °C basınç dayanımı (MPa)	500 °C basınç dayanımı (MPa)	900 °C basınç dayanımı (MPa)
1 (K)	81.12	79.96	66.64	21.02
2 (Kkl)	79.88	78.44	57.84	21.82
3 (K2NP)	53.32	54.14	41.17	12.72
4 (K2NPkl)	52.56	49.16	42.16	13.41
5 (KNP)	41.59	38.67	30.24	10.86
6 (KNPkl)	41.89	42.76	34.77	11.96
7 (KNPul)	38.77	40.65	30.60	9.23
8 (KN3P)	31.66	32.33	20.81	8.55
9 (KN3Pkl)	32.92	29.92	21.39	8.79
10 (KP)	20.24	22.78	16.55	6.76
11 (KPkl)	22.67	21.41	17.55	6.56
12 (KPsI)	17.04	12.43	7.37	3.88



Şekil 6.31. Serilere ait 20, 200, 500 ve 900 °C’de elde edilen basınç değerlerinin grafik gösterimi

Çizelge 6.18 ve Şekil 6.31’den görüldüğü üzere, yüksek sıcaklıklar sonucunda basınç dayanımları incelendiğinde, 200 °C sonrası sıcaklıklarda bazı beton serilerinin

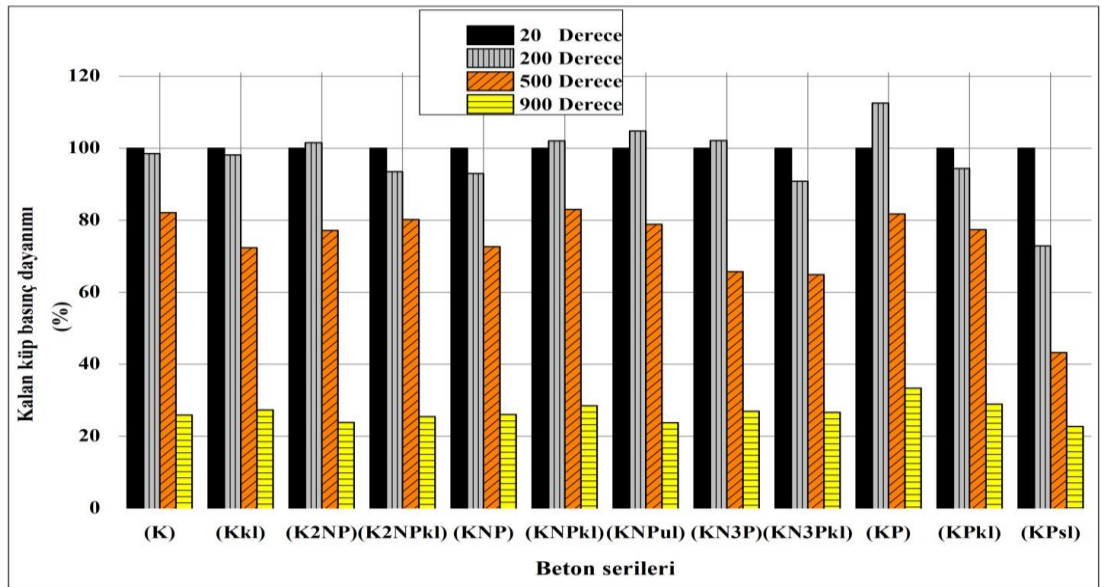
20 °C’de ölçülen basınç değerlerinden daha yüksek basınç değerlerine çıktığı görülmektedir. 3. seri (K2NP), 6. seri (KNPkl), 7. seri (KNPul), 8. seri (KN3P) ve 10. seri (KP) bu durumun örnekleridir. Bu durum çeşitli çalışmalarda da karşımıza çıkmaktadır (Yazıcı ve İnan, 2000; Uysal, 2010; Taşkın, 2016). Acay (2010), KYB’da sıcaklığın 400 °C’den fazla artması durumunda basınç dayanımlarında azalmalar oluştuğunu belirtmiştir. Hızal (2010) ve Gönen (2009), 300 °C’ye kadar sıcaklığın artmasının bazı beton serilerinde basınç dayanımında artışa neden olduğunu bildirmişlerdir. Buna neden olarak, sıcaklığın düşük kalması ve düşük nem ortamının çimentonun hidratasyonunu geciktirmesi ve yüksek sıcaklığın bu hidratasyonu tamamladığı gösterilmektedir. Genel olarak 200 °C’de basınç dayanımı artan bu 5 seri dışında kalan diğer serilerde çok az dayanım kaybı oluşmuştur. Yukarıda belirtilen seriler dışında diğer seriler, 200 °C, 500 °C ve 900 °C’de dayanım kayıpları yaşamıştır. 500 °C’ye kadar olan kayıplar 12. seri (KPs1), yani tamamı pomzalı ve sentetik lifli seri dışında düşük kalmıştır, çünkü bu 12. seri, boşluklu yapısı ve sentetik liflerinin yüksek sıcaklıkta daha çok zarar görmeleri nedeniyle basınç dayanımlarında fazlaca kayıp yaşamıştır. 12. serinin içerdiği sentetik liflerin ergime derecesi 440 °C olduğundan sıcaklık artışları nedeniyle daha fazla dayanım kaybına uğramıştır. Özellikle 900 °C’de sentetik lifli serinin numuneleri basınç dayanımları tayini için kırıldığında, bu sentetik liflerin yanmış ve kömürleşmiş olduğu görülmüştür. Diğer 11 serinin 500 °C’ye kadar dayanımlarını büyük oranda koruduğu ve 500 °C’den sonra yükseltile 900 °C’de ciddi basınç dayanım kayıpları yaşadığı gözlenmiştir.

Çelik lif içeren serilerin, sıcaklıklar sonrası basınç dayanımı deneyleri sonucunda genel olarak bütünlüğünü koruduğu, hatta 900 °C’den sonra kırılmalarda bile numunelerin parçalanarak ayrılmadığı gözlenmiştir. Lifsiz serilerin ve özellikle pomza oranı yüksek serilerin 900 °C’den sonra gevrek kırılmaya maruz kaldığı ve daha fazla parçalara ayrıldığı görülmüştür.

Çizelge 6.19’da beton serilerinin 20 °C’de olan dayanımları %100 alınarak, diğer sıcaklıklardaki kalan basınç dayanımları bunun % olarak verilmiştir. Şekil 6.32’de de bu değerler grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.19. Serilerin 20 °C basınç dayanımlarına göre 200, 500 ve 900 °C'deki basınç dayanımları oranları

Beton seri no (İsimlendirme)	20 °C kalan dayanımı (%)	200 °C kalan dayanımı (%)	500 °C kalan dayanımı (%)	900 °C kalan dayanımı (%)
1 (K)	100	98.57	82.15	25.91
2 (Kkl)	100	98.20	72.41	27.32
3 (K2NP)	100	101.54	77.21	23.86
4 (K2NPkl)	100	93.53	80.21	25.51
5 (KNP)	100	92.98	72.71	26.11
6 (KNPkl)	100	102.08	83.00	28.55
7 (KNPuI)	100	104.85	78.93	23.81
8 (KN3P)	100	102.12	65.73	27.00
9 (KN3Pkl)	100	90.89	64.98	26.70
10 (KP)	100	112.55	81.77	33.40
11 (KPkl)	100	94.44	77.42	28.94
12 (KPsI)	100	72.95	43.25	22.77



Şekil 6.32. Serilerin 20 °C basınç dayanımları esas alınarak, 200, 500 ve 900 °C'deki basınç dayanımı oranlarının grafik gösterimi

Çizelge 6.19 ve Şekil 6.32 incelendiğinde, basınç dayanımı çok boşluklu yapısından dolayı düşük olan 12. seri (KPsl) dışındaki diğer serilerde 200 °C'deki basınç dayanımlarının %90.89 ile %112.55 arasında değiştiği görülür. Tamamı pomzalı 10. serinin (KP), 200 °C'de basınç dayanımının %12.55 arttığı görülür. Bunun nedeni olarak tamamı pomzalı bu serinin yüksek su oranı nedeniyle 200 °C'de hidratasyonunun tamamlanması olarak düşünülebilir. Bu sıcaklıkta en fazla kayıp 9. seride (KN3Pkl) oluşmuştur ve diğer çelik lifli serilerde kayıpların düşük, bu seride bir miktar yüksek olması sadece lif dağılımlarının homojen olmamasına bağlanabilir. 12. seri istisna tutulduğunda diğer 11 serinin basınç dayanımlarının 500 °C'deki kalan yüzdeleri %64.98 ile %83 gibi yüksek değerleri göstermektedir. Beton 500 °C'ye kadar büyük oranda yapısını korumakta ve basınç dayanımlarındaki kayıp sınırlı kalmaktadır.

Gerçek dayanım kayıpları 900 °C'de oluşmuştur, çünkü kalan dayanımlar, bütün seriler gözönüne alındığında %22.77 ile %33.40 arasına gerilemiştir. Dayanımını en fazla koruyan seri 10. seri (KP) yani tamamı pomzalı seri olmuştur. 12. seri (KPsl) hem boşluklu yapısı hem de eriyen sentetik lifleri dolayısıyla en düşük dayanımı vermiştir. Basınç deneyi sonunda sentetik liflerin kül olduğu görülmüştür. Burada 900 °C'de dikkat çeken üç önemli unsur vardır ve bunlardan birincisi pomza oranı yüksek olan serilerin genel olarak kalan basınç dayanımlarının, normal agregalı serilere göre yüksek olmasıdır. Basınç dayanımı 20 °C'de en yüksek olan 1. seri (K), 900 °C'de yalnızca bu basıncın %25.91'ini korurken, pomza oranı yüksek seriler; 5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl), 8. seri (KN3P), 9. seri (KN3Pkl), 10. seri (KP) ve 11. seri (KPkl), bu kontrol serisinden yüzde olarak daha az dayanım kaybetmiştir. Yani yangın dayanımları bakımından pomza agregalı beton serilerinin genel olarak, normal agregalı beton serilerinden daha iyi olduğu ortaya çıkmaktadır. İkinci önemli dikkat çeken konu ise çelik lifli serilerin 900 °C'de, lifsiz serilerden genel olarak yüksek dayanımlı kaldığıdır. 9. seri (KN3Pkl) ve 11. seri (KPkl), kendi lifsiz benzerlerinden bir miktar düşük dayanım yüzdesi göstererek istisna durum oluşturmuştur. Buna neden olarak pomza oranı yüksek bu iki serinin içinde liflerin köprü görevini bir miktar kaybettiği şeklinde düşünülebilir. 7. seri (KNPul)'de hem lifsiz seriden hem de kısa lifli seriden daha az dayanım yüzdesine sahiptir ve bunun nedeninin yüksek sıcaklıkta bir miktar büzülen pomza agregası ile uzun liflerin yerleşim sırasında daha fazla boşluğa neden olması gösterilebilir. Bu seriler dışında

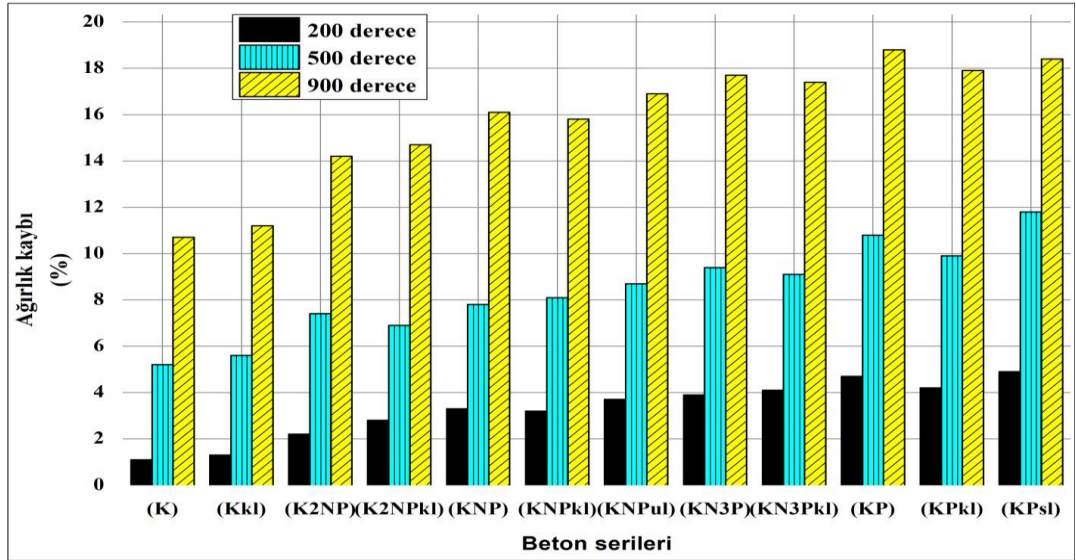
lifli serilerin genel olarak yüksek ısı karşısında daha yüksek dayanım gösterdiği söylenebilir. Üçüncü önemli konu ise her sıcaklık sonrası basınç dayanımında lifler sayesinde çok fazla parçalanmayan numunelerin 900 °C sonrasında genel bütünlüğünü korumuş olmalarıdır. Lifler serilerin basınç deneyi sonrası parçalanarak dağılmasını engellemektedir.

Bu konuda yapılmış bazı çalışmalarda şu sonuçlar görülmüştür. Yazıcı ve arkadaşları, pomzalı harçların yüksek sıcaklıkta dayanımını inceledikleri çalışmada, 300 °C'ye kadar dayanımların genel olarak arttığını, 600 °C'den sonra ise pomzalı harçların % 20-40 arasında dayanım kaybettiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada normal kumlu harçların 600 °C'den sonra %60-70 arasında dayanım kaybettiğini yani pomza ile üretilen harçların yüksek ısıya daha dayanıklı olduğunu söylemektedirler (Yazıcı vd, 2000). Neville (1995), 600 °C'den sonra hafif agregaların, normal agregaya göre daha üstün olduğunu belirtmiştir. 800 °C'de hafif betonların kalan dayanımlarının, normal betonlardan fazla olduğu Sancak vd (2005)'de yapılan çalışmanın bir sonucudur. Çünkü çalışmada bu hafif betonların düşük termik genleşme katsayısına sahip olduğu vurgulanmıştır.

Çizelge 6.20'de sıcaklıklar sonunda oluşan ağırlık kayıpları 20 °C'de serilerin mevcut ağırlıkları, %100 kabul edilerek diğer serilerin ağırlık kayıpları değişimi (artış, azalış olarak) gösterilmiştir. Şekil 6.33'de Çizelge 6.20'de verilen bu değerler grafik olarak sunulmuştur.

