

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAFİF AGREGALI BETONUN BOŞLUK YAPISININ
MEKANİK VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERE ETKİSİ

İnş. Yük. Müh. Nihat KABAY

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında

Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 02 Mart 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fevziye AKÖZ (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Erol GÜRDAL (İTÜ)

: Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR (İTÜ)

: Prof. Dr. İsmail TEKE (YTÜ)

: Doç. Dr. Nabi YÜZER (YTÜ)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KONU İLE İLGİLİ KAYNAK TARAMASI	4
2.1 Hafif Betonun ve Hafif Agregaların Tarihçesi	5
2.2 Hafif Betonların Sınıflandırılması	7
2.2.1 Taşıyıcı hafif betonlar	7
2.2.2 Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları	7
2.2.3 Yalıtım hafif betonu	7
2.3 Hafif Beton Özellikleri	9
2.3.1 Taze beton özellikleri	9
2.3.2 Sertleşmiş beton özellikleri	10
2.3.2.1 Yoğunluğu	11
2.3.2.2 Basınç dayanımı	11
2.3.2.3 Çekme dayanımı	13
2.3.2.4 Şekil değiştirmesi	13
2.3.2.5 Elastisite modülü	14
2.3.2.6 Sünmesi	14
2.3.2.7 Rötresi	15
2.3.2.8 Yorulması	16
2.3.2.9 Su emmesi	17
2.3.2.10 Karbonatlaşması	17
2.3.2.11 Isıl özellikleri	18
2.3.2.12 Buhar difüzyonu	20
2.3.2.13 Akustik özellikler	21
2.4 Hafif Betonun Dayanıklılığı	21
2.4.1 Kimyasal etkilere dayanıklılığı	22
2.4.2 Donma-çözülme etkisine dayanıklılığı	23
2.4.3 Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı	24
2.4.4 Aşınma direnci	24
2.4.5 Donatı korozyonuna etkileri	24

2.5	Hafif Beton Agregaları	25
2.5.1	Hafif agregaların özellikleri.....	26
2.5.1.1	İçyapı özellikleri	26
2.5.1.2	Tane şekli ve yüzey dokusu.....	26
2.5.1.3	Birim ağırlık	26
2.5.1.4	Özgül ağırlık	27
2.5.1.5	Su emme	27
2.5.2	Ponza	29
2.6	Betonda Boşluk Yapısı	30
3.	DENEYSEL ÇALIŞMA.....	40
3.1	Malzemeler	41
3.1.1	Agrega	41
3.1.1.1	Agregaların suya doyurulması.....	42
3.1.2	Çimento	44
3.1.3	Kimyasal katkıları.....	44
3.2	Numune Üretimi ve Kodlanması	45
3.3	Taze Beton Deneyleri	46
3.3.1	Çökme (Slump) deneyi	46
3.3.2	Ve-Be deneyi	47
3.3.3	Yoğunluk deneyi.....	47
3.4	Numunelerin Kürü	47
3.4.1	Basınç deneyi numuneleri	47
3.4.2	Isı iletim katsayısı deney numuneleri	48
3.4.3	Buhar difüzyonu numuneleri	48
3.4.4	Rötre numuneleri	48
3.5	Sertleşmiş Beton Deneyleri	48
3.5.1	Yoğunluk deneyi.....	49
3.5.2	Su emme deneyi.....	49
3.5.2.1	Hacimce su emme.....	49
3.5.2.2	Kapiler su emme deneyi	49
3.5.3	Isı iletim katsayısını belirleme deneyi	50
3.5.4	Buhar difüzyonu deneyi.....	51
3.5.5	Ultras ses deneyi	52
3.5.6	Boy değişimi ölçümleri	53
3.5.7	Basınç deneyi.....	53
3.5.7.1	Elastisite modülü	54
3.5.8	Yarma deneyi.....	54
3.5.9	Boşluk yapısının incelenmesi	55
3.5.9.1	Optik mikroskop incelemesi	55
3.5.9.2	Cıva porozimetresi incelemesi.....	55
4.	DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	56
4.1	Taze Beton Özellikleri.....	56
4.1.1	Çökme (Slump).....	56
4.1.2	Ve-Be süresi	57
4.1.3	Yoğunluk	58
4.2	Sertleşmiş Beton Özellikleri	59
4.2.1	Boşluk parametreleri.....	59
4.2.1.1	Porozite	59
4.2.1.2	Ortalama boşluk boyutu.....	61

4.2.2	Basınç dayanımı	63
4.2.2.1	Basınç dayanımı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler.....	65
4.2.3	Elastisite modülü	67
4.2.3.1	Elastisite modülü ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler.....	68
4.2.4	Yarma dayanımı	70
4.2.4.1	Yarma dayanımı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler.....	71
4.2.5	Yoğunluk	73
4.2.6	Hacimce su emme.....	74
4.2.6.1	Hacimce su emme ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler	75
4.2.7	Kapiler su emme	77
4.2.7.1	Kapiler su emme ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler	77
4.2.8	Su buharı difüzyon direnç faktörü	79
4.2.8.1	Su buharı difüzyon direnç faktörü ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler ...	80
4.2.9	Isı iletim katsayısı	81
4.2.9.1	Isı iletim katsayısı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler	82
4.2.9.2	Ultras ses geçiş hızı	84
4.2.9.3	Rötre	85
5.	DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	87
5.1	Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Boşluk Parametreleri ile İlişkilendirilmesi	87
5.1.1	Basınç dayanımının boşluk parametreleri ile ilişkisi.....	87
5.1.2	Isı iletim katsayısının boşluk parametreleri ile ilişkisi	92
5.1.3	Su buharı difüzyon direnç faktörünün boşluk parametreleri ile ilişkisi	93
5.2	Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin İrdelenmesi.....	95
5.2.1	Beton serilerinin statik açıdan irdelenmesi.....	96
5.2.2	Beton serilerinin ısı yalıtımı açısından irdelenmesi	97
5.3	Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Karşılaştırılması	101
5.3.1	Taze beton özelliklerinin karşılaştırılması.....	102
5.3.2	Sertleşmiş beton özelliklerinin karşılaştırılması	102
6.	SONUÇ ve ÖNERİLER	105
KAYNAKLAR.....		107
EKLER		113
ÖZGEÇMİŞ.....		131

SİMGE LİSTESİ

a	1m^3 betondaki toplam agreganın mutlak hacmi
A	Yüzey alanı
A_iO	İnce agreganın hacim oranı
AO	Agreganın hacim oranı
d	Kalınlık
E	Elastisite modülü
f_c	Basınç dayanımı
f_{co}	Sıfır porozite için teorik basınç dayanımı
f_{ck}	Karakteristik basınç dayanımı
f_{ct}	Yarma dayanımı
F	Kırma yükü
D	Yoğunluk
D_k	Difüzyon katsayısı
D_m	Ortalama boşluk çapı
g	Su buharı geçirgenlik hızı
G	Birim zamanda kütlede meydana gelen değişim
m	Kapiler su emme miktarı
p	Porozite
p_o	Sıfır dayanım için kritik porozite
P	Su buharı basıncı
$\dot{q}$	Isı akış yoğunluğu
R	Isıl geçirgenlik direnci
R_i	İç yüzey ısı iletim direnci
R_e	Dış yüzey ısı iletim direnci
R_h	Nem içeriği
r_m	Ortalama boşluk yarıçapı
S	Özgül yüzey
S_d	Su buharı difüzyonu eş değer hava tabakası kalınlığı
t	Süre
T	Sıcaklık
U	Isıl geçirgenlik katsayısı
V	Ses geçiş hızı
W	Su buharı geçirgenliği
W_o	Etüv kurusu ağırlık
W_{SH}	Suya doygun numunenin havadaki ağırlığı
W_{SS}	Suya doygun numunenin su içindeki ağırlığı
β	Agrega birim ağırlığı
ε	Şekil değiştirme
ε_r	Rötre
$\partial T / \partial n$	Sıcaklık gradyanı
δ	Su buharı özgeçirgenliği
Δl	Boy değişimi
ΔP	Su buharı basınç farkı
γ	Agrega özgül ağırlığı
λ	Isı iletim katsayısı
μ	Su buharı difüzyon direnç faktörü
σ	Gerilme

KISALTMA LİSTESİ

a	Hava sürükleyici katılmamış beton
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
b	% 0.3 Hava sürükleyici katılmış beton
C	Concrete
EK	Etüv Kuru
LC	Lightweight concrete
N	Laboratuar ortamı nemliliğindeki ponza agregası ile üretilen beton
RILEM	Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux, Systemes de Construction et Ouvrages
S	Suya doymun yüzey kuru ponza agregalı beton
SDYK	Suya Doymun Yüzey Kuru
TS	Türk Standartları
TS EN	Türk Standartları European Norm
V	Vakumlanarak suya doyumulan ponza agregalı beton

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Hafif agregaların tipik su emme-zaman ilişkisi (Lamond ve Pielert, 2006)	28
Şekil 2.2 Hidrate çimento hamurundaki boşluk sistemi (Neville, 2000).....	31
Şekil 2.3 Çimento hamurundaki boşluklar (Baradan vd., 2002)	31
Şekil 2.4 Boşluk çaplarının sınıflandırılması (Moon vd., 2006)	32
Şekil 2.5 İdealize edilmiş birim hücre (Bhattacharjee ve Krishnamoorthy, 2004)	39
Şekil 3.1 Beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ait granülometri eğrisi	42
Şekil 3.2 Agregaların vakumlanarak suya doyurulması	43
Şekil 3.3 Taze betonda çökmenin ölçülmesi (TS EN 12350-2)	47
Şekil 3.4 Kapiler su emme deneyi	49
Şekil 3.5 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plâka cihazı	50
Şekil 3.6 Buhar geçirimsizliği deney düzeneği	51
Şekil 3.7 Ses geçiş süresinin ölçümü.....	53
Şekil 3.8 Boy değişimi ölçümleri	53
Şekil 3.9 Gerilme – Şekil değiştirme grafiği	54
Şekil 3.10 Yarma deneyi	54
Şekil 4.1 Taze betonun çökmesi	56
Şekil 4.2 Taze betonun Ve-Be süresi	57
Şekil 4.3 Taze betonun yoğunluğu	58
Şekil 4.4 Optik mikroskop ile belirlenen porozitenin zamana bağlı değişimi	60
Şekil 4.5 Cıva porozimetresi ile belirlenen porozitenin zamana bağlı değişimi	60
Şekil 4.6 Toplam porozitenin zamana bağlı değişimi	61
Şekil 4.7 Ortalama boşluk boyutunun (D_m) zamana bağlı değişimi.....	62
Şekil 4.8 Ortalama boşluk yarıçapının (r_m) zamana bağlı değişimi	62
Şekil 4.9 Küp numunelerin ortalama basınç dayanımı.....	63
Şekil 4.10 Tüm serilerde basınç dayanımının zamana bağlı değişimi	64
Şekil 4.11 Toplam porozite - basınç dayanımı ($\%p_t-f_c$) ilişkisi.....	65
Şekil 4.12 Ortalama boşluk çapı - basınç dayanımı (D_m-f_c) ilişkisi.....	66
Şekil 4.13 Ortalama boşluk yarıçapı - basınç dayanımı ilişkisi (r_m-f_c).....	66
Şekil 4.14 Elastisite modülünün zamana bağlı değişimi	67
Şekil 4.15 Toplam porozite - elastisite modülü ($\%p_t-E$) ilişkisi.....	69
Şekil 4.16 Ortalama boşluk çapı - elastisite modülü (D_m-E) ilişkisi.....	69
Şekil 4.17 Ortalama boşluk yarıçapı - elastisite modülü ilişkisi (r_m-E).....	69
Şekil 4.18 Yarma dayanımının zamana bağlı değişimi	70