Çizelge 6.20. Sıcaklıklar sonunda oluşan ağırlık kayıplarının yüzdesi (20 °C’de olan ağırlıkları esas alınarak)

Beton seri no (İsimlendirme)	20 °C Ağırlık kaybı (%)	200 °C Ağırlık kaybı (%)	500 °C Ağırlık kaybı (%)	900 °C Ağırlık kaybı (%)
1 (K)	0	1.1	5.2	10.7
2 (Kkl)	0	1.3	5.6	11.2
3 (K2NP)	0	2.2	7.4	14.2
4 (K2NPkl)	0	2.8	6.9	14.7
5 (KNP)	0	3.3	7.8	16.1
6 (KNPkl)	0	3.2	8.1	15.8
7 (KNPuI)	0	3.7	8.7	16.9
8 (KN3P)	0	3.9	9.4	17.7
9 (KN3Pkl)	0	4.1	9.1	17.4
10 (KP)	0	4.7	10.8	18.8
11 (KPkl)	0	4.2	9.9	17.9
12 (KPsI)	0	4.9	11.8	18.4



Şekil 6.33. Sıcaklıklar sonunda oluşan ağırlık kayıplarının yüzdesi grafik olarak (20 °C’de olan ağırlıkları esas alınarak)

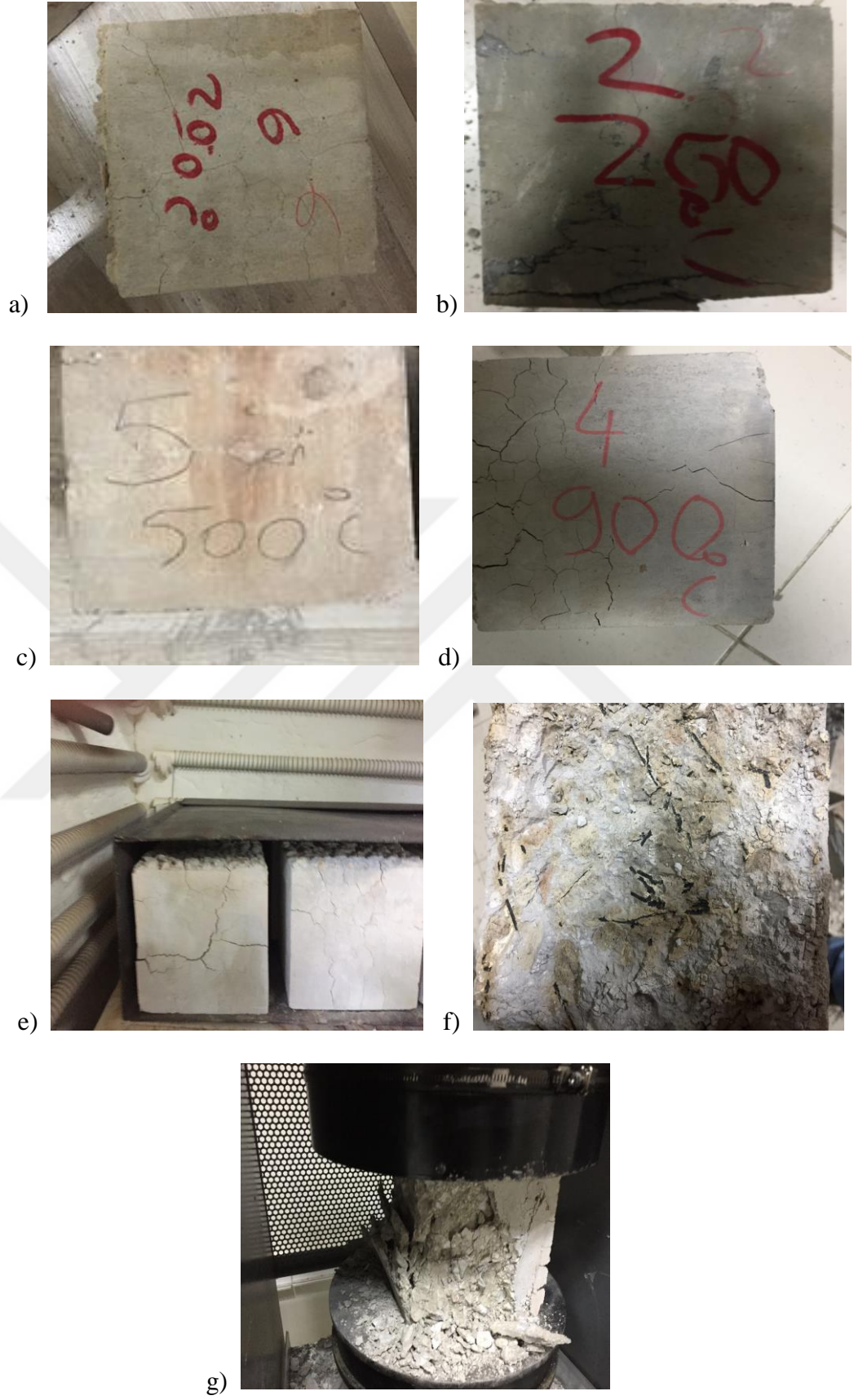
Ağırlık kayıplarına bakıldığında, tamamı normal agregalı betonların ve içerisinde normal agrega içeren beton serilerinin hem 200 °C hem de 500 °C'de daha az ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir. Beton içerisinde pomza agrega miktarı arttıkça bu iki sıcaklık için ağırlık kayıpları artmaktadır, ayrıca sıcaklık arttıkça da ağırlık kayıpları artmıştır. 500 °C'ye kadar pomza miktarı fazla beton serilerinin daha fazla ağırlık kaybına uğradığı, 900 °C'de ise normal agregası yüksek betonların kayıplarının arttığı görülmektedir. Örneğin tamamı normal agregalı kontrol serisi 1. seri (K), 500 °C'ye kadar ağırlığının %5.2 sini kaybetmişken, 900 °C'de bu kayıp %10.7'ye çıkmıştır. Tamamı pomza olan 10. seri (KP) gerçek ağırlık kaybının çoğunu 500 °C'de yaşamış ve bu kayıp %10.8'e ulaşmış, daha sonra 900 °C'de bu kayıp %18.8'e çıkmıştır. Pomza miktarı artan serilerde toplam ağırlık kaybının %50'den fazlası 500 °C'ye kadar oluşurken, normal agregalı beton serilerinde toplam kaybın %50 den fazlası 500 °C ile 900 °C arası oluşmaktadır.

Beton serileri yüksek sıcaklıklara maruz kaldıkça, hacim şekil ve renk olarak değişimlere uğramaktadır. Aynı zamanda beton numunelerde mikro ve makro çatlaklar oluşmaktadır. 200 °C ve 500 °C'de beton serilerinde genel olarak küçük çatlaklar gözlenmiştir. Bazı pomza oranı yüksek serilerde 500 °C'de ve serilerin çoğunluğunda 900 °C'de makro çatlaklar oluşabilmektedir. Özellikle 500 °C ve 900 °C'de beton serilerinin bazılarında sarı, açık veya koyu gri ya da mavi renk görülebilmektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan beton serilerinin bir kısmı genişlemeye, bir kısmı da büzölmeye uğramıştır. Özellikle 900 °C'de bazı serilerde küp numunelerin şekilleri fazlaca bozulmuştur. 900 °C'den sonra uygulanan basınç deneylerinden sonra lifsiz serilerde çok fazla dağılma olmaktadır. Çelik lifler serilerin basınç dayanımı sonrası parçalanmalarını önlemektedir.

Kırmetaşla üretilen betonların 250 °C ile 300 °C arasında boy uzamalarında fazla değişim olmadığı, ancak 550 °C'den sonra doğal kumun alfa kuvarsdan, beta kuvars dönüşüğünü ve betonda yaklaşık %15 hacim artışı olduğu bazı çalışmaların sonucudur (Akman ve Akçay, 2000). Uygunoğlu (2008), yaptığı çalışmada kırmetaşlı serilerin şekil değiştirme oranlarının en fazla 850 °C ile 900 °C arasında olduğunu, çünkü kireçtaşı kırmetaşların su kaybederek sönmemiş kireç yapısına yani, CaO dönüşüğünü ve açığa çıkan su buharının betonu genişlettiğini söylemiştir. Aynı çalışmada agrega ile çimento arasında ve agregada önemli çatlakların oluştuğunu belirtmiş, ilave olarak ince agregasını dere kumu, iri agregasını pomzayla ürettiği

betonların, genel eğilim olarak hacimsel büzülme yaptığını, çünkü pomzanın boşluklu yapısının buna neden olduğunu belirtmiştir. Şekil 6.34'de yüksek sıcaklık deneyinden bazı fotoğraflar verilmiştir, bu fotoğraflar şunlardır: a) 200 °C'de mikro çatlaklı seri, b) 200 °C'de basınç deneyi sonrası lifli olduğu için bütün kalan seri, c) 500 °C'de oluşmuş renk değişimi, d) 900 °C'de makro çatlaklar oluşmuş ve hacmi değişmiş seri, e) 900 °C ısıya çıkarılmış fırın içerisinde numuneler, f) 900 °C'den kırılma sonrası görülen kömürleşmiş sentetik lifler, g) 900 °C'den sonra uygulanan basınç deneyi sonunda gevrek kırılmaya uğramış bir numune.





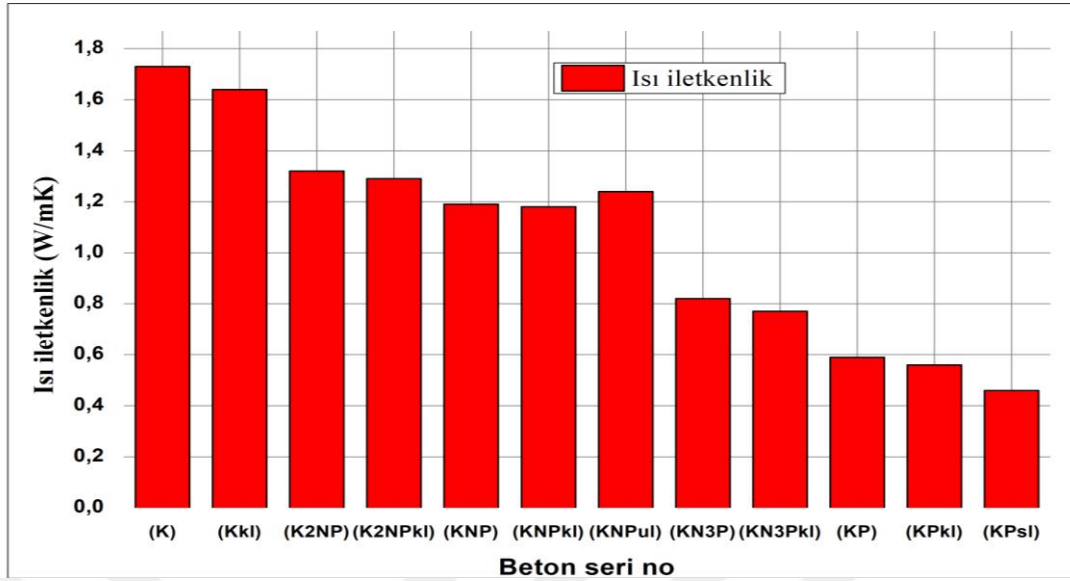
Şekil 6.34. Şekil, hacim ve renk değişimine uğrayan ve yüzeylerinde çatlaklar oluşan beton serilerinin fotoğrafları

6.2.7. Beton serilerinin ısı iletkenlik katsayıları

Özel kalıplarla üretilmiş beton prizma numunelere (300x300x60 mm boyutlu) uygulanan ısı iletkenlik deneyi sonucunda aşağıda Çizelge 6.21’de verilen değerler elde edilmiş ve bunlar Şekil 6.35’de grafik halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.21. Serilere ait kuru birim hacim ağırlıklar, 28 günlük küp basınç dayanımları ve ölçülen ısı iletkenlik hesap değerleri

Beton seri no (İsimlendirme)	Kuru birim ağırlık (g/dm ³)	28 günlük küp basınç dayanımı (MPa)	Isı iletkenlik (W/mK)
1 (K)	2352	81.12	1.73
2 (Kkl)	2338	79.88	1.64
3 (K2NP)	2117	53.32	1.32
4 (K2NPkl)	2132	52.56	1.29
5 (KNP)	1951	41.59	1.19
6 (KNPkl)	1953	41.89	1.18
7 (KNPuI)	1946	38.77	1.24
8 (KN3P)	1747	31.66	0.82
9 (KN3Pkl)	1765	32.92	0.77
10 (KP)	1369	20.24	0.59
11 (KPkl)	1414	22.67	0.56
12 (KPsl)	1312	17.04	0.46



Şekil 6.35. Beton serilerinin ısı iletkenlik değerleri grafiği

Çizelge 6.21 ve Şekil 6.35 incelendiğinde, genel olarak kuru birim ağırlıklar azaldıkça ısı iletkenlik değerinin azaldığı görölmektedir. Betonun ısı iletkenliği ile birim ağırlığı arasında doğru bir orantı mevcuttur ve birim ağırlık arttııkça ısı iletkenlik artar (Durmuş ve Aytekin, 1986).

Malzemede doluluk arttııkça ses, ısı iletimi ve dayanım artmaktadır ve yalıtım arzu edildiğinde boşluklu malzemeler kullanılmalıdır. Normal agregalar yerine, boşluklu yapıları nedeniyle pomza agregasının kullanımı, ısı iletkenlik değerini azaltan bir uygulamadır. Kontrol serisi 1. seri (K), normal agregayla üretildiğinden, daha dolu içyapısı nedeniyle en yüksek ısı iletkenliğine sahip seridir. 2. seri (Kkl), yani 1. serinin kısa lif içeren halinden belki daha yüksek bir ısı iletkenlik beklenebilirdi ancak, ısı iletkenlik katsayısı bir miktar düşmüştür, çünkü kısa çelik lifler dolu içyapılı 1. serinin içerisinde boşluk oluşturmuş ve bir miktar da beton birim ağırlığını azaltmıştır.

3. seride (K2NP), karışımında normal agrega hacminin üçte biri pomza agregasıyla değiştirildiğinden, ısı iletkenliğinde dikkat çeken bir kayıp görölmektedir. Kısa çelik lifli 4. seride (K2NPkl), ısı iletkenliği daha da azalmıştır. Hem pomza agregasının karışımında artırılması hem de kısa çelik liflerin katılması, serilerde ısı iletkenliğini azaltmıştır.

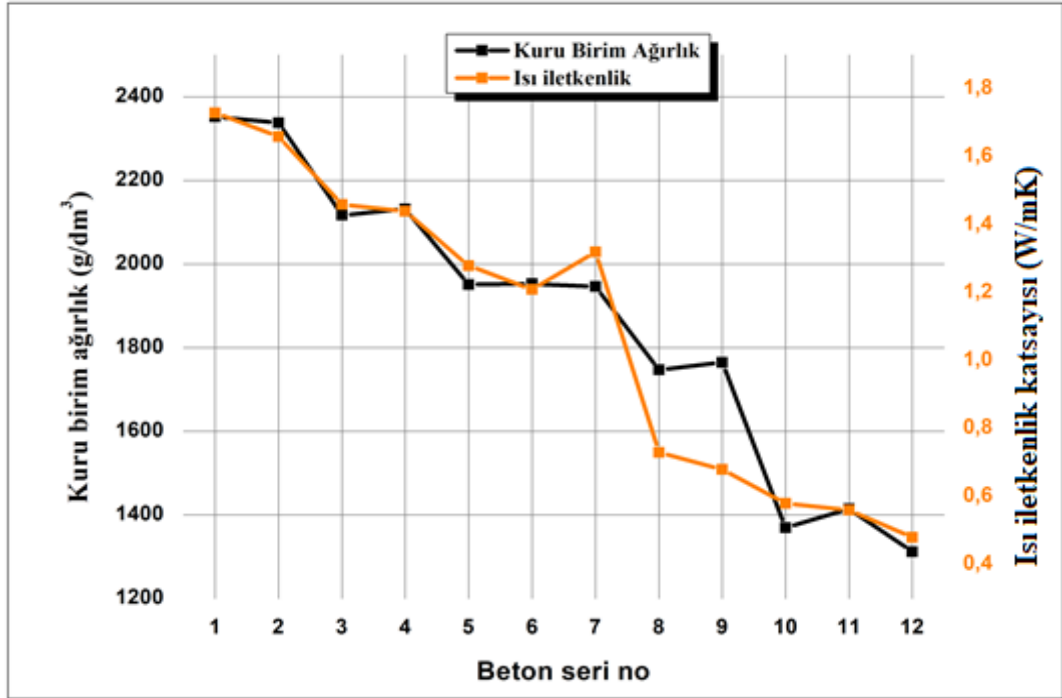
Kısa çelik liflerin eklenmesiyle kuru birim ağırlıkların arttığı serilerde bile, ısı

iletkenlikleri azalmıştır, çünkü pomzayla boşalan içyapılarda kısa çelik liflerin ısı iletkenlik katsayısını artırmadığı hatta az da olsa düşürdüğü görülmektedir.

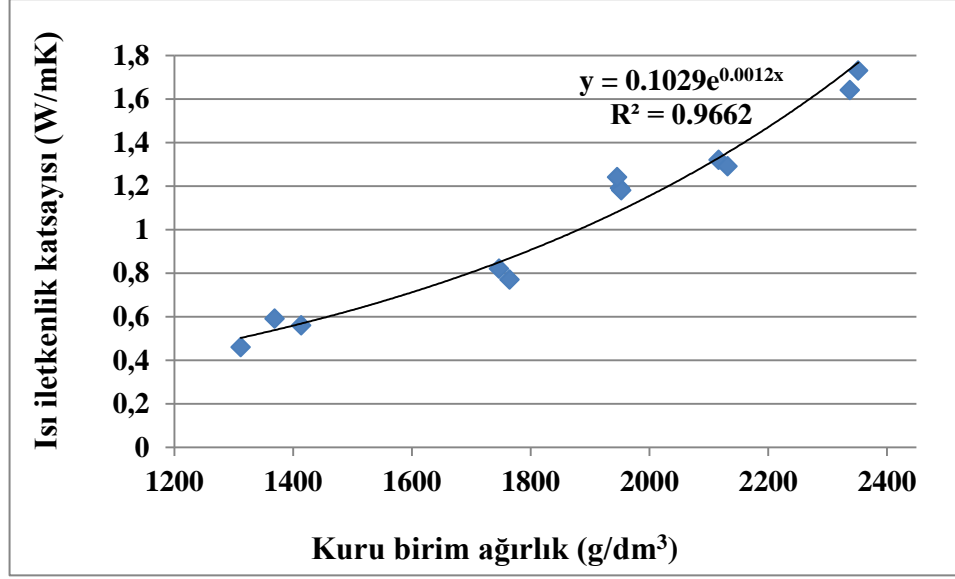
Dikkat çeken iki önemli seriden birincisi, 7. seri (KNPul), bir diğeri de 12. seridir (KPSl). 7. seride uzun liflerin beton karışımına eklenmesi, hem lifsiz 5. seri (KNP) hem de kısa lifli 6. seriden (KNPkl) daha fazla ısı iletkenliğini artırmıştır. Uzun liflerin, ısı iletkenliğini artırması birbiriyle olan temasıyla açıklanabilir. 12. serinin (KPSl), sadece pomzadan oluşması, sentetik lifli ve çok boşluklu hafif yapılı olması en düşük ısı iletkenliğinin nedenidir.