Şekil 4.19 Toplam porozite - yarma dayanımı ($\%p_t-f_{ct}$) ilişkisi	71
Şekil 4.20 Ortalama boşluk çapı - yarma dayanımı (D_m-f_{ct}) ilişkisi	72
Şekil 4.21 Ortalama boşluk yarıçapı - yarma dayanımı ilişkisi (r_m-f_{ct})	72
Şekil 4.22 Farklı doygunluktaki ponza agregalı betonların etüv kurusu yoğunluğu.....	73
Şekil 4.23 Farklı doygunluktaki ponza agregalı betonların suya doygun yoğunluğu	73
Şekil 4.24 Hacimce su emmenin zamana bağlı değişimi	75
Şekil 4.25 Toplam porozite - hacimce su emme oranı ($\%p_t-h_s$) ilişkisi	75
Şekil 4.26 Ortalama boşluk çapı - hacimce su emme oranı ilişkisi.....	76
Şekil 4.27 Ortalama boşluk yarıçapı – hacimce su emme oranı ilişkisi (r_m-h_s).....	76
Şekil 4.28 Kapiler su emmenin zamana bağlı değişimi.....	77
Şekil 4.29 Toplam porozite - kapiler su emme ($\%p_t-m$) ilişkisi.....	78
Şekil 4.30 Ortalama boşluk çapı - kapiler su emme (D_m-m) ilişkisi.....	78
Şekil 4.31 Ortalama boşluk yarıçapı – kapiler su emme ilişkisi (r_m-m).....	78
Şekil 4.32 Su buharı difüzyon direnç faktörünün zamana bağlı değişimi.....	79
Şekil 4.33 Toplam porozite – su buharı difüzyon direnç faktörü ($\%p_t-\mu$) ilişkisi	80
Şekil 4.34 Ortalama boşluk çapı – su buharı difüzyon direnç faktörü ($D_m-\mu$) ilişkisi.....	81
Şekil 4.35 Ortalama boşluk yarıçapı – su buharı difüzyon direnç faktörü ilişkisi ($r_m-\mu$).....	81
Şekil 4.36 Isı iletim katsayısının zamana bağlı değişimi.....	82
Şekil 4.37 Toplam porozite - ısı iletim katsayısı ($\%p_t-\lambda$) ilişkisi	83
Şekil 4.38 Ortalama boşluk çapı – ısı iletim katsayısı ilişkisi.....	83
Şekil 4.39 Ortalama boşluk yarıçapı – ısı iletim katsayısı ilişkisi ($r_m-\lambda$)	84
Şekil 4.40 Ses geçiş hızının zamana bağlı değişimi	84
Şekil 4.41 Rötrenin zamanla değişimi (ϵ_t-t)	86
Şekil 5.1 Bal'shin modeli	89
Şekil 5.2 Ryshkewitch modeli	89
Şekil 5.3 Schiller modeli	89
Şekil 5.4 Hasselman modeli	90
Şekil 5.5 Atzeni modeli	90
Şekil 5.6 Basınç dayanımı - $\%p_{<10nm}$ arasındaki ilişki	91
Şekil 5.7 Basınç dayanımı - $\%p_{10nm-3\mu m}$ arasındaki ilişki	91
Şekil 5.8 Basınç dayanımı - $\%p_{100-625\mu m}$ arasındaki ilişki.....	92
Şekil 5.9 Isı iletim katsayısı - $\%p_{<10nm}$ arasındaki ilişki.....	92
Şekil 5.10 Isı iletim katsayısı - $\%p_{10nm-3\mu m}$ arasındaki ilişki.....	93
Şekil 5.11 Isı iletim katsayısı - $\%p_{100-625\mu m}$ arasındaki ilişki	93

Şekil 5.12 Su buharı difüzyon direnç faktörü - % $p_{<10nm}$ arasındaki ilişki	94
Şekil 5.13 Su buharı difüzyon direnç faktörü - % $p_{10nm-3\mu m}$ arasındaki ilişki.....	94
Şekil 5.14 Su buharı difüzyon direnç faktörü - % $p_{100-625\mu m}$ arasındaki ilişki	95
Şekil 5.15 Aralık ayı için buhar basınç grafiği.....	100
Şekil 5.16 Ocak ayı buhar basınç grafiği.....	100
Şekil 5.17 Şubat ayı buhar basınç grafiği.....	100
Şekil Ek1 Farklı seri betonlarda basınç dayanımının zamanla değişimi (f_c-t)	113
Şekil Ek2 Agreganın nemliliğinin basınç dayanımına etkisi.....	114
Şekil Ek3 Yarma dayanımının zamanla değişimi ($f_{ct}-t$)	115
Şekil Ek4 Agreganın nemliliğinin yarma dayanımına etkisi.....	116
Şekil Ek5 Elastisite modülünün zamanla değişimi ($E-t$).....	117
Şekil Ek6 Agreganın nemliliğinin elastisite modülüne etkisi	117
Şekil Ek7 Hacimce su emmenin zamanla değişimi (% h_s-t)	118
Şekil Ek8 Kapiler su emmenin zamanla değişimi ($m-t$).....	119
Şekil Ek9 Su buharı difüzyon direnç faktörünün zamanla değişimi ($\mu-t$).....	120
Şekil Ek10 Isı iletim katsayısının zamanla değişimi ($\lambda-t$).....	121
Şekil Ek11 Ses geçiş hızının zamanla değişimi ($V-t$).....	122
Şekil Ek12 Agreganın nemliliğinin rötrene etkisi	124
Şekil Ek13 Optik mikroskop ile belirlenen porozitenin zamanla değişimi (% $p_{om}-t$)	125
Şekil Ek14 Ortalama boşluk çapının zamanla değişimi (D_m-t).....	126
Şekil Ek15 Cıva porozitesi deneyi ile belirlenen porozitenin zamanla değişimi (% $p_{Hg}-t$).....	127
Şekil Ek16 Ortalama boşluk yarıçapının zamanla değişimi (r_m-t)	128