Isı iletkenliğinin azalması yani yalıtım özelliklerinin artması, yakıt kullanımının, çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın azalmasına, bireysel ve ülke ekonomisine katkıya neden olacak ve aynı zamanda yalıtımlı betonlar, yalıtım malzemelerine olan ihtiyacı azaltacaktır (Uygunoğlu, 2008).

Aşağıda Şekil 6.36 ve Şekil 6.37’de birim ağırlık ile ısı iletkenlik arasında var olan ilişki sırasıyla grafik olarak ve istatistiksel fonksiyon olarak ifade edilmiştir.



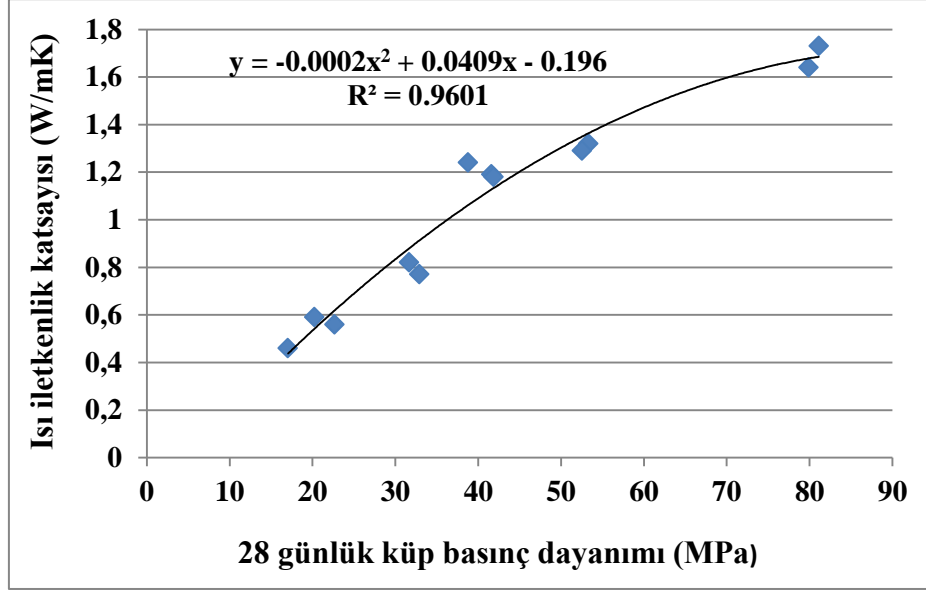
Şekil 6.36. Beton serilerinin ısı iletkenlik değerleri ile kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 6.37. Serilere ait ısı iletkenlik değerleri ile kuru birim ağırlık istatistiksel ilişkisi

Şekil 6.36'dan görüldüğü üzere kuru birim ağırlık ile ısı iletkenliği arasında çok güçlü bir ilişki vardır. 3. seride (K2NP), pomzanın beton serisine eklenmeye başlanmasıyla ısı iletkenliğinde belirgin bir azalma başlamıştır. 4. seriden (K2NPkl), 5. seriye (KNP) geçilmesi ve özellikle 7. seriden (KNPul), 8. seriye (KN3P) geçildiği durumlarda grafikte daha net düşüşler görülmektedir. Pomza miktarının beton karışımında artması birim ağırlığı azalttığı gibi ısı iletkenliğini de azaltmaktadır. 7. seri ile 8. seri arasında grafikte oluşan sert azalmanın nedeni, ısı iletkenliğini artırmış olan uzun liflerden sonra, pomza oranı artmış olan 8. seride ısı iletkenliğinin birden düşmesidir. 7. seride birim ağırlık azalsa da uzun liflerle artmış ısı iletkenlik değeri, 8. seri (KN3P) ve 9. seride (KN3Pkl) birim ağırlıkların daha da azalmasıyla dikkat çekici bir düşüş sergilemiştir.

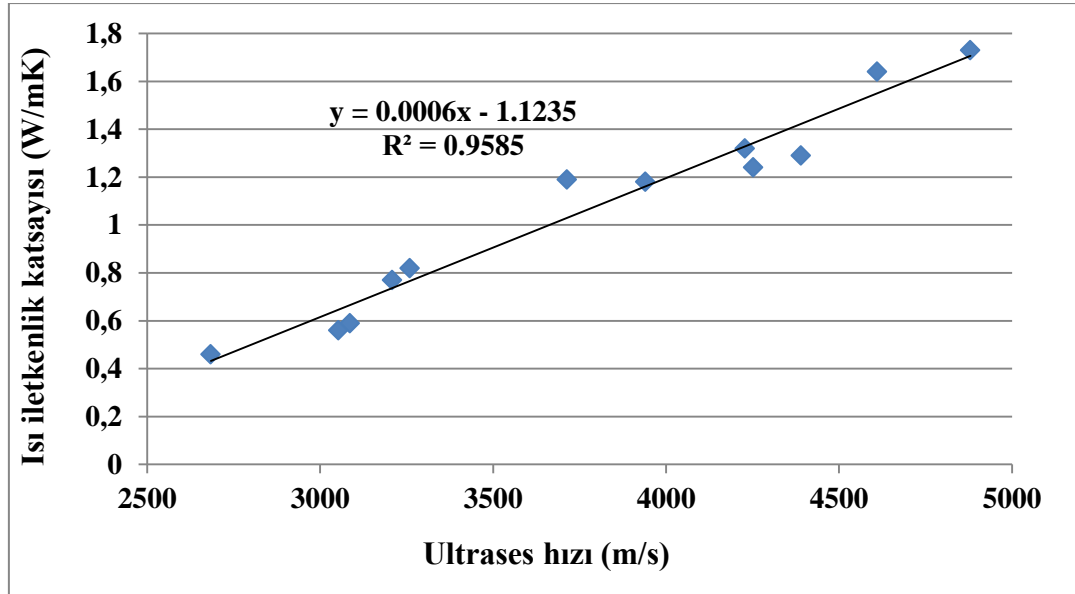
Şekil 6.37'de kuru birim ağırlık ile ısı iletkenliği regresyon ilişkisine bakıldığında, anlamlı bir bağ görülmektedir. Grafikten elde edilen $y=0.1029e^{0.0012x}$ bağıntısıyla, birim ağırlığın bilinmesi durumunda ısı iletkenliği çok yakın tahmin edilebilecektir, çünkü $R^2=0.9662$ gibi yüksek bir değer almıştır. Bu bağıntıda y değeri λ ile gösterilen ısı iletkenlik katsayısını (W/mK); x ise kuru birim ağırlığı (g/dm³) göstermektedir. Şekil 6.38'de ısı iletkenliği ile 28 günlük küp basınç dayanımları arasında kurulan ilişki gösterilmiştir.



Şekil 6.38. Isı iletkenlik katsayısı ile 28 günlük küp basınç dayanımı ilişkisi

Şekil 6.38'de oluşan eğri grafiğinin denklemi $y = -0.0002x^2 + 0.0409x - 0.196$ bağıntısıyla gösterilmiştir. Bu bağıntıda yine y; (W/mK) birimiyle λ ısı iletkenlik katsayısını ve x; 28 günlük küp basınç değerini (MPa) göstermektedir. Isı iletkenliği ile kuru birim ağırlık arasında kurulan istatistiksel ilişki yine güçlü bir belirlilik katsayısına ($R^2=0.9601$) sahiptir.

Şekil 6.39'da beton serilerinin ultrases hızı değerleri ile ısı iletkenlik katsayıları arasında oluşan bağ gösterilmiştir.



Şekil 6.39. Isı iletkenlik katsayısı ile ultrases hızı ilişkisi

Şekil 6.39'dan görüldüğü üzere, bağımsız değişken olarak ultrases hızının alındığı yani x değeri olarak alındığı durumda, bağımlı değişken ısı iletkenlik katsayısı, yani y değeri arasında doğrusal güçlü bir ilişki mevcuttur. Bağıntı x yerine koyulacak (m/s) biriminden ultrases hızı ile y değerini yani λ ısı iletkenlik katsayısını (W/mK) birimiyle tahmin edilmesine yarayacaktır. Bu bağıntının R^2 değeri (0.9585) yüksek bir belirliliği göstermektedir.

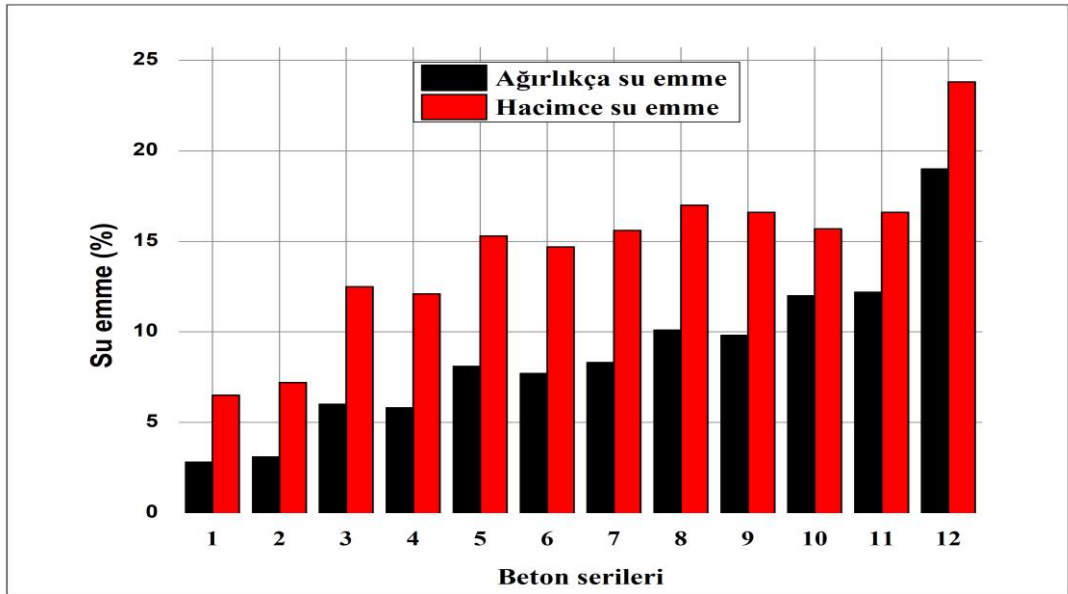
Isı iletkenlik katsayısı ve ultrases hızı üzerine yapılan deneylerin sonuçlarından görülmektedir ki, genel olarak beton yoğunluklarının yüksek olması, basınç dayanımını, ısı iletkenliğini ve ultrases hızlarını artırmaktadır. Beton içinde kullanılan pomza agregasının artmasıyla oluşan boşluklu yapı, kuru birim ağırlığın, basınç dayanımının, ultrases hızının ve ısı iletkenliğinin azalmasına neden olmaktadır. Beton içerisinde kullanılan çeşitli liflerin ise kuru birim ağırlığa, basınç dayanımına, ısı iletkenliğine ve ultrases hızlarına hem artırıcı hem de azaltıcı etkileri olmuştur.

6.2.8. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emmeleri

Beton serilerine uygulanan su emme deneyleri, küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve bu deneylere ait ağırlıkça ve hacimce su emme sonuçları Çizelge 6.22'de verilmiştir. Şekil 6.40'da ise veriler grafik şeklinde gösterilmiştir.

Çizelge 6.22. Beton serilerinin ağırlıkça ve hacimce su emme oranları

Beton seri no (İsimlendirme)	Doygun, kuru yüzey ağırlık (g)	Etüv kurusu ağırlık (g)	Su emme (Ağırlıkça) (%)	Su emme (Hacimce) (%)	Kuru birim Ağırlık (g/dm ³)
1 (K)	2393	2328	2.8	6.5	2352
2 (Kkl)	2385	2313	3.1	7.2	2338
3 (K2NP)	2201	2076	6	12.5	2117
4 (K2NPkl)	2205	2084	5.8	12.1	2132
5 (KNP)	2049	1896	8.1	15.3	1951
6 (KNPkl)	2051	1904	7.7	14.7	1953
7 (KNPuI)	2037	1881	8.3	15.6	1946
8 (KN3P)	1857	1687	10.1	17	1747
9 (KN3Pkl)	1864	1698	9.8	16.6	1765
10 (KP)	1468	1311	12	15.7	1369
11 (KPkl)	1524	1358	12.2	16.6	1414
12 (KPsI)	1490	1252	19	23.8	1312



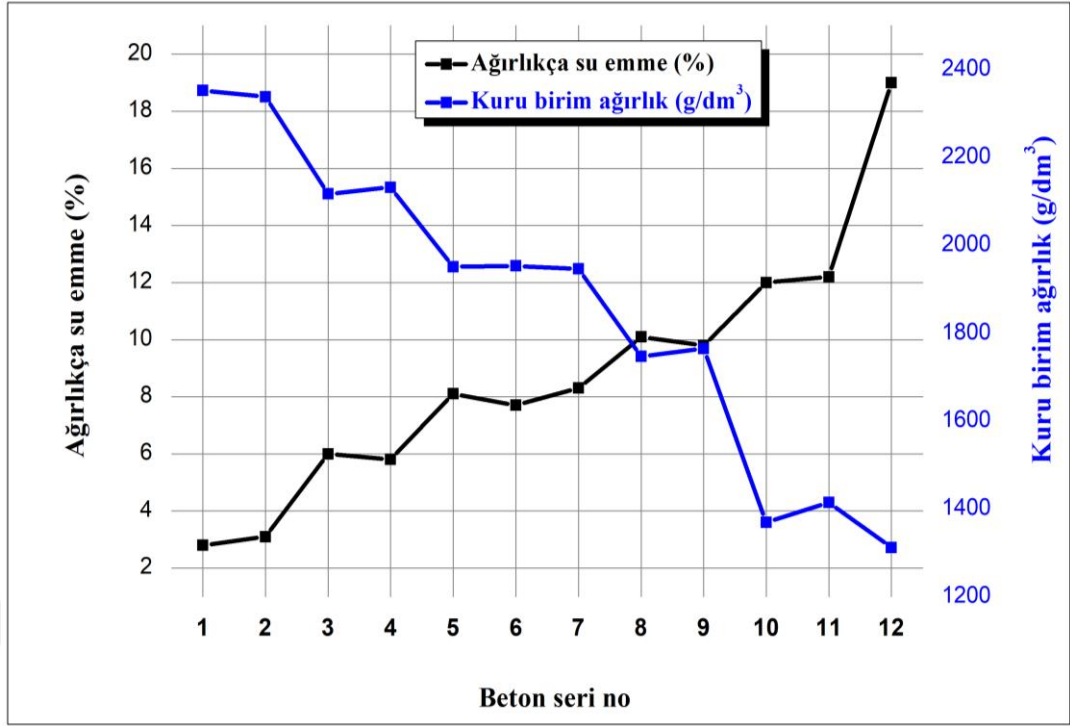
Şekil 6.40. Beton serilerinin su emme oranlarının grafik gösterimi

Beton serilerinin boşluk oranı, bağlayıcı miktarı, kullanılan toz çeşidi ve özellikle kullanılan agrega ve bu agreganın boşluk türü (kapalı, açık veya yarı açık) gibi birçok değişken su emme değerlerine etki edecek unsurların başındadır.

Deney sonuçları ile oluşturulan yukarıdaki Çizelge 6.22 ve Şekil 6.40'dan görüldüğü üzere, boşluklu pomza agregasının beton karışımları içindeki miktarının artmasıyla su emme yüzdeleri de artmıştır. Dolu içyapısıyla daha dayanıklı olan kırmataş içeren 1. seri (K), en düşük su emme oranına sahiptir. Kısa lifin eklendiği 2. seri (Kkl), liflerin beton içerisinde oluşturduğu bir miktar boşluk nedeniyle su emme değeri 1. seriden daha fazladır. Su emmenin esas artışı 3. seride (K2NP), yani karışıma pomza agregasının dahil edilmesiyle oluşmuş ve 4. seride (K2NPkl) karışıma eklenen ve doluluğu bir miktar artıran kısa lifler az da olsa bu su emme yüzdesini düşürmüştür. 5. seri (KNP) ve 6. seri (KNPkl) arasında da benzer durum görülmektedir. 7. seri (KNPul), içerdiği uzun lifler sebebiyle, daha fazla boşluğa ve daha fazla su emmeye neden olmuştur. 8. seri (KN3P) ve 9. seride (KN3Pkl) yine artan pomza miktarıyla su emmelerin arttığını, ancak kısa lifin bir miktar bu oranı düşürdüğü görülmektedir.

Tamamı pomzalı 10. seride (KP) artan su emme yüzdesinin, kısa lifin kullanıldığı 11. seride (KPkl) daha önceki serilerde olduğu gibi azalmadığı ve kullanılan kısa lifin su emme değerini artırdığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak kısa lifin betonun bir miktar ağırlığını artırmış olmasına rağmen boşluk yapısı içinde düzensizlik oluşturduğu gösterilebilir. Uzun sentetik lifli 12. seri (KPsl), hafif ve boşluklu yapısı nedeniyle su emme değeri en yüksek olan seridir.

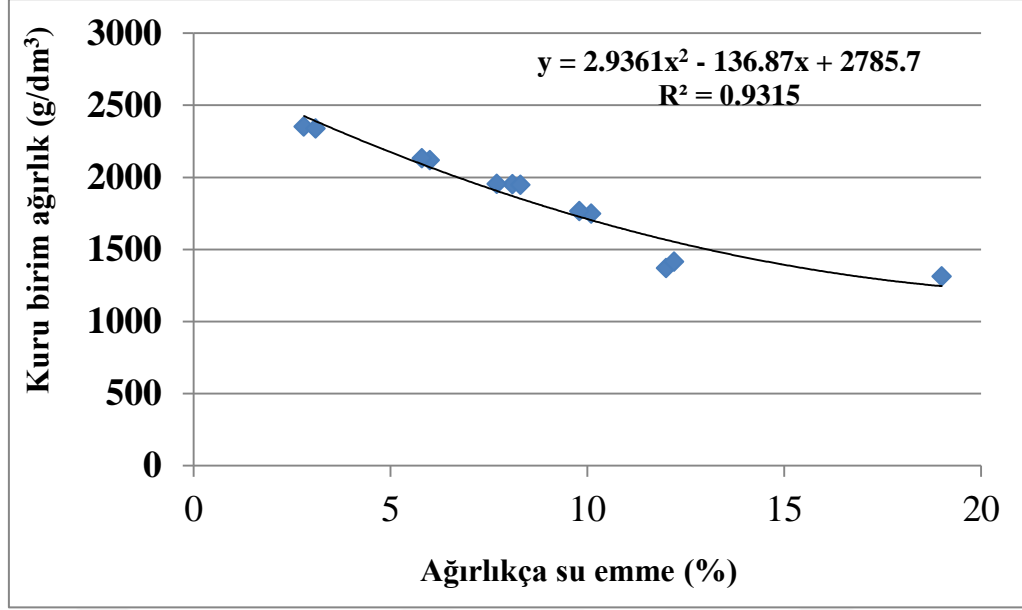
Aşağıda Şekil 6.41'de beton serilerinin ağırlıkça su emme değerleri ve kuru birim ağırlıkları grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 6.41. Beton serilerinin ağırlıkça su emme ile kuru birim ağırlık ilişkisi grafik olarak

Yukarıda gösterilen grafikten açıkça görülmektedir ki, kuru birim ağırlığın artması su emmeyi azaltan bir unsurdur. Liflerin etkisi, kullanılan agrega etkisi yanında çok daha küçüktür ve genellikle ağırlığı artırıp, su emmeyi az da olsa düşürmelerine rağmen, 2. seri ve 7. seride lifsiz benzerlerine göre koyulan lifler ağırlığı azaltmış ve su emmeyi artırmıştır. Ayrıca 11. seride eklenen lifler, lifsiz 10. seriyeye göre hem ağırlığı hem de su emmeyi artırmıştır.

Şekil 6.42’de ağırlıkça su emme değeri ile kuru birim ağırlık arasında oluşan ilişki verilmiştir. Y değerinin kuru birim ağırlığı (g/dm^3) cinsinden ve x değişkeninin ağırlıkça su emme değerini (%) olarak gösterdiği fonksiyonda $R^2=0.9315$ gibi % 90’ın üzerinde bir güçlü ilişki görmekteyiz.



Şekil 6.42. Beton serilerinin ağırlıkça su emme ile kuru birim ağırlık ilişkisi

Kadiroğlu (2004)'te 350 kg/m^3 çimento, 170 kg/m^3 uçucu kül, 30 kg/m^3 silis ve 267 kg/m^3 su kullanarak ürettiği, Kayseri pomzalı 1400 kg/m^3 kuru birim ağırlıklı kendiliğinden yerleşen betonda su emmeyi %13.5 bulmuş ve normal ince kum kullanarak ağırlaştırdığı ve yaklaşık kuru birim ağırlıkları 1500 , 1600 ve 1700 kg/m^3 olan benzer karışimli betonlarda da su emmeyi sırasıyla %12.6, %8.7 ve %8.1 olarak elde etmiştir. Tuyan vd (2014), yaptıkları çalışmada 315 kg/m^3 çimento, 135 kg/m^3 uçucu kül ve 194 kg/m^3 su kullanarak, toplam toz oranı 612 kg/m^3 olan kırmataş agregasıyla ürettiği 2294 kg/m^3 ağırlıklı ve 52.3 MPa basınç dayanımlı kendiliğinden yerleşen betonun su emme oranını %2.4 bulmuştur. Kurt (2009), ise 375 kg/m^3 çimento, 216 ile 231 kg/m^3 arasında değişen uçucu kül ve 188 ile 204 kg/m^3 arasında değişen suyu, hem normal agregalı hem de pomzalı kendiliğinden yerleşen betonları üretmek için değişik miktarlarda kullanmıştır. Erzurum yöresinden elde edilen tamamı pomzalı 1187 kg/m^3 kuru birim ağırlığında ve basınç dayanımı 19.93 MPa olan betonlarda su emmeyi %16.67 elde etmiş ve tamamı normal agregalı betonun kuru birim ağırlığını 2156 kg/m^3 , basınç dayanımını 53.26 MPa ve betonun su emmesini de %5.65 olarak bulmuştur.

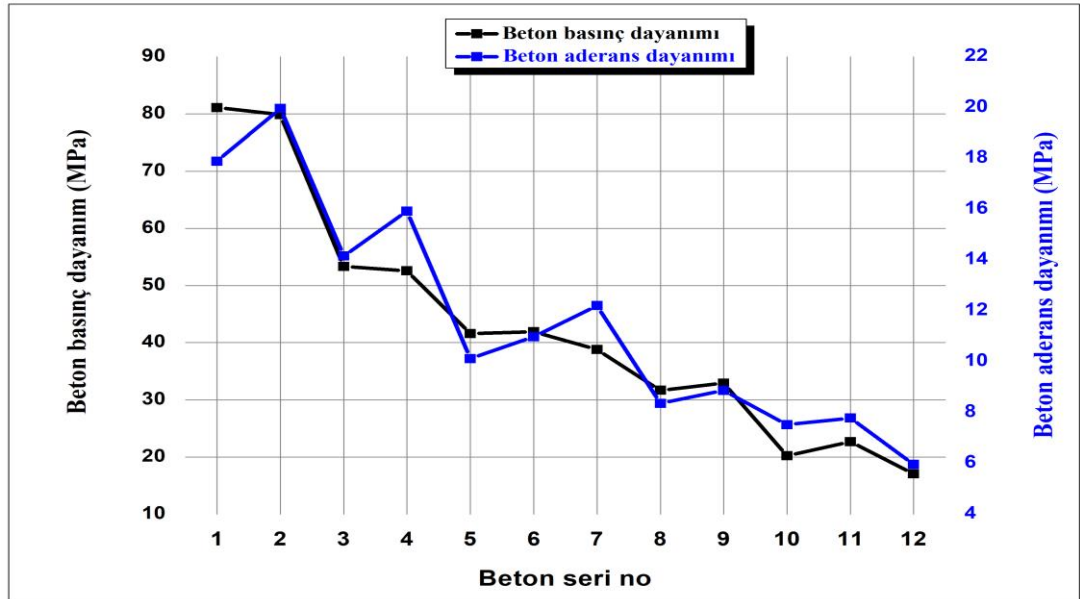
6.2.9. Beton serilerinin beton-donatı aderans deneyi

Yapılan eksenel çekip çıkarma deneyi ile beton numunelerinin aderans dayanımının inceleme sonuçları Çizelge 6.23'te gösterilmiş ve Şekil 6.43'de de beton serilerine ait

28 günlük basınç dayanımı ile aderans dayanım arasında oluşan ilişki grafik halinde verilmiştir.

Çizelge 6.23. Beton serilerinin basınç dayanımı ve aderans dayanımı

Beton seri no (İsimlendirme)	28 günlük küp basınç dayanımı (MPa)	Maksimum çekip çıkarma kuvveti (kN)	Maksimum aderans dayanımı (MPa)	Normalleştirilmiş aderans dayanımı (MPa)
1 (K)	81.12	101.11	17.89	1.99
2 (Kkl)	79.88	112.87	19.97	2.23
3 (K2NP)	53.32	80.03	14.16	1.94
4 (K2NPkl)	52.56	90.04	15.93	2.20
5 (KNP)	41.59	57.20	10.12	1.57
6 (KNPkl)	41.89	62.06	10.98	1.70
7 (KNPul)	38.77	69.01	12.21	1.96
8 (KN3P)	31.66	47.25	8.36	1.49
9 (KN3Pkl)	32.92	50.13	8.87	1.55
10 (KP)	20.24	42.50	7.52	1.67
11 (KPkl)	22.67	43.97	7.78	1.63
12 (KPsI)	17.04	33.69	5.96	1.44



Şekil 6.43. Beton serilerinin basınç dayanımı ile aderans dayanımı grafiği

Çizelge 6.23 ve Şekil 6.43'den görüldüğü üzere basınç dayanımları yüksek olan betonların çekip çıkarma kuvvetleri de büyük olmakta ve bu değerden hesaplanan aderans dayanımı da yüksek değerlere çıkmaktadır. Basınç dayanımı en yüksek değerde olan normal agregalı kontrol serisi 1. serinin (K) aderans dayanımı 17.89 MPa çıkmıştır, ancak kısa çelik lif içeren normal agregalı 2. serinin (Kkl) basınç dayanımı 1. seriden düşük olmasına rağmen aderans dayanımı 1. seriden daha yüksek çıkmış ve 19.97 MPa olmuştur. Çelik liflerin çekmeye olan olumlu etkileri gibi aderans dayanımına da olumlu etkileri görülmektedir. 3. seriden (K2NP) itibaren pomzanın beton karışımlarına eklenmesiyle, aderans dayanımının düşmeye başladığı görülmektedir. 4. seride (K2NPkl) benzer olarak basınç dayanımının azalmasına neden olan kısa çelik lifler aderans dayanımını, lifsiz benzeri olan 3. seriden daha yüksek değerlere çıkarmıştır. Yarı pomza yarı normal agregalı içeren 5. seri (KNP), 6. seri (KNPkl) ve 7. serinin (KNPul) aderans dayanımı değişimlerinde, lifler önemlidir. 6. seride kısa çelik liflerin hem basınç hem de aderans dayanımını artırdığını, 7. seride ise basınç dayanımının düşmesine neden olan uzun çelik liflerin aderans dayanımını, hem lifsiz 5. seriden hem de kısa çelik lifli 6. seriden daha fazla artırdığını görmekteyiz. Artan pomza miktarlarıyla 8. seri (KN3P) ile 9. seri (KN3Pkl) ve tamamı pomzalı 10. seri (KP) ve 11. serilerde (KPkl) aderans dayanımlarının pomza miktarının artmasına bağlı olarak azaldığı ve kısa çelik liflerin hem 9. seride hem de 11. seride aderans dayanımı ve basınç dayanımını artırdığı da görülen diğer sonuçlardır. 12. seride (KPsl) kullanılan sentetik liflerin basınç dayanımına olduğu gibi aderans dayanımına da olumsuz etkisi görülmektedir.

Aşağıdaki Çizelge 6.24'de kontrol serisi 1. seri (K) esas alınarak yani %100 kabul edilerek, diğer serilerin aderans ve basınç dayanım değişimleri (% artma, azalma olarak) verilmiştir.

Çizelge 6.24. 1. serinin (K) aderans ve basınç dayanımı %100 kabul edildiğinde diğer serilerin yüzde olarak değişimleri

Beton seri no (İsimlendirme)	Maksimum aderans dayanımı (MPa)	Aderans dayanım değişimi (%)	28 günlük küp basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanım değişimi (%)
1 (K)	17.89	0	81.12	0
2 (Kkl)	19.97	+11.63	79.88	-1.53
3 (K2NP)	14.16	-20.85	53.32	-34.27
4 (K2NPkl)	15.93	-10.96	52.56	-35.21
5 (KNP)	10.12	-43.43	41.59	-48.73
6 (KNPkl)	10.98	-38.62	41.89	-48.36
7 (KNPul)	12.21	-31.75	38.77	-52.21
8 (KN3P)	8.36	-53.27	31.66	-60.97
9 (KN3Pkl)	8.87	-50.42	32.92	-59.42
10 (KP)	7.52	-57.96	20.24	-75.05
11 (KPkl)	7.78	-56.51	22.67	-72.05
12 (KPs1)	5.96	-66.68	17.04	-78.99

Çizelge 6.24'e bakıldığında 1. seri (K) aderans dayanımı %100 kabul edildiğinde, 2. serinin (Kkl) aderans dayanımı %111.63'e çıkmış ve %11.63'lük bir artış olmuştur. Diğer bütün serilerde 1. seriye göre azalmalar oluşmuştur. Basınç dayanımı değişiminde ise 1. seriye göre bütün serilerin basınç dayanımları azalmıştır.

Bu tablodan elde edilen en önemli sonuç aderans dayanımında oluşan kayıpların, basınç dayanımında oluşan kayıplardan her seri için düşük kalmasıdır. Örneğin 6. seride (KNPkl) kontrol serisine göre aderans dayanımı kaybı %38.62 iken, basınç dayanımı kaybı kontrol serisine göre %48.36 olmuştur, yani karışımlarda pomza miktarının artışı basınç dayanımını, aderans dayanımından daha fazla azaltmaktadır. Bunun nedeni basınç dayanımı deneyinde kırılmaya uğrayarak basınç dayanımının büyük oranda düşüşüne neden olan pomzanın, pürüzlü yüzeyi sayesinde karışım içerisinde daha iyi kenetlenerek aderans dayanımını daha az düşürmüş olmasıdır.

Aşağıda Çizelge 6.25'de her farklı karışımdaki lifsiz olan serinin aderans dayanımı ve basınç dayanımı %100 alındığında, lifli serilerin aderans ve basınç

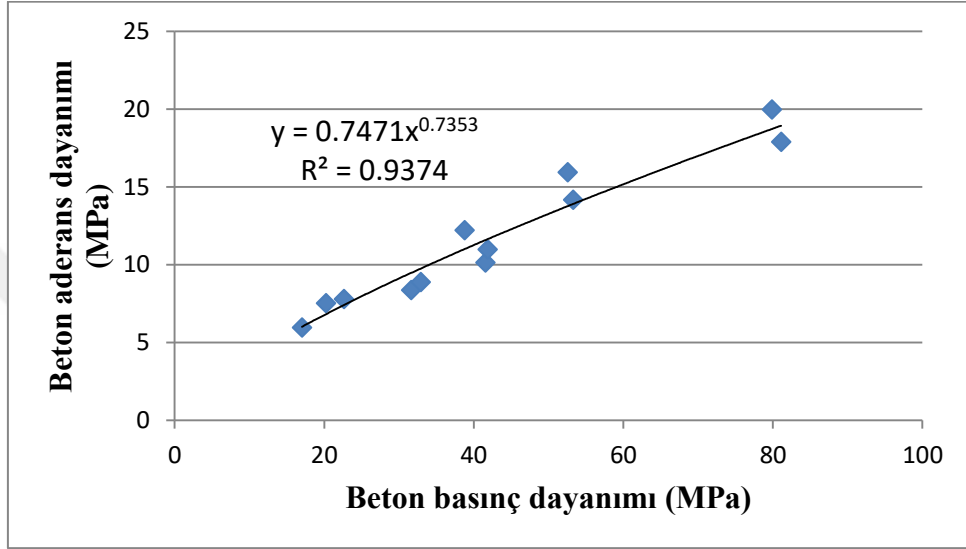
dayanımında oluşan değişimleri (% artış, azalış olarak) gösterilmiştir.