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Bazı hafif betonların genel özellikleri (Neville, 2000).....	4
Çizelge 2.2 Hafif betonun sınıflandırılması	8
Çizelge 2.3 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması (TS EN 206-1)	8
Çizelge 2.4 Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları (TS EN 206-1)	9
Çizelge 2.5 Hafif agrega gevşek birim ağırlıkları	25
Çizelge 2.6 Hafif agregaların bazı özellikleri (Clarke, 1993)	27
Çizelge 2.7 Ponzanın kimyasal özellikleri (Gündüz, 1998)	29
Çizelge 2.8 Kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli süre (Baradan vd., 2002).....	33
Çizelge 2.9 Betondaki boşluk boyutları	35
Çizelge 2.10 Dayanım-porozite ilişkisi (Bouguerra, 1998).....	35
Çizelge 3.1 Agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları.....	41
Çizelge 3.2a Ponza taşının fiziksel özellikleri.....	42
Çizelge 3.2.b Ponza taşının mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 3.3 Ponza agregasının kimyasal özellikleri	42
Çizelge 3.4 Üretimde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	44
Çizelge 3.5 Kimyasal katkı maddelerinin özellikleri	44
Çizelge 3.6a Numunelerin kodlanması.....	45
Çizelge 3.6b Numune kodlarının açılımı.....	45
Çizelge 3.7 1 m ³ taze beton için gerekli malzeme miktarları	46
Çizelge 5.1 Boşluk yarıçapı aralıklarına bağlı olarak porozitenin değişimi.....	88
Çizelge 5.2 Beton serilerinin sınıflandırılması	95
Çizelge 5.3 Modellemede kullanılan malzeme bilgileri.....	96
Çizelge 5.4 Proje bilgileri.....	96
Çizelge 5.5 Statik hesap sonuçları ve değişim oranları	97
Çizelge 5.6 Duvar kesiti ve malzeme bilgileri	97
Çizelge 5.7 İstanbul ili için iklim şartları (TS 825).....	98
Çizelge 5.8 Normal betonlu kesitte yoğuşma kontrolü sonuçları.....	99
Çizelge 5.9 Hafif betonlu kesitte yoğuşma kontrolü sonuçları	99
Çizelge 5.10 Hafif beton ile normal betonun statik ve ısı yalıtımı açısından değerlendirilmesi	101
Çizelge 5.11 Taze beton özelliklerinin karşılaştırılması	102
Çizelge 5.12 Mekanik özelliklerin karşılaştırılması	103
Çizelge 5.13 Fiziksel özelliklerin karşılaştırılması.....	103
Çizelge 5.14 Beton serilerinin karşılaştırılması.....	104

Çizelge 5.15 Beton özelliklerinin agrega doygunluğuna göre karşılaştırılması	104
Çizelge Ek1 Taze beton deney sonuçları.....	128
Çizelge Ek2 Sertleşmiş beton deney sonuçları.....	129
Çizelge Ek3 Boşluk ölçüm sonuçları	130

ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın yürütücülüğünü üstlenen, çalışmanın her aşamasında değerli zamanını, bilgi ve tecrübelerini aktaran Prof. Dr. Fevziye AKÖZ'e,

Tez izleme süresince, önerileri ile tezin gelişimine destek olan Tez İzleme Jürisi öğretim üyeleri Prof. Dr. Erol GÜRDAL ve Prof. Dr. İsmail TEKE'ye,

Doktora tez çalışmamı destekleyen YTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne,

Alet teminindeki yardımlarından dolayı Prof. Zekeriya POLAT'a,

Bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Prof. Dr. Canan TAŞDEMİR'e ve Doç. Dr. Nabi YÜZER'e,

Deneysel çalışmada gerekli olan cihazların tasarımı ve geliştirilmesi konusunda yardımları için Doç. Dr. Ahmet KOYUN'a,

Tez çalışmam süresince desteğini esirgemeyen Araş. Gör. Ahmet B. KIZILKANAT'a,

Deneysel çalışmanın laboratuvar sürecindeki her aşamasında yardımlarını unutamayacağım Teknisyen Halil YAVAŞCI ve Teknisyen Şahin GÜZEL'e,

Deneysel çalışma sürecindeki yardımlarından dolayı Yapı Malzemeleri Anabilim Dalında Bitirme Ödevi hazırlayan YTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü ve YTÜ MYO İnşaat Programı öğrencilerine,

Çimento teminindeki yardımlarından dolayı NUH Çimento San. A.Ş.'ye, kimyasal katkıların temininde gösterdikleri yardımdan dolayı BASF Yapı Kimyasalları Sanayi A.Ş.'ye,

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım İnş.Yük.Müh. Mustafa AYDIN'a,

Gösterdikleri sonsuz sabır ve destek için aileme ve eşim F. Nur KABAY'a sonsuz teşekkür ederim.

Nihat KABAY

İstanbul, 2009

ÖZET

Yapı üretiminin temel malzemesi olan “normal beton”un yoğunluğu 2400 kg/m^3 civarındadır. Yoğunluğu, 2600 kg/m^3 ’ten fazla olanlar “ağır beton”, etüv kurusu durumdaki yoğunluğu 2000 kg/m^3 ’ün altında olanlar ise “hafif beton” olarak adlandırılır. Hafif betonlar; üretim tekniğine ve malzemesine göre; hafif agregalı betonlar, ince tane betonlar ve gaz betonları olarak; işlevine göre de taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olarak gruplandırılırlar.