Çizelge 6.25. Aynı karışımli lifsiz seriler esas alındığında, üretilen diğer lifli serilerin aderans ve basınç dayanımı değişimi

Beton seri no (İsimlendirme)	Aderans dayanımı (MPa)	Aderans dayanımı değişimi (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı değişimi (%)
1 (K)	17.89	0	81.12	0
2 (Kkl)	19.97	+11.63	79.88	-1.53
3 (K2NP)	14.16	0	53.32	0
4 (K2NPkl)	15.93	+12.5	52.56	-1.43
5 (KNP)	10.12	0	41.59	0
6 (KNPkl)	10.98	+8.50	41.89	+0.72
7 (KNPul)	12.21	+20.65	38.77	-6.78
8 (KN3P)	8.36	0	31.66	0
9 (KN3Pkl)	8.87	+6.1	32.92	+3.98
10 (KP)	7.52	0	20.24	0
11 (KPkl)	7.78	+3.46	22.67	+12.01
12 (KPl)	5.96	-20.75	17.04	-15.81

Çizelge 6.25'e bakıldığında normal agregayla üretilen ve kısa lif içeren 2. serinin (Kkl) aderans dayanımının lifsiz kontrol serisi 1. seriden (K) %11.63 fazla olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 4. serinin (K2NPkl), 3. seriden (K2NP) %12.5 fazla olduğu görülmektedir. Ancak bu değerden sonra pomza oranının arttığı serilerde kısa çelik liflerin aderans dayanımına etkisi azalmaktadır yani 6. seri (KNPkl), lifsiz benzeri 5. seriden (KNP) %8.5; 9. seri (KN3Pkl) lifsiz benzeri 8. seriden (KN3P) %6.1 ve 11. seride (KPkl), 10. seriden (KP) yalnızca %3.46 fazladır. Buradan beton basınç dayanımının azalması durumunda, yani pomza oranının artması durumunda liflerin adersana olan olumlu etkisinin azaldığı sonucu çıkarılabilir. Çizelge 6.25'e göre, genel olarak basınç dayanımının azalması

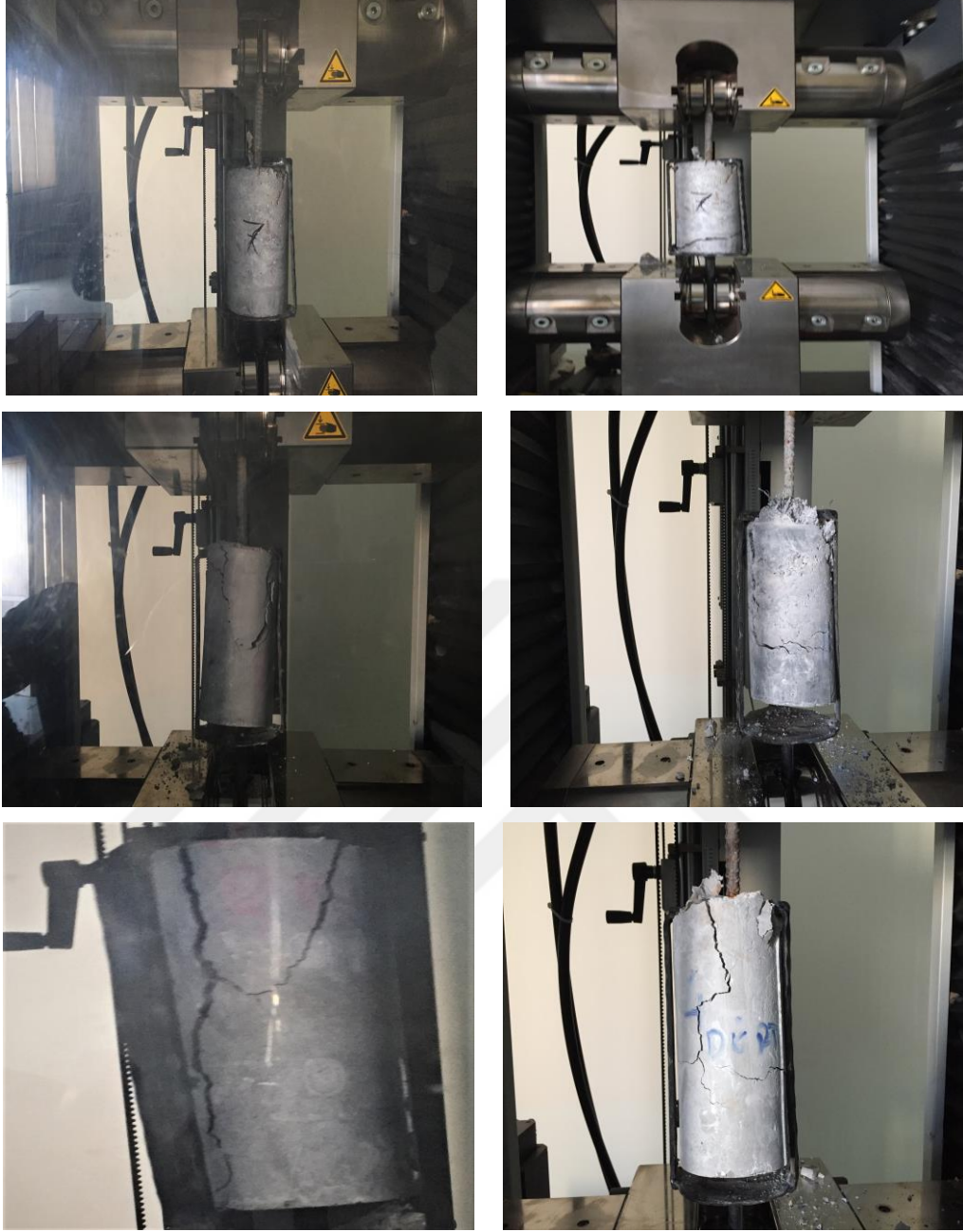
durumunda ise, yani beton karışımlarında pomza miktarının artması durumunda kısa çelik liflerin basınç dayanımına olan olumlu etkisi artmaktadır, ancak aderans dayanımına olan olumlu etki azalmaktadır. Genelde, pomza miktarının artması serilerde kullanılan kısa çelik liflerin aderans dayanımına etkisini azaltmaktadır. Basınç dayanımı için ise ters durum söz konusudur, çünkü kısa çelik liflerin olumlu etkisi pomza miktarı arttıkça artar. Şekil 6.44'de beton serilerinin aderans dayanımı ile basınç dayanım arasındaki ilişki grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.44. Beton aderans ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

Şekil 6.44'den görüldüğü üzere aderans dayanımı ile basınç dayanımı arasında doğrusal ve güçlü bir ilişkiden söz edilebilir. Çünkü üstel bir fonksiyon şeklinde oluşan matematiksel bağıntıda çıkan $R^2=0.9374$ anlamlı bir ilişkiye işaret etmektedir.

Aşağıda Şekil 6.45'de deneye ait bazı fotoğraflar paylaşılmıştır.



Şekil 6.45. Beton aderans deneyinde bazı serilere ait fotoğraflar

Şekil 6.45’de bulunan fotoğraflardan da görüldüğü üzere silindir numunelere 150 mm gömülmüş olan donatının çekilmesiyle genel olarak yarılma şeklinde kırılmalar oluşmuştur. Gömülme boyunun yeterli oluşu nedeniyle, deneyler sıyrılmama şeklinde sonuçlanmamıştır. Çünkü bazı çalışmalardan elde edilen sonuçlarda betona gömülü olan donatı boyunun yetersiz olması ve beton dayanımının da yüksek olması durumunda donatının sıyrılarak betondan ayrılabilceği belirtilmiştir (Özkul vd, 2007; Cook, 1993; Yazıcı ve İnan, 2010).

Pomza miktarının arttığı ve beton dayanımının iyice azaldığı serilerde,

yarılmalar genel olarak donatının beton içerisinde gömülü olduğu yerden başlamaktadır. Bu durumda kırılmaların zayıf olan pomza agregası üzerinde olduğu görülmektedir. En yüksek aderans dayanımının elde edildiği 2. seride (Kkl) hem normal agreganın kullanılıyor olması, hem de kısa çelik lifin varlığı, oluşan yarılmanın bütün numune boyunca yayılmasına neden olmuştur. Beton dayanımının artması ve numunede liflerin kullanılıp kullanılmaması, yarılmaların cinsini değiştirmektedir. Dayanımı yüksek ve lifli betonlarda güçlü aderans nedeniyle uygulanması gerekli yüksek gerilme kuvveti, numunede daha uzun yarılmalara neden olmaktadır. Pomza miktarının arttığı serilerde, kırılma daha kolay oluşmakta ve yarılmalar genellikle donatının gömüldüğü kısmın çevresinde oluşmaktadır.

Aderans dayanımında betona ait özelliklerin önemi büyüktür. Betonun karışımı, agrega en büyük tane çapı, betonun yaşı, yerleştirilmesi, bakımı ve basınç dayanımı aderans dayanımını etkileyen önemli etkenlerdendir (Yücel vd, 2006). Hafif agrega ile üretilen betonların aderans dayanımları, normal agregayla üretilen betonlara oranla daha düşüktür, çünkü hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregaların basınç ve çekme dayanımları normal agregalardan düşüktür. Uçucu kül ve silis dumanı gibi bazı beton katkıları beton ile donatı arasındaki aderansı artırır. Çünkü bunlar, beton ve donatı geçiş bölgesindeki mikro çatlakları azaltırlar (Hüsem ve Durmuş, 1995; Bazant ve Planas, 1998).

Popal (2015), 18 mm çaplı düz ve nervürlü donatıları C10 sınıfı betonlara 100, 150, 200 ve 250 mm gömerek aksel çekip çıkarma deneyi yapmış ve aderans dayanımlarını incelemiştir. Düz donatıların betona 100 ve 150 mm gömülmesi durumunda 13.1 kN kuvvetle, 200 ve 250 mm gömülmesi durumunda 18 kN ile sıyrıldığını söylemiştir. Nervürlü donatı kullanıldığında ise 100 ve 150 mm gömülü durumda sıyrılma kuvvetinin 73 kN ve 200 ile 250 mm gömülü olması durumunda 122 kN olduğunu bulmuştur. Nervürlü donatının yaklaşık olarak sıyrılma kuvvetini 7 kat artırdığını belirtmiştir. Nervürlü donatıların sıyrılma kapasitelerini de artırdığı çalışmada bulunmuştur. Epoksi ile yerleştirilen donatılarında hem aksel çekme kuvvetini hem de sıyrılma kapasitesini artırdığı söylenmiştir. Sancak vd (2011), hem normal agregalı betonlar, hem de Isparta pomzasıyla hafif agregalı betonlar üretmiş ve üzerlerinde aderans deneyi uygulamıştır. Aderans deneyinde numunelere 14 mm çaplı donatı 150 mm derinliğinde gömülmüştür. Normal agregayla ürettiği 58.62 MPa basınç dayanımlı betonda aderans kuvvetini 94 kN ve aderans dayanımını 14.25

MPa olarak bulmuştur. Isparta pomzalı 24.43 MPa basınç dayanımlı betonun aderans kuvvetini 48 kN ve aderans dayanımını da 7.28 MPa bulmuştur. İpek (2013), normal kırma kuma hacimce %45 oranında soğuk bağlama yöntemiyle üretilmiş uçucu kül hafif agregası ekleyerek yaklaşık 43 MPa dayanımlı betonlar üretmiş ve içerisine kısa ve uzun çelik lifler eklemiştir. Yaptığı aderans deneyinde lifsiz serinin aderans dayanımını 9.42 MPa, kısa lifli serinin aderans dayanımını 10.64 MPa ve uzun lifli serinin aderans dayanımını 13.39 MPa olarak elde etmiştir. Kaffetzakis ve Papanicolaou (2012), Yunanistan pomzası ve normal agregayla betonlar üretmiştir. Pomzayla ürettiği betonlarda 120 mm gömülme boyunda beton basınç dayanımı 33.2 MPa iken aderans dayanımını 13 MPa elde etmiştir. Normal agregayla ürettiği betonda ise basınç dayanımını 46.1 MPa ve aderans dayanımını 21.3 MPa elde etmiştir. Söylev (2011), lifsiz ve 35 mm boyunda çelik lif kullanarak ürettiği lifli, yaklaşık 50 MPa basınç dayanımlı betonlarda aderans dayanımını incelemiş ve lifli betonların, lifsiz betonlardan % 8-22 arasında daha iyi performans gösterdiğini söylemiştir. Arel (2012), su/bağlayıcı oranını değiştirdiği, normal agregayla ürettiği farklı dayanımlı, lifli ve lifsiz betonlarda aderans deneyi uygulamıştır. C20 sınıfı betonlarda lifli betonların, lifsizden %31, C40 sınıfı betonlarda %28 ve C60 sınıfında %20 daha yüksek aderans dayanımına sahip olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmada uzun çelik liflerin aderans dayanımını daha fazla artırdığı belirtilmiştir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmanın bu kısmında yapılan bütün deneylerin sonuçları, sonuçlar başlığı altında verilecek ve bundan sonra konu hakkında çalışacaklara yönelik dikkat edilmesi gereken durumlar ile izlenmesi gereken yollar da öneriler bölümünde sunulacaktır.

7.1. Sonuçlar

Sonuçlar, taze beton deneylerine ve sertleşmiş beton deneylerine ait olmak üzere iki başlık altında maddeler halinde verilmiştir.

7.1.1. Taze beton deneylerine ait sonuçlar

1. Normal agregası ve pomza miktarları hacimce değiştirilerek farklı birim hacim ağırlığına sahip beton serileri üretilebilmekte ve beklenen bir sonuç olarak pomza agregasının karışım içerisinde artması birim hacim ağırlığı azaltmaktadır. Birim hacim ağırlığı fazla beton serilerine katılan çelik liflerin, beton ağırlıklarını, lifsiz serilere göre azalttığı, oysa birim hacim ağırlığı azalmış ve iyice hafiflemiş betonlarda ağırlığı bir miktar artırdığı görülmüştür. Bunun nedeni içyapısı daha dolu beton serilerinde kendi yoğunluğu fazla olan çelik liflerin yerleşirken boşluk oluşturması ve zaten içyapısı boşluklu olan serilerde ise liflerin yerleşirken boşlukları kendi yoğun yapılarıyla doldurmasıdır. Uzun çelik lif ve sentetik lif, boyları nedeniyle daha fazla boşluk oluşturmuştur.

2. Serbest yayılma deneyinde, beklenenin aksine betonlar hafifleştikçe serbest yayılma çapları düşmüştür, normal agregalı yoğun betonlar hem fazla ve hem de düzenli yayılmıştır. Kendiliğinden yerleşmeyi ifade eden serbest yayılmada bu durum, betonun akış parametrelerinin kendi ağırlığına bağlı olduğunun bir göstergesidir ve betonların birim kütle değerleri ve yer çekimi ivmesinin buna etkisinin doğal bir sonucudur. Betonlara liflerin eklenmesi yayılma çapını düşürmekte ve yayılmanın daireselliğini bozmaktadır. Liflerin uzunluğu arttıkça yayılma çapı ve dairesel şekil daha olumsuz etkilenmiş ve bölgesel tıkanmalar yaşanmıştır. Su emdirilmiş pomza agregalarının, sulu yüzeyleri ve hafif yapıları, hızlı yayılma ve ani duruşlara neden olmuştur ve T_{50} sürelerini azaltmıştır. Karışımlara

eklenen çelik lifler T_{50} sürelerini artırmıştır. Çalışmada üretilen bütün seriler, Avrupa'da kendiliğinden yerleşen betonların yayılma grupları için kabul edilen SF1, SF2 ve SF3 gruplarından birinin sınır değerleri içinde kalmaktadır.

3. J-halkası deney aletinde bulunan donatılar pomza miktarı fazla ve lifsiz iki seri dışında her seride yayılma çapını, serbest yayılma deneyine göre azaltmıştır. Bütün lifler, özellikle uzun çelik lif ve sentetik lif yayılma çapını daha fazla azaltmış, dairesel yayılamamış ve tıkanmalara neden olmuştur. Sentetik lifli seri aderansı nedeniyle hiç yayılmamıştır. Serilerin çoğunluğu sınır kabul edilen 10 mm iç-dış bloklanma değerini sağlayamamıştır. Bloklanmayan tek lifli seri kısa çelik lif içeren normal agregalı seridir, çünkü bu seride normal agregada içinde hapsolan lifler, uyumlu davranarak donatı engelini daha rahat aşmıştır. Birim hacim ağırlığı fazla betonların iç-dış farkları daha az olduğu, oysa pomzalı ve lifli serilerin daha çok bloklandığı görülmüştür.

4. Sulu agregada yüzeyleri nedeniyle viskoziteyi azaltan pomzalı seriler, pomza miktarının artışına paralel olarak V-hunisi süresini azaltmışlardır. Normal agregası fazla serilerde süre artmıştır. Lifler birim hacim ağırlığı yüksek betonlarda V-hunisi süresini artırmakta, hafifleşen betonlarda ise akışa öncülük ederek süreyi kısaltmaktadırlar. Sınır süreyi aşan tek seri normal agregalı kısa çelik lifli seridir ve bu seri dışında her seri beton karışımlarında bulunan pomza agregasının varlığı sebebiyle süreyi sağlamıştır. Uzun çelik lif boyu nedeniyle, sentetik lif ise viskozitesi nedeniyle süreyi bir miktar artırmıştır.

5. Beton serileri içerisinde pomza agregası miktarı arttıkça L-kutusu deneyi yatay kolunda ölçülen H_2/H_1 oranı yükselmiş ve 1'e yaklaşmıştır. Aynı zamanda pomza miktarının artışı, yatay kolda hareket hızlarının ölçüldüğü T_{200} ve T_{400} sürelerini azaltmıştır. Birim hacim ağırlığı yüksek yani normal agregası fazla serilerde H_2/H_1 oranı düşmüş ve süreler artmıştır. Lifli her seri L-kutusu aletinde bulunan donatı engeli nedeniyle bloklanmıştır.

6. Bu çalışmada J-halkası ve L-kutusu deneyleri lifli kendiliğinden yerleşen betonlar için uygun sonuçlar vermemiştir. Bu deneylerin hem uygulanışı hem de sınır değerleri yeniden düzenlenmelidir.

7.1.2. Sertleşmiş beton deneylerine ait sonuçlar

1. Beton serilerine eklenen pomza miktarı arttıkça hem beton ağırlıkları hem de basınç dayanımları doğrusala yakın bir ilişkiyle azalmaktadır. Pomza eklenerek beton birim hacim ağırlığının yaklaşık %10 azaltılması durumunda basınç dayanımında %35'lik bir kayıp, %17 azalınca %49'luk kayıp, %25 azalınca %60'lık kayıp oluşmuştur ve tamamı pomzalı seride yaklaşık %40'lık ağırlık kaybına karşılık %75'lik basınç dayanımında bir kayıp söz konusudur.

2. Kısa çelik lifler normal agregalı yüksek dayanımlı beton serilerinde bir miktar boşluğa sebep olmuş ve basınç dayanımlarını düşürmüşken, pomza miktarının arttığı serilerde boşluklu yapıda kolay yerleşen yoğunluğu fazla lifler basınç dayanımını artırmıştır. Kısa çelik lifler basınç dayanımını %0.3-3 arasında değişen oranlarda artırmış veya azaltmıştır. Yarı yarıya normal ve pomza içeren seride eklenen uzun çelik lifler, benzer karışımli kısa çelik lifli seriden çok daha fazla basıncı azaltmıştır. Sentetik lifli tamamı pomzalı seri, karışıma giren fazla miktardaki hafif lif yapısı nedeniyle aderans yüzeyinin artışına, boşluklu ve topaklanan beton yapısına neden olmuş ve en kötü basınç dayanımı değerlerini vermiştir.

3. Serilerde pomza agregası miktarının artması yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarını azaltmaktadır. Tamamı pomzalı seride basınç dayanımı kaybı %75.05 iken, yarmada çekme dayanım kaybı %54.88 ve eğilmede çekme dayanım kaybı %65.71 olmuştur. Buradan, boşluklu ve hafif olan pomzanın basınç dayanımını çok fazla düşürdüğü, oysa çekme dayanımlarını pürüzlü yüzeylerinin aderans yeteneği sayesinde daha az düşürdüğü ortaya çıkmaktadır.

4. Çelik liflerin beton serilerine eklenmesi yarmada çekme ve eğilmede çekme dayanımlarını önemli miktarda artırmaktadır. Bazı serilerde basınç dayanımlarının azalmasına neden olan çelik lifler her seride çekme dayanımlarını artırmıştır. En fazla çekme dayanımı artış oranı, yarmada çekme deneyi uygulanan yarısı pomza agregalı uzun çelik lifli seride %38.86 olarak bulunmuştur. Kısa çelik lifler, normal agregalı serilere göre pomzalı serilerde eğilme dayanımlarını daha fazla artırırılar.

5. Yarmada çekme dayanımı ile eğilmede çekme dayanımı arasında çok güçlü bir ilişki mevcuttur. Eğilmede çekme dayanımı/yarmada çekme dayanımı oranı 1 ile 2 arasında değişim göstermektedir. Basınç dayanımları yüksek, pomza oranı düşük serilerde bu oran 2'ye yaklaşırken, pomza miktarı artan serilerde 1'e yaklaşmaktadır.

6. Yapılan basınç, eğilme çekme ve yarmada çekme deneylerinde görülmüştür ki, lifli ve lifsiz serilerde ani bir kırılma olmuştur. Ancak bazı lifli serilerde kırılmadan sonra, deney hemen sonlanmamış ve yük daha geç boşalmıştır, bu liflerin betonlara kattığı sünekliğin göstergesidir. Ayrıca deneyler sonunda çelik lifler numunelerin tamamen ayrılmasını engellemiş, bütün kalmasını sağlamıştır. Özellikle yarmada çekme ve eğilme çekme deneyleri sonrası lifli serilerde deney sonunda sadece ince çatlaklar oluşmuş, lifsiz serilerde numuneler ikiye ayrılmıştır. Numunelerde ayrılan yüzeyler incelendiğinde pomza içeren serilerde kırılmanın zayıf olan pomza agregasında, normal agregalı serilerde ise kırılmanın çimento hamurunda olduğu görülmüştür.

7. Betonarme küçük kirişlere uygulanan 3 noktadan eğilme deneyinde, donatı varlığının eğilme dayanımını, donatısız numunelerle kıyaslandığında yaklaşık 4 kata kadar artırabildiği görülmüştür. Eğilme kırılma yükünü büyük oranda artıran unsur donatı varlığıdır, bu konuda beton dayanımının etkisi daha azdır. Çalışmada küçük donatılı kirişlerde deney sonunda yalnızca orta noktadan ince bir çatlama oluşmuş ve deney sonuçlanmıştır.

8. Donatıların prizmatik kirişlere eklenmesi, pomza miktarı artan serilerde daha büyük oranda katkı sağlamıştır. Bunun nedeni basınç dayanımını düşüren pomza agregasının pürüzlü yüzeylerinden dolayı aderans yeteneğinin daha iyi olmasıdır. Zaten dayanımı yüksek olan normal agregalı beton serilerinde, donatı etkisinin pomzalı seriler kadar yüksek olmaması da bunun bir sonucu olabilir.

9. Lifli betonarme kirişlerde kırılma yükü artış oranı, lifsiz betonarme kirişlerden daha düşüktür, çünkü donatının sağlayacağı katkının azda olsa bir kısmı zaten lifler sayesinde önceden sağlanmıştır. Ayrıca beton prizmatik kirişlere eklenen çelik lifler kırılma yükü oranını, betonarme kirişlere eklenen liflerden daha büyük oranda artırmıştır, çünkü çelik lifler donatının sağlayacağı artış oranını, kendisi %1.8 ile %9.1 oranında başlangıçta sağlamış görülmektedir. Donatı ilavesiyle kırılma yükü en fazla artan seri %382.01 artış oranıyla tamamı pomzalı lifsiz seridir.

10. Serilerin ultrases geçiş hızları incelendiğinde, içyapısı dolu normal agregalı beton serilerinin ultrases hızlarının yüksek olduğu ve pomzanın serilerde kullanılma miktarı arttıkça, ultrases geçiş hızlarının oluşan boşluklu içyapı nedeniyle düştüğü görülmektedir.

11. Çelik liflerin normal agregalı seride, betonda boşluğa neden olup ultrases geçiş hızlarını düşürdüğü görülmüştür. Özellikle uzun çelik liflerin hacimce yarısı pomza, yarısı normal agregalı olan seride, dikkat çekici bir biçimde ultrases hızını artırması liflerin birbirine olan temasıyla açıklanabilir. Pomza miktarının normal agregadan fazla olduğu veya tamamı pomzalı serilerde kullanılan kısa çelik liflerin ultrases hızlarına olan olumlu etkisinin ortadan kalktığı ve artan boşluğun hız geçişini liflere rağmen düşürdüğü görülmektedir. Sentetik lifli, tamamı pomzalı seri hem lifin kendi yapısı hem de boşluklu beton yapısı nedeniyle en düşük ultrases geçiş hızına sahiptir.

12. Genel olarak kuru birim hacim ağırlığın ve basınç dayanımının azalması, ultrases geçiş hızlarının azalması anlamına gelmektedir. Beton serilerinin ultrases geçiş hızı ile basınç dayanımları arasında güçlü bir matematiksel ilişki vardır. Ancak ultrases geçiş hızı ile kuru birim hacim ağırlıklar arasında oluşan ilişki daha güçlü bir ilişkidir.

13. Yüksek sıcaklık deneyleri için ısının 200 °C'ye çıkarılması bazı serilerde basınç dayanımının artışına neden olmuştur, bunun nedeni düşük sıcaklıkta nem dengesinin hidratasyonu geciktirmesidir. Sentetik lifli seri, hem boşluklu yapısı hem de 440 °C'de liflerin ergimeye başlaması nedeniyle artan sıcaklıklarda en düşük basınç dayanımına sahip olan seri olmuştur. Sentetik lifli seri dışında diğer seriler için 20 °C'de elde edilen basınç dayanımları %100 kabul edildiğinde 200 °C'de beton seri dayanımlarının %90.89 ile %112.55 arasında, 500 °C'de oluşan basınç dayanımlarının ise %64.98 ile %83 arasında değiştiği görülmüştür. Gerçek dayanım kayıplarının 900 °C'de yaşandığı görülmektedir. 20 °C'ye göre 900 °C'de kalan basınç dayanımları %23.81 ile %33.40 aralığına düşmüştür. 500 °C'ye kadar beton serilerinin basınç dayanımlarını büyük oranda koruduğu ve 900 °C'de kayıpların arttığı görülmüştür.

14. Pomza oranı yüksek beton serilerinin 900 °C'de kalan dayanımları, normal agregalı beton serilerinden yüksektir. Pomzalı betonlar yüksek ısıya daha dayanıklıdır, denilebilir. Kısa çelik lifli serilerin 900 °C'de kalan dayanımları, lifsiz benzerlerinden, karışımdaki pomza oranı yarıyı geçmediği sürece yüksektir. Pomza oranı artan serilerde çelik liflerin köprü görevini bir miktar kaybettiği, çünkü pomza oranı yüksek serilerin hacimsel olarak daha fazla şekil değiştirdiği görülmüştür.

15. Her sıcaklıkta, basınç deneyi öncesi numune ağırlıkları ölçülmüş ve pomza oranı yüksek betonların daha fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmüştür. 500 °C'ye kadar ağırlık kayıpları sınırlı olan normal agregası yüksek beton serilerinin 900 °C'de ağırlık kayıpları fazladır. Pomza agrega oranı yüksek serilerde toplam ağırlık kaybının %50'den fazlası 500 °C'ye kadar oluşurken, normal agregası fazla beton serilerinin toplam ağırlık kaybının %50'den fazlası 900 °C'de oluşmuştur. Bunun nedeni pomzalı agregalı serilerin su içermesi ve normal agregaların ise 850 °C'den sonra su kaybetmeleri olarak düşünülmüştür.

16. Sıcaklığın artmasının beton numunelerinin hacim, şekil ve renk olarak değişimine neden olduğu görülmüştür. 200 °C ve 500 °C'de genel olarak numunelerde küçük çatlaklar oluşurken, 900 °C'de çatlakların büyüdüğü ve küp numunelerinde büyük şekil değişimlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar sonrası, beton numunelere uygulanan basınç deneyinde çelik lifli betonların daha bütün yapı gösterdiği oysa çelik lif içermeyen serilerde betonların parçalanarak dağıldığı görülmektedir.

17. Beton serilerinin kuru birim ağırlıkları azaldıkça yani beton karışımında pomza agrega oranı arttıkça ısı iletkenlik değerleri azalmaktadır. Çünkü ısı iletkenliğini büyük oranda düşüren boşluklu pomza agregasının kendisidir. Liflerin eklenmesi uzun lifli beton serisi dışında her seride ısı iletkenlik değerini düşürmüştür. Uzun çelik lifli serinin, yüksek ısı iletkenliğine sahip olması liflerin birbiriyle olan teması ile açıklanabilir.

Beton serilerinin ısı iletkenliği, kuru birim ağırlığı, 28 günlük küp basınç dayanımı ve ultrases hızları arttıkça artar, çünkü aralarında güçlü ilişkiler mevcuttur.

18. Beton serilerine eklenen pomza agregası miktarı arttıkça, ağırlıkça ve hacimce su emme miktarları yükselmiştir. Beton serilerinin kuru birim ağırlıkları arttıkça su emme oranları azalmıştır. Su emmeyle lif kullanımı arasında çok net bir ilişki kurulamamış ve çelik liflerin su emmeyi az da olsa azalttığı veya artırdığı durumlar gözlemlenmiştir. Sentetik lifli beton, tamamı pomza olması ve çok boşluklu olması nedeniyle en fazla su emen seridir.

19. Beton-donatı aderansının incelendiği aksenal çekip çıkarma deneyinde basınç dayanımları yüksek olan betonların aderans dayanımlarının da yüksek olduğu ve aralarında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Serilerde kullanılan pomza

miktarının artması basınç dayanımını, aderans dayanımından daha büyük oranda düşürmektedir. Boşluklu pomza agregasının basınç deneyinde kendisinin kırılması nedeniyle düşük çıkan basınç dayanımı, pürüzlü yüzeyi sayesinde daha iyi aderans dayanımı sergilemektedir.

20. Çelik liflerin çekme dayanımına olan olumlu etkisi gibi aderans dayanımına da etkisi büyüktür. Her çelik lifli serinin aderans dayanımı, lifsizlerden yüksektir. Özellikle uzun çelik lif, eğilmede çekme dayanımında olduğu gibi, aderans dayanımında da benzer karışımli lifsiz seriye göre %20.65'lik katkı sağlamıştır ve bu bütün çelik lifli seriler içinde sağlanan en yüksek katkı değeridir. Normal agregası yüksek betonlarda çelik lifler, aderans dayanımına daha fazla olumlu etki yapmaktadır.

21. Aderans dayanımı deneyinde numunelere 150 mm gömülen donatının çekilmesiyle oluşan kırılmalar yarılma şeklinde oluşmuştur, çünkü gömülme boyu derindir. Pomza miktarının arttığı serilerde, yarılmalar donatının betona gömülü olduğu yerden başlamaktadır ve kırılmalar pomza agregası üzerindedir. Ancak, yüksek dayanımlı serilerde ve çelik lifin kullanıldığı serilerde, yarılma tüm numune boyunca oluşmaktadır. Beton dayanımı ve lif kullanılması yarılmanın cinsini etkilemektedir.

22. Bu çalışmada Kayseri bölgesine ait pomza agregası kullanılmıştır ve temin edildiği bölgelere göre pomza agregaları çok farklı özellikler göstermektedir. Yapılacak çalışmalarda, kullanılacak pomzaların özellikleri iyi araştırılmalıdır.

23. Pomza agregası ve çeşitli lifler kullanılarak hafifleştirilen kendiliğinden yerleşen ve aynı zamanda bu betonun lifli halinin üretilebileceği görülmüştür. Üretilen betonların olumlu ve olumsuz yanları bazı yapılan deneyler yardımıyla ortaya çıkarılmak istenmiştir.

Bu çalışmada sadece hafifleştirilmiş betonlar değil, aynı zamanda dayanımı 80 MPa olan normal agregalı ve yüksek dayanımlı KYB ile bu betonun kısa çelik lif içeren hali de incelenmiştir.

24. Çalışmada üretilen ve birim hacim ağırlıkları yaklaşık 1300 kg/m^3 ile 2350 kg/m^3 arasında değişen betonların farklı dayanımları ve özellikleri birçok değişik yapı dalı için üzerinde çalışılabilecek örnekler sunmaktadır. Türkiye'nin aktif deprem kuşağında olması ve hafif agrega bakımından zengin bir ülke olması, buna

rağmen bu konuda gerekli bilgi ve birikime sahip olmaması üzücüdür. Yapılan bir çalışmada yaklaşık 1700 kg/m^3 birim ağırlığa sahip taşıyıcı hafif betonla üretilmiş on katlı bir betonarme yapının toplam ağırlığının yaklaşık %14 azalması durumunda yapıya gelen deprem yüklerinin yaklaşık %34 azalması, bunun yanısıra ses, ısı yalıtımını artırıp, maliyeti de düşürmüş olması(Kaldı, 2011), bu çalışmada üretilen betonların, betonarme yapılar için de ne kadar önemli olabileceğini göstermektedir

7.2. Öneriler

1. Gelişmiş ülkeler hafif beton üretimine oldukça önem vermektedirler. Ülkemizin zengin pomza kaynakları, pomza agregası üzerinde yapılacak çalışmalar yardımıyla hafif, özellikleri iyileştirilmiş betonlar üretmemize imkan sağlayacaktır. Bazı bölge pomzalarının çok hafif olması betonda ayrışmaya neden olabilmektedir. Ayrıca su emmesi yüksek olan pomzaların, beton karışımlarında kullanılmadan suya doygun hale getirilmesi gerekliliği önemli bir sorundur. Bu nedenle pomza ile beton üretecek araştırmacıların 150 ile 200 kg arası düşük dozajlı çimento ve 1 mm'lik ince kumu kullanıp harç yapması ve pomzanın bu harç karışımına beton üretiminde kullanılmadan önce batırılarak yüzeyinin kaplanması denemesi uygun sonuçlar verebilir. Burada kullanılacak pomza agregası çapında 4 ile 8 mm arası agrega olması uygun olacaktır. Bu uygulamayla agregalar beton karışımında kullanılmadan istenilen ağırlığa getirilecek, dayanımları artacak ve su emmesi azaltılacaktır.