Hafif agregalı beton üretiminde, birim ağırlığı düşük doğal ve/veya yapay hafif agregalar kullanılır. Doğal hafif agregalar; tüf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, bentonit vb gözenekli volkanik doğal taşlardan veya diatomit gibi tortul taşlardan elde edilir. Yapay hafif agregalar ise yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi endüstri atıklarından ve perlit, kuvarsit, vermikülit, obsidyen, arduvaz, kil ve şist gibi doğal taşların ısı işlem ile genişletilmesinden elde edilir. Bunlardan başka elyaf, talaş ve testere tozu gibi ahşap atıkları, EPS köpükler, plastik atıklar, hafif tuğla kırıkları ve diğer tarım atığı malzemeler de hafif beton agregası olarak kullanılırlar.

Konu ile ilgili kaynak taramasında; ponza hafif agregası ile üretilmiş betonunun mekanik ve fiziksel özellikleri ile ilgili çalışmalar yapıldığı, agregaların hafif ve gözenekli oluşu nedeni ile beton üretimindeki zorluğun, agregalara su emdirilmesi ya da karma suyunun artırılması ile aşmaya çalışıldığı görülmüştür. Bu yöntemler ile agregaların tam ve homojen olarak suya doyurulduğunu ve agrega-çimento hamuru arayüzünde sürekliliğin sağlandığını söylemek mümkün değildir. Yapılan araştırmada ayrıca; hafif betonların birim ağırlığının ve mekanik özelliklerinin etraflıca araştırıldığı, ısı iletimini doğrudan etkileyen su buharı difüzyon direnç faktörünün ise detaylı araştırılmadığı, hafif betonun boşluk oranı, boyutu ve boşluk dağılımı gibi boşluk parametreleri ile fiziksel ve mekanik özelliklerini ilişkilendiren kapsamlı deneysel çalışmanın eksik olduğu gözlenmiştir.

Bu eksiklikler dikkate alınarak planlanan bu tez kapsamında, agregaların homojen doyurulması amacı ile “Vakumla Suyu Doyurma Yöntemi” geliştirilmiştir. Agregaların olduğu gibi kullanıldığı, normal koşullarda suya doyurulduğu ve bu çalışmada geliştirilen teknik ile vakumlanarak suya doyurulduğu üç farklı yöntem ile çimento dozajı 350 ve 500 kg/m^3 olan, hava sürükleyici katkı maddesi katılan ve katılmayan toplam 12 farklı seride beton üretilmiştir. Taze betonda slump, VeBe süresi, yoğunluk; sertleşmiş betonda yoğunluk, ses geçiş hızı, su emme, ısı iletim katsayısı, su buharı difüzyon direnç faktörü, kuruma rötresi, basınç dayanımı, yarma dayanımı ve elastisite modülü belirlenmiş, betonun boşluk yapısı optik mikroskop ve cıva porozimetresi ile incelenmiş, mekanik ve fiziksel özellikler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Bu çalışmada üretilen hafif beton ile normal beton arasındaki farklılıklar statik açıdan, ısı yalıtımı açısından ve değer analizi ile irdelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre; hafif agregalı betonlarda, boşluk parametreleri ile fiziksel ve mekanik özelliklerin ilişkili olduğu, hafif beton üretiminde ponza agregalarının bu çalışmada geliştirilen vakum yöntemi ile suya doyurularak kullanılmasının üretim süresini kısalttığı, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine olumlu etki yaptığı görülmüştür. Vakumla Suyu Doyurma Yönteminin hafif agregalı beton üretim teknolojisinde etkin biçimde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: hafif beton, ponza, boşluk yapısı, su buharı difüzyon direnç faktörü, vakumla suya doyurma, ısı iletim katsayısı.

ABSTRACT

One of the basic materials used in constructions is normal weight concrete and has a density of about 2400 kg/m^3 . Heavyweight concrete is defined as a concrete with a minimum density of 2600 kg/m^3 . Lightweight concrete is usually defined as a concrete with an oven dry density of no greater than 2000 kg/m^3 . Lightweight concretes are classified into three groups based upon the materials and production technique; lightweight aggregate concrete, no-fines concrete and gas concrete. Based upon their use and physical properties lightweight concretes are divided into three groups; structural, structural/insulating and insulating.

Low density natural and/or artificial aggregates are used in lightweight aggregate concrete production. Natural lightweight aggregates are mined from volcanic deposits that include pumice and scoria types. Artificial lightweight aggregates are produced from raw materials including shales, clays, slates, fly ashes, perlite, blast furnace slags, etc. Besides these, wood, plastic wastes, expanded polystyrene (EPS) beads, crushed lightweight bricks, etc. can also be used as lightweight aggregates.

Many authors have investigated mechanical and physical properties of pumice lightweight concrete and stated the difficulty in concrete production because of the porous structure and high water absorption characteristics of the aggregates. This difficulty is usually overcome by pre-wetting or saturating the aggregates or increasing the mixing water. These methods are not fully successful in achieving a homogeneously saturated aggregate phase. It was also noticed that water vapour transmission properties of pumice concrete was not broadly investigated and a broad experimental study was missing in determining the relation between pore structure parameters and mechanical-physical properties of lightweight pumice concrete.

Experimental study was planned considering these assessments and “Vacuum Saturation Method” is developed for homogeneous saturation of lightweight aggregates. Three saturation methods are applied on aggregates; 30 minutes pre-wetting, 24 hours saturating, and 10 minutes vacuum saturating. Cement dosage was 350 and 500 kg/m^3 , effective water/cement ratio was constant at 0,55. Air entraining additive was introduced to some mixes and a total of 12 different concrete series were obtained. Slump, VeBe time, and density was determined in fresh concrete; density, pulse velocity, water absorption, thermal conductivity, vapour diffusion resistance factor, drying shrinkage, compressive strength, tensile splitting strength and static elasticity modulus were determined in hardened concrete. Pore structure of concrete was investigated by optical microscope and mercury intrusion porosimetry and the relation between pore structure parameters and mechanical-physical properties of concrete were determined.

According to the test results; it was found that vacuum saturation of aggregates has shortened concrete production time and has improved fresh and hardened concrete properties. It can be concluded that the applied Vacuum Saturation Method can be effectively used in lightweight aggregate concrete production.

Keywords: lightweight concrete, pumice, pore structure, water vapour diffusion resistance factor, vacuum saturation, thermal conductivity.

1. GİRİŞ

Beton, 20.yüzyılın birinci yarısından itibaren yapı üretiminde yaygın olarak kullanılan, yapı teknolojisine sağladığı ekonomi ve yararlar nedeni ile üretimi ayrı bir sektör haline gelen, hakkında birçok standart geliştirilen bir yapı malzemesidir. Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı mineral ve/veya kimyasal katkı maddelerinin birlikte karıştırılması ile elde edilen kompozit bir malzemedir. Normal betonun yoğunluğu, 2400 kg/m^3 civarındadır; yoğunluğu, 2600 kg/m^3 'ten fazla olanlar "ağır beton", etüv kurusu (EK) durumdaki yoğunluğu 2000 kg/m^3 'ün altında olanlar ise "hafif beton" olarak adlandırılmaktadır (TS EN 206-1).

Hafif betonlar; üretim tekniğine ve malzemesine göre; hafif agregalı betonlar, ince tanesiz betonlar ve gaz betonları olarak; işlevine göre de taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olarak gruplandırılırlar. Bunlardan ASTM C 567'ye göre belirlenen yoğunluğu $1120\text{-}1920 \text{ kg/m}^3$ arasında, 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa 'ın üzerinde olanlar taşıyıcı hafif betonlar olarak tanımlanmıştır. Taşıyıcı/yalıtım ve yalıtım hafif betonları için yoğunluk ve basınç dayanımından başka ısı iletim katsayısı da belirleyici bir özelliktir (Lamond ve Pielert, 2006; Clark, 1993).

Hafif beton kullanımı ile yapıların zati ağırlıklarında önemli bir azalma sağlanır, taşıyıcı elemanların kesit boyutları küçülür, betonarme elemanlarda donatı azalır. Isı iletim katsayısı normal betona oranla daha düşük değerlerde olan hafif betonların yangına karşı dayanıklılığı yüksektir. Bu gibi avantajlarının yanında hafif betonların karıştırma, yerleştirme ve sıkıştırma işlemleri daha fazla özen gerektirir. Hafif betonlarda basınç dayanımı agreganın cinsine bağlı olmakla birlikte, genel olarak normal betonla benzer dayanımlar elde etmek için daha fazla çimento kullanmak gerekir (Postacıoğlu, 1987; Taşdemir, 1982).

Hafif agregalı betonların üretiminde, birim ağırlığı düşük doğal ve/veya yapay hafif agregalar kullanılır. Doğal hafif agregalar; tuf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, vb gözenekli volkanik doğal taşlardan veya diatomit gibi tortul taşların kırılarak sınıflandırılmasından elde edilir. Yapay hafif agregalar ise; yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi endüstri atıklarından ve perlit, kuvarsit, vermikülit, obsidyen, arduvaz, kil ve şist gibi doğal taşların ısıl işlem ile genleştirilmesinden elde edilir. Bunlardan başka elyaf, talaş ve testere tozu gibi ahşap atıkları, EPS köpükler, plastik atıklar, hafif tuğla kırıkları ve diğer tarım atığı malzemeler de hafif beton agregası olarak kullanılabilir (Taşdemir, 1982; Postacıoğlu, 1987; Bouguerra, vd., 1998; Megri, vd., 1998; Alduaij, vd., 1999; Babu ve Babu, 2003; Miled, vd., 2004;

Haque, vd., 2004).

Konu ile ilgili kaynak taramasında; hafif agregalı betonun, beton teknolojisinde yeni bir keşif olmadığı, eski çağlardan beri volkanik esaslı doğal agregalar kullanılarak yapılmış çok sayıda yapı örneklerinin bulunduğu görülmüştür. Günümüzde, ponza hafif agregası ile üretilmiş betonun mekanik ve fiziksel özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapıldığı, agregaların hafif ve gözenekli oluşu nedeni ile beton üretimindeki zorluğun, agregalara su emdirilmesi ya da karma suyunun artırılması ile aşılmaya çalışıldığı anlaşılmıştır. Araştırmada ayrıca; hafif betonların birim ağırlığının, mekanik ve ısı özelliklerinin etraflıca araştırıldığı, ancak ısı iletimini ve ısıtılan yapılarda yoğunmayı doğrudan etkileyen su buharı difüzyon direnç faktörünün detaylı olarak araştırılmadığı, hafif betonun boşluk oranı, boyutu ve boşluk dağılımı gibi boşluk parametreleri ile fiziksel ve mekanik özelliklerini ilişkilendiren kapsamlı deneysel çalışmaların eksik olduğu gözlenmiştir.

Hafif agregalı beton üretiminde kullanılan agregalar, boşluklu yapılarından dolayı normal agregalara oranla yaklaşık %5 ile %25 arasında değişen oranlarda daha fazla su emer; bu durumun beton üretiminde dikkate alınması gerekir. Hafif agregaların su emme oranı, agreganın boşluk parametrelerine bağlıdır; örneğin yüzeye yakın, dışa açık ve birbiri ile ilişkili boşluklar, nemli ortamda ilk birkaç saatte su ile dolarken, daha iç kısımda yer alan süresiz boşluklar yıllarca su içerisinde bekletilse bile boş kalır. Hafif beton üretiminde tercih edilen suya doyurma veya karma suyunu artırma yöntemleri ile agregaların tam ve homojen olarak suya doyurulduğunu ve agrega-çimento hamuru arayüzünde adezyon kuvvetindeki sürekliliğin sağlandığını söylemek mümkün değildir. Suya doyurma işleminin özel bir dikkat ve titizlik gerektirmesi, hafif beton üretiminin belki de en önemli zorluğunu oluşturmakta, suya doyurma işlemi, üretimde büyük önem taşımaktadır. Bu işlem, betonun üretiminden, yerleştirilmesine, taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etki etmektedir.