2. Kendiliğinden yerleşen betonların taze beton halini kontrol için kullanılan J-halkası, V-hunisi ve L-kutusu gibi deneyler lifli betonlar için uygun değildir, çünkü deney aletlerinde bulunan donatılar veya çıkış ağızlarının darlığı lifli betonların tıkanmasına neden olmaktadır. Kendiliğinden yerleşen lifli betonlar için uygun tasarım ve kriterlerle yeni deneyler ortaya koyulmalıdır.

3. Lif çeşitleri, miktarları ve homojen dağılım gösterip göstermemesi üretilen betonun davranışlarını büyük oranda etkilediğinden, dikkat edilmesi gerekli önemli konuların başındadır.

4. Bu çalışmanın sonucunda üretilen hafifleştirilmiş kendiliğinden yerleşen betonlar, betonarme yapı elemanlarında, panel duvar üretiminde, prefabrik eleman üretimi ve kompozit yapı elemanı gibi alanlarda kullanılabilir. Ancak gerçeğe yakın boyutlarda numuneler üretilmesi ve deneysel kontroller yapılması gereklidir.

KAYNAKLAR

- Acay, E. 2010. Uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonda yüksek sıcaklık etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 90, Eskişehir.
- ACI 1967. Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI Journal, 433-468.
- ACI 211-2. 1991. Standart practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. Reported by ACI Committee.
- ACI 213. 1987. Guide for structural lightweight aggregate concrete, Concrete International, American Concrete Institute, 33-62.
- ACI 544.1R-96. 1996. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee 544, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- ACI 318. 2002. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-02) and commentary (318R-02). American Concrete Institute, 443, Farmington Hills, Michigan.
- Açıkalın, N. 1991. Türkiye'de ve dünyada diyatomit. *M.T.A Genel Müdürlüğü*, 1-30, Ankara.
- Açıkel, H. ve Günaydın, M. 2007. Nevşehir bims agregasından kendiliğinden yerleşen hafif beton üretilmesi. 7. Ulusal Beton Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası ve İstanbul Teknik Üniversitesi, 28-30 Kasım, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 145-154, İstanbul, Türkiye.
- Akkaş, A. 2011. Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun taşıyıcılık özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 131, Isparta.
- Akkaya, Y., İlki, A., Taşdemir, M. A. ve Kumbasar, N. 2002. Self-Compacting Concrete for Light Weight Slabs with 3-D Reinforcement, Proc. 1st N. American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, North Western University publishing, 457-467, Illinois, USA.
- Akman, S. 1987. *Yapı malzemeleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yayını, 161, İstanbul.
- Akman, S. M. ve Akçay, B. 2000. *Kimyasal beton katkılarının gelişimi ve çimentolarla uyumu*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi yayınları, 32, Maslak, İstanbul.

- Aktürk, M. 2007. Polipropilen lif takviyeli kendiliğinden yerleşen betonların performans özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 152, Konya.
- Al-Shannag, M. J. and Charif, A. 2017. Bond behavior of steel bars embedded in concretes made with natural lightweight aggregates. *Journal of King Saud University Engineering Sciences*, 29:2017, 365–372.
- Altun, F., Özcan, D. M., Vekli, M. ve Haktanır, T. 2002. Çelik lif katkılı betonarme kirişlerin taşıma gücünün deneysel incelenmesi, ECAS2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, 14 Ekim, Bildiriler Kitabı, 205-212, Ankara, Türkiye.
- Altun, F. 2006. Çelik lifli hafif betonun deneysel araştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimler Dergisi*, 12:3, 333-339.
- Altun, F. ve Aktaş, B. 2013. Investigation of reinforced concrete beams behavior of steel fiber added lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 38:2013, 575-581.
- Arel, H. Ş. 2012. Değişik parametrelerin beton ile çelik donatı aderansına etkisi. Doktora tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 223, İzmir.
- ASTM C330 / C330M-17a, 2017. Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- Ambrosie, J. and Pera, J. 2002. Design of self leveling concrete. First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 93-98, Chicago, USA.
- Aslani, F. and Kelin, J. 2018. Assesment and development of high performance fibre-reinforced lightweighth self compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production*, 200:1, 1009-1025.
- Attigobe, E. K., See, H. T. and Daczko, J. A. 2002. Engineering properties of Self-Consolidating Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 371-376, Illinois, USA.
- Aydın, S. ve Baradan, B. 2003. Yüksek sıcaklığa dayanıklı harç geliştirilmesi. İMO, 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 451-460, İstanbul.

- Bahadır, B. 2007. Liflerin beton kırılma tokluğuna etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 107, Sakarya.
- Balaguru, P. B. and Shah, S. P. 1992. *Fiber-Reinforced Cement Composites*.(First Edition). McGraw-Hill publishing, 530, New York.
- Barr, B. I. G., Liu, K. and Dowers, R. C. A. 1982. Toughness Index measure the linyry absorption of fibre reinforced concrete, *Int. J. Cement Composities and Lightweight Concrete*, 4:4, 221- 227.
- Bartos, P. J. M., Sonebi, M. And Tamim, A. K. 2002. *Workability and rheology of fresh concrete: Compendium of Tests*. RILEM Publishing, 127, Paris.
- Bazant, Z. P. and Planas, J. 1998. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*, CRC Press, 616, London.
- Bentli, İ., Uyanık, A. O., Demir, U., Şahbaz, O. ve Çelik, M. S. 2005. Seyitömer termik santrali uçucu küllerinin tuğla katkı maddesi olarak kullanımı. Türkiye 19. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Fuarı MCET, 09-12 Haziran, Bildiriler Kitabı, 385-389, İzmir.
- Bernabeu and Laborde. 2000. *SCC Production System for Civil Engineering* (Final Report of Task 8.3, Brite EuRam Contract No. BRPR-CT96-0366). EURAM, Brussels, Belgium.
- Beycioğlu, A., Başyigit, C. ve Kılınçarslan, Ş., 2010. Pomza agregalı hafif beton özelliklerine silis dumanının etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14:2, 200-205.
- Beycioğlu, A., Başyigit, C., Kılınçarslan, Ş. and Şamandar, A. 2011. Effect of mineral admixtures on properties of lightweight pumice concrete. *International Journal of the Physical Sciences*, 6:7, 1591-1603.
- Boel, V., Audenaert, K. and Schutter, G. D. 2002. Pore Structure of Self-Compacting Concrete, First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 15-20, Illinois, USA.
- Bramshuber, W. and Uebachs, S., 2002. The application of self-compacting concrete in Germany under special consideration of rheological aspects. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 225-234, Illinois, USA.
- Brouwers, H. J. H. and Radix, H. J. 2005. Self-Compacting Concrete: The Role of The Particle size Distribution. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, 26-28 May, Book of Abstracts, 109-118, Hunan, China.

- Bui, V., Montgomery, D., Hinczak, I., and Turner, K. 2002 . Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self Compacting Concrete. *Cement and Concrete Research*, 32:9, 1489-1496.
- Chandra, S. and Berntsson, L. 2002. *Lighweight aggregate concrete science, technology and applications*. Novey Publications, 110, Goteborg.
- Choi, Y. W., Kim, Y. J., Shin, H. C. and Moon, H. Y. 2006. An experimental research on the fluidity and mechanical properties of high-strength lightweight selfcompacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 36, 1595-1602.
- Clarke, J. L. 2010. Lightweight aggregate structural concrete. British Cement Association. Crowthorne Berkshire, 282.
- Cook, R. A. 1993. Behavior of chemically bonded anchors. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 119, 2744-2762.
- Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R. and Torresan, I. 2002. Zero energy system: An innovative approach for rationalized precast concrete production. BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry, 1-4 May, Bildiriler Kitabı, 59-62, İstanbul, Türkiye.
- Daczko, J. A. 2002. Stability of self-consolidating concrete, assumed or ensured. First North American conference on the design and use of self-consolidating concrete, 12-13 November, North Western University publishing, Book of Abstracts, 481-489, Chicago, USA.
- Davraz, M. 2004. Isparta Keçiborlu yöresi doğal amorf silika oluşumlarının geleneksel ve hafif beton endüstrilerinde kullanılabilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 265, Isparta.
- Dehn, F. 2002. High performance self compacting concretes for bridge construction. First north American conference on the design and use of self consolidating concrete, November 12-13, North Western University publishing, 433-438, Illinois, USA.
- Demir, İ. 2001. Afyon bölgesi tüflerinin tuğla üretiminde kullanılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 210, Ankara.
- Demirboğa, R. 1999. Silis dumanı ve uçucu külün perlit ve pomza ile üretilen hafif beton özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 164, Erzurum.
- Doruk, M. 1974. Volkanik tüflerin karayolu yapımında kullanılması ile ilgili bir çalışma. Karayolları Genel Müdürlüğü Araştırma Fen Heyeti Müdürlüğü. Ankara.

- Dowson, A. J. 2002. The application, self-compacting concrete (SCC) in precast products. BIBM 17th International Congress of the Precast Concrete Industry, 1-4 May, Congress publishing, 8-10, İstanbul, Türkiye.
- DPT, 2001. *Madencilik özel ihtisas raporu*, Sekizinci beş yıllık kalkınma planı (DPT:2617 ÖİK:628). Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara.
- Durmuş, A. ve AYTEKİN, M. 1986. Betonarme inşaatta hafif betonlar. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye İnşaat Mühendisliği 8. Kongresi. 15 Ekim, Bildiriler Kitabı, 263-274, Ankara, Türkiye.
- DURMAZ, B. 2007. Bölgesel basınca maruz lifli betonlarda yatak mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, Elazığ.
- DÜZGÜN, O. A. 2001. Çelik liflerin hafif betonların dayanımları üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 112, Erzurum.
- DÜZGÜN, O. A., GÜL, R. and AYDIN, C. A. 2005. Effect of steel fibers on the mechanical properties of naturel lightweight aggregate concrete. *Material Letters*, 59, 3357-3363.
- EFNARC (Avrupa özel yapı kimyasalları ve beton sistemleri federasyonu), 2002. Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete.
- EFNARC, 2005. Specifications and guidelines for self-Compacting concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.
- ERBAŞ, M., 2003. Polipropilen Lifler ve Betonun Durabilitesine Etkisi. 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim, Bildiriler Kitabı, 593-603, İstanbul, Türkiye.
- ERDOĞAN, Y. T. 1997. *Admixtures for concrete*. METU Press, 188, Ankara.
- ERDOĞAN, Y. T. 2003. *Beton*. METU Press, 741, Ankara.
- EROL, H. 2011. Çelik tel içeren betonarme kirişlerin mekanik davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, Yozgat.
- EuroLightCon, 1998. *LWAC material properties state-of-the-art. Economic design and construction with lightweight aggregate concrete* (Document BE96-3942/R2), Euram, Norway.
- FANG, W., JIANXIONG, C. and CHANGHUI, Y. 1999. Studies on self-compacting high performance concrete with high volume mineral additives. Proceedings of the First International RILEM Symposium, 14-16 September, Bildiriler Kitabı, 569-578. Stockholm, Sweden.

- Felekoğlu, B. 2003. Kendiliğinden yerleşen betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 219, İzmir.
- Felekoğlu, B., Türkel, S. ve Baradan, B. 2004. Kendiliğinden yerleşen beton: bölüm 1 genel tanıtım, kullanım alanları. TMMOB, *İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Haber Bülteni*, 19:117, 20-24.
- Francy, O. And Chopin, D. 2001. Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC). Study and Research Centre for the French Concrete Industry, 14s.
- Gaimster, R. and Dixon, N. 2003. Self compacting concrete. *In Advanced Concrete Technology*, 9:7, 8-14.
- Gençten, O. 2005. Hafif ve Normal agregalı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerine farklı kür şartlarının etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 214, Erzurum.
- Gökhan, Ç. ve Baytin, D. 1978. Hafif Agregalar ve perlit. *Mimarlık dergisi*, 4,73-79.
- Gönen, T. 2009. Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun mekaniksel ve durabilite özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, Elazığ.
- Gönen, T. 2015. Mechanical and fresh properties of fiber reinforced self-compacting lightweight concrete. *Sharif University of Technology, Scientia Iranica A*, 22:2, 313-318.
- Graboıs, T. M., Corderio, G. C. and Filho, R. D. T. 2016. Fresh and hardened-state properties of self compacting lightweight concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials*, 104,2016, 284-292.
- Gül, R., Şahin, R. ve Demirboğa, R. 1997. Kocapınar pomzası ile üretilen hafif betonun mukavemetinin araştırılması. İnşaat Mühendisliğinde gelişmeler, III. Teknik Kongre, 15-16 Eylül, Bildiriler Kitabı, 903-912, Ankara, Türkiye.
- Gül, R. ve Türkmen, İ. 1998. Van-Erciş pomzasından üretilen hafif betonun donma çözülme dayanıklılığının araştırılması. DSİ, Beton-Çimento ve Boya Semineri, Ankara.
- Gündüz, L. 1998. Pomza Teknolojisi (Pomza Karakterizasyonu). *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi*, 1,218.
- Gündüz, L., Şapçı, N. ve Bekar, M. 2006. Genleştirilmiş kilin hafif agregası olarak kullanılabilirliği. *Kil Bilimi ve Teknolojisi Dergisi*, 1:2, 43-49.
- Gürol, M., Tasdemir, M. A. and Kocataskın, F. 1988. A comparative experimental study of reinforced lightweight concrete roof slabs. *Civil Engineering Practice*, 3:2, 59-66.

- Haque, M. N., Al-Khaiat, H. and Kayali, O. 2004. Strength and durability of lightweight concrete. *Cement & Concrete Composites*, 26, 307-314.
- Harris, K. 1994. Diatomite, stability under threat. *Industrial Minerals*, 31- 43.
- Hızal, S. 2010. Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif betonun tasarımı ve durabilite özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, İzmir.
- Hodul, Y. 2009. Genleştirilmiş perlit üretimi sanayi profili. Sanayi Araştırma ve Geliştirme Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Hossain, K. M. A. 2007. Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 1491–1499.
- Hughes, D. G., Knight, G. F. and Mansky, E. F. 2002. Self-consolidating concrete case studies show benefits to Precast Concrete Producers. First north American conference on the design and use of self consolidating concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 405-412, Illinois, USA.
- Hüsem, M. ve Durmuş, A. 1993. Karadeniz Bölgesi hafif agregalar ile üretilen taşıyıcı betonlar. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, Teknik Kongre, 1-3 Kasım, Bildiriler Kitabı, 580-588, Gazimagusa, Kuzey Kıbrıs.
- Hüsem, M. ve Durmuş, A. 1995. Hafif beton-donatı aderansının geleneksel beton donatı aderansıyla karşılaştırmalı olarak incelenmesi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XII, Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, 1,341-354.
- Hwang, C. L. and Hung, M. F. 2005. Durability design and performance of self consolidating lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 19, 619-626.
- Iqbal, S., Ahsan, A., Holschemacher, K. and Bier, T. 2015. Mechanical properties of steel fiber reinforced high strength lightweight self compacting concrete. *Construction and Building Materials* 98, 315-333.
- İpek, S. 2013. Improving the ductility properties of lightweight concretes by steel fiber addition. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 122, Gaziantep.
- Kadiroğlu, İ. 2004. Kendiliğinden yerleşen normal dayanımlı hafif beton üzerine deneysel bir çalışma. Türkiye Hazır Beton Birliği, Beton Bildiriler Kitabı 301-311.
- Kaffetzakis, M. I. and Papanicolaou, C. G. 2011. Fiber-reinforced pumice aggregate self compacting concrete. Fib symposium, 8-10 June, Symposium book, 281-284, Prague, Czech Republic.

- Kaffetzakis, M. I. and Papanicolaou, C. G. 2012. Bond behavior of pumice aggregate self compacting concrete (PASCC). Conference paper: Bond in Concrete At: Brescia, Italy.
- Kaldı, C. 2011. Taşıyıcı hafif beton tasarımı ve çok katlı binalarda kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 216, İzmir.
- Karaca, Z. 1996. Bir sentez çalışması ışığında nervürlü donatılı hafif ve geleneksel betonarme kiriş davranışlarının karşılaştırılması olarak incelenmesi. Yüksek lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 125, Trabzon.
- Karahan, O. 2006. Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 274, Adana.
- Karaman, M. E. ve Kibici, Y. 2008. *Temel jeoloji prensipleri*. Belen yayıncılık ve matbaacılık, Ankara.
- Kaşıkçı, İ. E. 2018. Lif takviyeli polimer (FRP) donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 95, Konya
- Keskiner, E. 2016. Bitlis pomzası ile kendiliğinden yerleşen fiber takviyeli hafif beton tasarımı ve özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Bitlis.
- Khayat, K. H. and Morin, R. 2002. Performance of self-consolidating concrete used to repair parapet wall in Montreal. First north American conference on the design and use of self consolidating concrete, November 12-13, North Western University publishing, 475-481, Illinois, USA.
- Kılınç, C. 2007. Katkı dozajı ve taze beton sıcaklığının kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, İstanbul.
- Kocaman, B. 2000. Doğu Anadolu Bölgesindeki doğal hafif ve normal agregalarla üretilen betonların fiziksel, mekanik ve ısı iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi ile tarımsal yapılarda kullanılma olanakları üzerine bir araştırma. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı, 152, Erzurum.
- Koçkal, N.U. ve Özturan, T. 2011. Sinterleme sıcaklığının uçucu kül hafif agregaların özelliklerine etkisi. *Cement and Concrete Composites*, 33:1, 61-67.
- Konuk, H. 2003. Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 70, İstanbul.