Tez kapsamında hafif agregalı beton üretimindeki zorluklar ve yapılmış çalışmalarda eksiklikler dikkate alınarak yalıtım özelliği de kazandırılmak istenen hafif agregalı betonlarda ısı iletimi ve su buharı difüzyon direnç faktörünün belirlenmesi, boşluk özellikleri ile fiziksel ve mekanik özellikler arasındaki ilişkinin araştırılması amacı ile kapsamlı bir deneysel çalışma planlanmıştır. Deneysel çalışmada, ACI 213R’de de işaret edilen agregaların homojen doyurulması için “Vakumla Suya Doyurma Yöntemi” geliştirilmiş, bu yöntemin etkinliği üretilen betonlarda fiziksel ve mekanik deneyler ile araştırılmıştır.

Tez, hafif betonlardan hafif agregalı beton ile sınırlandırılmış; gerçekleştirilen deneysel

Çalışmada, sadece ponza hafif agregası ve CEMI 42.5R imento kullanılmış, kohezyonun artırılması amacı ile betona herhangi bir mineral katkı maddesi ilave edilmemiştir. İki farklı imento dozajı ve sabit su/imento oranı dikkate alınarak planlanan çalışmada hafif agregalı betonun durabilite özellikleri kapsam dışı bırakılmıştır.

Tez; Giriş, Konu ile ilgili kaynak taraması, Deneysel alışma, Deney sonuçlarının değerlendirilmesi, Deney sonuçlarının irdelenmesi, Sonuç ve öneriler olmak üzere toplam altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünde, hafif beton ile ilgili kısa bilgiler verilmiş, hafif betonun olumlu ve olumsuz özellikleri, yapı üretimine etkileri kısaca açıklanmış, tezin amacı, sınırları ve deneysel çalışma özetlenmiştir. Konu ile ilgili kaynak taraması bölümünde, hafif betonun tarihçesi, fiziksel ve mekanik özellikleri, betonun boşluk yapısı, hafif agregalar ve özellikleri gibi konu ile ilgili temel noktalara değinilmiştir. Deneysel alışma bölümünde ise hafif beton üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri açıklanmış, beton üretimi ile ilgili bilgi verilmiş, yapılan deneyler anlatılmıştır. Deney sonuçlarının değerlendirilmesi bölümünde hafif betonda yapılan fiziksel ve mekanik deney sonuçları tablo ve grafiklerle verilmiş, elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. Deney sonuçlarının irdelenmesi bölümünde ise hafif betonda boşluk parametreleri ile mekanik ve fiziksel özellikler arasındaki ilişkiler verilmiş, hafif betonun statik ve ısı yalıtımı açısından performansı teorik olarak belirlenmiş, hafif beton üretiminde uygulanan üretim teknikleri değer analizi yöntemi ile irdelenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde ise tezden elde edilen sonuçlar belli başlıklar altında açıklanmış, bu çalışmanın devamında yapılması gerekenler önerilmiştir.

2. KONU İLE İLGİLİ KAYNAK TARAMASI

Etüv kurusu durumdaki yoğunluğu 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betonlar “hafif beton” olarak adlandırılır. Hafif agregalı, ince tanesiz ve boşluklu betonlar olmak üzere üç ana grupta toplanan hafif betonlar, birim ağırlığı düşük hafif agrega ve/veya normal agregadan ve çimento hamurundan meydana gelmektedir. Agregada karışımında hafif agrega miktarının artırılması ile daha hafif, bir başka deyişle birim ağırlığı daha düşük olan betonlar elde edilebilmektedir (Postacıoğlu, 1987; TS EN 206-1). Hafif beton kullanımı ile yapıların zati ağırlıklarını, taşıyıcı elemanların kesit alanlarını ve inşaat maliyetini azaltmak mümkün olabilmektedir (Bremner, vd., 1994, Alduaij vd., 1999; Chia ve Zhang, 2002; Chen ve Liu, 2005; Düzgün, vd., 2005). Ayrıca elemanlara kazandırılacak ısı yalıtımı özelliği ile binalarda yakıt tasarrufuna ve hava kirliliğinin azaltılmasına katkı sağlamak mümkündür. Hafif beton üretiminde doğal ve/veya yapay hafif agregalar kullanılır. Doğal hafif agregalar; tüf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, vb gözenekli volkanik doğal taşlardan veya diatomit gibi tortul taşlardan temin edilir. Yapay hafif agregalar ise yüksek fırın cürufu, uçucu kül gibi endüstri atıklarından ve perlit, kuvarsit, vermikülit, obsidyen, arduvaz, kil ve şist gibi doğal taşların ısıtılma işlemi ile genişletilmesinden elde edilir. Bunlardan başka elyaf, talaş ve testere tozu halindeki ahşap atıkları, EPS köpükler, plastik atıklar, hafif tuğla kırıkları ve diğer tarım atığı malzemeler de hafif beton agregası olarak kullanılabilir (Taşdemir, 1982; Postacıoğlu, 1987; Bouguerra, vd., 1998; Megri, vd., 1998; Alduaij, vd., 1999; Babu ve Babu, 2003; Miled, vd., 2004; Haque, vd., 2004). Kullanılan agrega tipine bağlı olarak hafif betonların bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Bazı hafif betonların genel özellikleri (Neville, 2000)

Beton Tipi	Agrega Boyutu	Agrega Birim Ağırlığı (kg/m^3)	Betonun Etüv Kuru Yoğunluğu (kg/m^3)	Basınç Dayanımı (MPa)	Rötre (10^{-6})	Betonun Isı İletim Katsayısı ($\text{Jm/m}^2\text{s}^\circ\text{C}$)
Genleştirilmiş cüruf	İnce	900	1850	21	500	0,69
	İri	650	2100	41	600	0,76
Dönel fırında üretilen genleştirilmiş kil	İnce	700	1200	17	600	0,38
	İri	400	1300	20	700	0,40
Sinterlenmiş Uçucu Kül	İnce	1050	1500	25	300	-
	İri	800	1540	30	350	-
Ponza	-	500 – 800	1200	15	1200	-
Perlit	-	40 – 200	400 - 500	1,2 – 3	2000	-
Vermikülit	-	60 – 200	300 - 700	0,3 – 3	3000	-