- Korkmaz, S. 2011. Kendiliğinden yerleşen lifli betonların çekme elemanlarında kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 131, Samsun.
- Kurugül, S. 1997. Çelik tel donatı ve polimer katkının normal ve hafif betonların mukavemet özelliklerine etkileri. Doktora Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, 174, İstanbul.
- Kurt, M. 2009. Kendiliğinden yerleşen hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 216, Erzurum.
- Lars, M. and Tviksta, G. 2000. SCC: Guidelines, TR9-V9, End Product, Brite Euran Proposal Lea, The Chemistry of Cement and Concrete. *Chemical Publishing C.O.* New York, USA.
- Li, L. S. and Hwang, C. L. 2002. A Quality assurance system of SCC in Taiwan. First north American conference on the design and use of self consolidating concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 275-280, Illinois, USA.
- Libre, N, A., Shekarchi, M., Mahoutian, M. and Soroushian, P. 2011. Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25, 2458-2464.
- Lo, T., Tang, P. W. C., Cui, H. Z. and Nadeem, A. 2007. Comparison of and workability mechanical properties of self-compacting lightweight concrete and normal self-compacting concrete. *Materials Research Innovations*, 11, 45-50.
- Long, A. E., Henderson, G. D. and Montgomery, F. R. 2001. Why assess the properties of near surface concrete. *Construction and Building Material* 15, 65-7.
- Martin, D. J. 2002. Economic Impact of SCC in Precast Applications. First north American conference on the design and use of self consolidating concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 153-158, Illinois, USA.
- Mindess, S. and Young, J. 1981. *Concrete*. Prentice-Hall. Inc, 671, New Jersey.
- MTA, 1985. Türkiye perlit anvanteri. Maden Tetkik Arama Müdürlüğü yayın no: 193, Ankara.
- Mullarky, J. I. and Vanikar, S. 2000. Opportunities and challenges for SCC in highway structures. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Conference books, 185-190, Illinois, USA.
- Neville, A. M. and Brooks, J. J. 1987. *Concrete Technology*. Addison Wesley Longman Ltd, Edinburgh Gate, Harlow, Essex CM20 2JE 290.

- Neville, A. M. 1995. *Properties of concrete*. Longman Group, Burnt Mill, Harlow Essex CM 20 2JE, England. ISBN: 0-582-23070-5, 844, London.
- Okamura, H. and Ozawa, K. 1995. Mix design for self-compacting concrete. *Concrete. Library of Japan Society of Civil Engineers*, 25, 107-120.
- Okamura, H. 1997. Self compacting high performance concrete, *Concrete International*, 19:7, 50-54.
- Okamura, H. and Ouchi M. 1999. Self-compacting concrete. Development, present use and future proceedings of the First International RILEM Symposium, Edited by A.Skarendahl and Ö. Petersson, RILEM publishing, 3-14, Stockholm, Sweden.
- Ouchi, M. 1999. *Self-compacting concrete–Development, applications and investigations*. Nordic Concrete Research Committee Publications, 5p
- Önem, Y. 1997. *Sanayi Madenleri*. Kozan Ofset Matbaacılık Sanayi ve Ticaret. Ltd. Şti. 278-286, Ankara.
- Özgüler, A. T. 2007. Kendiliğinden yerleşen betonların mekaniksel özelliklerine agrega tipinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, 63, Elazığ.
- Özkul, M. H., Doğan, Ü. A., Işık, İ. E., A.R. Sağlam, A. R. ve Parlak, N. 2006. Kendiliğinden yerleşen beton: temel ilkeler ve özellikler, *THBB Hazır Beton Dergisi*, 74: 54-61.
- Özkul, M. H., Işık, İ. E., Sağlam, A. R. ve Parlak, N. 2005. Kendiliğinden yerleşen betonlarda viskozite düzenleyici katkı kullanımı. 6. Ulusal Beton Kongresi Bildirileri, 16-18 Kasım, İMO İstanbul Şubesi, Bildiriler Kitabı, 421-435, İstanbul.
- Özkul, M. H., Mutlu, M. ve Sağlam A. R. 2007. Beton Ankrajları. *Sika Teknik Bülteni*, 155-163.
- Perez N., Hermida, G., Romero H. and Cuellar, G. 2002. Self-Compacting concrete, on the search and finding of an optimized design. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 105-112, Illinois, USA.
- Person, B. 2001. A comparison between mechanical properties of self compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 193-198.
- Petersson, Ö. and Hakami, H. 2001. Simulation of SCC laboratory experiments and numerical modeling of slump flow and L-box tests, Proceeding of 2nd international RILEM symposium on SCC, 23-25 October, Rilem Publishing, 79-88, Tokyo.

- Popal, M. 2015. Düşük dayanımlı betonlarda aderans ve sıyrılma ilişkisi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, Isparta.
- Postacıoğlu, B. ve Taşdemir, M. A. 1986. Depreme dayanıklı yapılarda doğal hafif agregalı betonlardan yararlanılması. Yapı Endüstri Merkezi, *Deprem Semineri Bildiriler Kitabı*. İstanbul.
- Punkki, J., Golaszewski, J. and Gjørvi, O. E. 1996. Workability loss of high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, 427–431.
- Raghavan, K. P., Sarma, B. S. and Chattopadhyay, D. 2002. Creep, shrinkage and chloride permeability properties of self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 341-348, Illinois, USA.
- Ramachandran, V. and Malhotra, H. 1984. *Concrete admixtures handbook*. Noyes Publications, Park Ridge, 410-460, New Jersey, U.S.A.
- Ramsburg, P. and Neal, R. E. 2002. The use of a natural pozzolan to enhance the properties of self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 451-456, Illinois, USA.
- RILEM Recommendation. 1975. LC2, Functional Classification of Lightweight Concrete, Paris, France.
- Roshavelov, T. 2002. Concrete Mixture Proportioning Based on Rheological Approach. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 113-120, Illinois, USA.
- Rols, S., Ambrosie, J. and Pera J. 1999. Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. *Cement Concrete Research*, 29, 261-266.
- Saatçi, S. ve Batarlar, B. 2017. Çelik fiber katkılı etriyesiz betonarme kirişlerin davranışı. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32:4, 1143-1154.
- Sağlam, A. R. 2000. Süper akışkanlaştırıcı ve viskozite arttırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkisi. *Sika Teknik Bülten*, 4, 9-16.
- Sağsöz, A. E. 2007. Farklı kür şartlarının doğal perlit agregalı betonların mekanik özelliklerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 129, Erzurum.
- Sahmaran, M., Yurtseven, A. and Yaman, O. I., 2005. Workability of hybrid fiber reinforced self compacting concrete. *Building and Environment*, 40, 1672-1677.

- Sancak, E. 2005. Silis dumanı katkılı bimsbetonların özellikleri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, 187, Ankara.
- Sancak, E., Simsek, O. and Apay, A. C. 2011. A comparative study on the bond performance between rebar and structural lightweight pumice concrete with/without admixture. *International Journal of the Physical Sciences*, 6:14, 3437–3454.
- Sari, M., Prat, E. and Labastire, J. F. 1999. High strength self-compacting concrete original solutions associating organic and inorganic admixtures. *Cement Concrete Research*, 29, 813–818.
- Sarıdemir, H. 2006. Mineral ve süper akışkanlaştırıcı katkıların kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirlik ve basınç dayanımına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 88, Kayseri.
- Schulz, B. 1997. Zum Entwurf von Leichtbeton bestimmter Festigkeit. *Beton*, 2: 61-65.
- Skarendahl, A. and Petersson, O. 2000. Self Compacting Concrete. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee, 174-SCC.
- Sertbaş, B. 2006. Kendiliğinden yerleşen betonlarda polipropilen lif kullanımının işlenebilirliğe etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 66, İstanbul.
- Severcan, M, H., Kara, İ. F. and Akçaözoğlu, K. 2016. Değişik yüklemeler etkisi altında farklı donatı oranlarına sahip betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların deneysel olarak incelenmesi. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5:2, 135-147.
- Shi, C., Wu, Y., Shao, Y. and Riefler, M. 2002. Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 349-354, Illinois, USA.
- Söylev, T. A. 2011. The Effect of Fibers on the Variation of Bond Between Steel Reinforcement and Concrete with Casting Position. *Construction and Building Materials*, 25, 1736-1746.
- Stark, J. and Friebert, M. 2005. Some Aspects of Cement Chemistry Regarding Self-Compacting Concrete (SCC). First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, 26-28 May, Rilem Publishing, 237-244, Hunan, China.
- Subaşı, S. 2009. Genleştirilmiş kil agregası ile taşıyıcı hafif beton üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24: 3, 559-567.

- Subaşı, S. and Kap, T. 2009. Genleştirilmiş kil agregalı hafif betonun yapı davranışı ve kaba yapı maliyetine etkisi. *Dergi Park, Technological Applied Sciences*, 4: 1, 48-54.
- Şahin, R. 1996. Kocapınar pomzası ile üretilen hafif betonun mukavemetinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 128, Erzurum.
- Şapçı, N. 2008. Aksaray bölgesi volkanik hafif agrega oluşumlarının incelenmesi ve endüstriyel kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, 141, Isparta.
- Tanyıldızı, H. 2006. Beton tipi ve donatı boyutlarının beton ve çelik yüzeyleri arası dayanıma etkisinin kür şartları altında incelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 78, Elazığ.
- Taşdemir, M. A. 1982. Taşıyıcı hafif betonların elastik ve elastik olmayan davranışları. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, İstanbul.
- Taşdemir, M. A. ve Barramov, F. 2002. Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 1:2, 125-144.
- Taşdemir, C. 2003. Hafif betonların ısı yalıtım ve taşıyıcılık özellikleri. *Türkiye Mühendislik haberleri*, Sayı 427-2003/5.
- Taşdemir, C. ve Şengül, Ö. 2013. Hafif betonların fiziksel ve mekanik özellikleri. Türkiye Hazır Beton Birliği Beton Bildirileri, 21-24 Şubat, Bildiriler Kitabı, 29-51, İstanbul.
- Taşkın, V. 2016. Bitlis pomzası ile kendiliğinden yerleşen hafif beton tasarımı ve özelliklerinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, Bitlis.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi Başkanlığı, 1994. Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton. Ankara.
- TMMOB, Maden Mühendisleri Odası 1989. *Madencilik*. 28:2, 64-65.
- Tohumcu, İ., Bingöl, A. F., 2013. Silis Dumanı ve uçucu kül katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze beton özellikleri ve basınç dayanımları. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15:2, 31-44.
- TS 10514. 1992. Beton-Çelik Lif Takviyeli; Çelik Teller: Betona Karıştırma ve Kontrol Kuralları. TSE-Ankara.

- TS 1114 EN 13055-1, 2004. Hafif Agregalar-Bölüm 1: Beton; Harç ve Şerbetle kullanım İçin. TSE-Ankara.
- TS 2511. 2017. Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları. TSE-Ankara.
- TS 4834. 1986. Beton ile ilgili terimler. TSE-Ankara.
- TS EN 206-1. 2000. Beton; Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TSE-Ankara.
- Turcry, P., Loukili, A. and Haidar, K., 2002. Mechanical properties, plastic shrinkage and free deformations of Self-Consolidating Concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-consolidating Concrete: Conference Proceedings 12-13 November, North Western University publishing, 301-306, Illinois, USA.
- Turgutalp, Ü. 1978. Sarıkamış yöresi doğal hafif agregasıyla üretilen betonların tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları üzerine bir çalışma. Doçentlik Tezi, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum.
- Tuyan, M., Mardani, A. ve Ramyar, K. 2014. Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991.
- Tuygun, C. S. 2002. Çayırhan uçucu külünün betonun mekanik özelliklerine etkisi ve etkinlik faktörünün incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 76, İstanbul.
- Türker, S. ve Balanlı, A. 1992. *Yapı Malzemeleri*. Yıldız Teknik Üniversitesi, 45-72, İstanbul.
- Türker, P. Erdoğan, K. ve Erdoğan, B. 2001. Farklı tiplerde agregalar içeren yangına maruz kalmış harçların incelenmesi. *Çimento ve beton dünyası TÇMB*, 31, 52-60, Ankara.
- Türkmen, R. 1997. Van-Erciş pomzasından üretilen hafif betonun donma çözülme dayanıklılığının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Erzurum.
- Türkel, S. ve Kadiroğlu, B. 2007. Pomza agregali taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi* 13:3, 353-359.
- Uğur, A. 2007. Lif donatıların yüksek dayanımlı betonlarda yarma dayanımı-basınç dayanımı ilişkisine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Fiziği ve Malzeme Anabilim Dalı, 146, İstanbul.

- Ulus, G., 2007. Ham perlit agregasık kullanılarak yüksek dayanımlı hafif beton üretilebilirliğinin araştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 137, Erzurum.
- Uygunoğlu, T. 2008. Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 170, Isparta.
- Uysal, M. 2010. Mineral katkıları kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonların mekanik özelliklerinin ve dayanıklılığının incelenmesi. Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 268, Sakarya.
- Urhan, S. 1993. Hafif ve Çok hafif Betonların Karakteristik Özellikleri ve Teknik Kapasiteleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 34-40, İstanbul.
- Walraven, J. 2002. Self-Compacting concrete in the Netherlands. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, Book of Abstracts, 399-404, Illinois, USA.
- Xie, Y., Liu, B., Yin, J. and Zhou, S. 2002. Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash. *Cement Concrete Research*, 32, 477-480.
- Xie, Y., Li, Y. and Long, G. 2005. Influence of Aggregate on Properties of Self-Consolidating Concrete. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-consolidating Concrete, 26-28 May, Rilem Publishing, 161-171, Hunan, China.
- Yahia, A., Tanimura M. and Shimoyama Y. 2002. Evaluation of Deformability of Different Types of Self-Consolidating Concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, 12-13 November, North Western University publishing, 303-310, Illinois, USA
- Yardımcı, M. Y. 2007. Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 405, İzmir.
- Yazıcı, H., Türkel, S. and Baradan, B. 2000. High temperature resistance of pumice mortar. Cement and Concrete Technology in the 2000s second international symposium, 6-10 September, Symposium Book, 457-464, İstanbul, Türkiye.
- Yazıcı, Ş. 2003. Süper akışkanlaştırıcıların betondaki bazı fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 5, 1-10.
- Yazıcı, Ş. ve İnan, S. G. 2010. *Farklı dayanım seviyelerindeki betonlarda beton örtü tabakası kalınlılığının, yüksek sıcaklık seviyesinin ve etki süresinin donatı aderansına etkisi* (TÜBİTAK Projesi, Proje No: 107M345,50), Tubitak, İzmir.

- Yazıcı, H. 2012. Yapı malzemesi II, Sertleşmiş betonun diğer özellikleri. <http://kisi.deu.edu.tr/halit.yazici/> (Erişim tarihi 01.01.2017)
- Yazıcıoğlu, S., Arıcı, E. ve Gönen, T. 2003. Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi, *Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 1, 118-123.
- Yeğınobalı, A, 1997. Hafif beton ve yüksek dayanımlı hafif beton. *Çimento ve Beton Dünyası*, 2:8, 22.
- Yeğınobalı, A. 2002. Structural lightweight concretes produced with natural lightweight aggregates in Turkey. International Congress of the Precast Concrete Industry, BIBM, 1-4 May, Congress book, 86-94, İstanbul, Turkey.
- Yoğurtcu, E. 2005. Kendiliğinden yerleşen taşıyıcı hafif beton. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 143, İzmir.
- Yücel, K. T., Özel, C., Uygunoğlu, T., Gülmez, S. ve Kuşçu, A., 2006. *Normal ve fiber takviyeli betonlarda donatı-beton aderans dayanımının belirlenmesi ve bulanık mantıkla modellenmesi* (Proje No: İÇTAG-A049, 44), İÇTAG, Isparta.
- Zhu, W. and Gibbs, J. C. 2005. Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 35, 1457–1462.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selim KORKMAZ

Doğum Yeri : Alaca/ ÇORUM

Doğum Tarihi : 01.01.1973

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Şehit Nedim Tuğaltay Lisesi (1989)

Lisans : Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği (1994)

Yüksek Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi Yüksek Lisans (2011)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Hitit Üniversitesi 2003-Devam ediyor

Yayımlar

Korkmaz, S., Birinci, F. INCREASING THE TENSILE STRENGTH OF FIBER REINFORCED SELF-COMPACTING-CONCRETE, AND EFFECTS OF FIBER TYPE AND ORIENTATION, Romanian Journal of Materials, 2017. (SCI-Expanded), 47(3), 361-369.