2.1 Hafif Betonun ve Hafif Agregaların Tarihçesi

Yapı üretiminde yeni bir keşif olmadığı anlaşılan hafif agregalı beton, eski çağlardan beri bilinmekte ve ponza gibi volkanik esaslı doğal agregalar kullanılarak yapılmış çok sayıda yapı örneklerine rastlanmaktadır. Örneğin, Sümerler, Babil'in inşasında, Yunanlılar ve Romalılar da pek çok inşaatta ponza agregasını yaygın olarak kullanmışlardır. Eski Roma imparatorluğu döneminde inşa edilenlerden ve birçoğu hala ayakta olan bu yapılara Cosa Limanı, Pantheon Kubbesi ve Kolezyum en önemli üç örnektir (ACI 213R, 2003). Isidore ve Anthemius adlı iki mühendis tarafından inşa edilen Aya Sofya, M.S.14 yılında inşa edilen su kemeri, Pont du Gard ve M.S. 70–82 yılları arasında inşa edilen Roma amfityatrosu, Kolezyum, M.S.118–128 yılları arasında inşa edilen Roma tapınağı, Pantheon hafif agrega kullanılan yapılara örnek olarak verilebilir.

Romalı mühendisler, M.Ö. 273 yılında İtalya'nın Batı kıyısında beş adet beton iskele inşa etmişlerdir. Yaklaşık 7 m genişliğinde, 10 m uzunluğunda ve 5 m yüksekliğindeki bu iskeleler, balıkçılığı geliştirmek için bir nevi dalgakıran görevi görmüştür. Hafif beton olarak ta dikkate alınabilecek bu yapılarda, doğal bir hafif agrega olan volkanik tüf kullanılmıştır (Bremner ve Holm, 1995). Uzun yıllar deniz suyu etkisine maruz kalmasına rağmen bu yapılarda az miktarda aşınma oluşmuştur (Bremner, vd., 1994; Bremner ve Holm, 1995). Roma döneminin belki de en önemli eseri olan ve hala fonksiyonelliğini koruyan 43,3 m çapındaki hafif beton kubbesi ile Pantheon'dur (Bremner ve Holm, 1995).

Yukarıda işaret edildiği gibi Romalılar, günümüzden yaklaşık 2000 yıl önce ponza agregası kullanarak Pantheon gibi gösterişli yapılar inşa etmişlerdir. Betonarmenin 19. yüzyıl sonlarında gelişmesi ve ülkelerin çoğunda doğal gözenekli agrega yataklarının nadir bulunması veya bulunmaması nedeni ile, yapay agrega üretimi için araştırmalar başlamıştır. Amerika'da 1913 yılında yapılan araştırmalar kil ve şistlerin yakıldığında genleştiğini göstermiştir (Clarke, 1993). Hayde tarafından 1918 yılında hafif beton üretiminde kullanılabilecek genleştirilmiş kil ve şist agregalarını üretecek döner fırın sistemi tasarlanmıştır (Bremner ve Holm, 1999). Bu tip hafif agregalı beton ilk olarak 1919'da USS Selma adlı okyanus tipi geminin inşasında kullanılmış, 7500 ton ağırlığındaki geminin 12–30 mm kalınlığındaki örtü betonu donatı korozyonunu önlemede oldukça etkili olmuştur (Bremner, 1996). Bu gemi üzerinde 1953 ve 1988 yıllarında yapılan incelemelerde betonun hala iyi durumunu koruduğu belirlenmiştir (Bremner ve Holm, 1995). Demir üretimi endüstriyel altyapının temelini oluşturduğu için hafif agregalar ile ilgili çalışmalar 20. yüzyılın başlarından itibaren yüksek fırın cürufu üzerinde yoğunlaşmış ve 1970'li yılların

başında geliştirilen yüksek fırın cüruflarında kayda değer gelişmeler sağlanmıştır. Günümüzde taşıyıcı betonlar için uygun olan yüzeyi daha az pürüzlü cüruf içerikli agregalar üretilmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri'nde Birinci Dünya Savaşı sona ermeden önce üretilmeye başlanan yapay hafif agregası, okyanus tipi geminin inşasından sonra birçok köprü ve çok katlı yapıda kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin 1922 yılında Kansas City'de inşa edilen Westport Lisesi yapay hafif agregası ile inşa edilen ilk hafif beton bina olma özelliğini taşımaktadır. Hafif beton 1928 yılında St. Louis'teki "Park Plaza Otel" ve Kansas City'deki "South Western Bell Telephone Company" inşaatlarında da kullanılmıştır. Chicago nehrinin kıyısında, 1960'lı yılların başında inşa edilen "Marina City" adlı yapının yüksekliği 179 m'ye ulaşmaktadır. Bu yapının döşeme elemanlarında hafif beton tercih edilmiş, agregası olarak geliştirilmiş şist "materialite" hafif agregası kullanılmıştır. Chicago'da 1960'lı yılların ortasında inşa edilen "Raymond Hilliard Centre" binasının kolon, perde ve döşemelerinde "materialite" hafif agregası ve doğal kum ile üretilen hafif beton kullanılmıştır (Clarke, 1993). Houston'da 1971 yılında inşaatı tamamlanan 217,7 m yüksekliğindeki "One Shell Plaza" binası, yapıldığında dünyanın en yüksek betonarme binası idi. Hala dünyanın en yüksek hafif beton ile inşa edilen binası olan bu yapı, 4 Bodrum ve 50 Normal kattan oluşmaktadır. Beton basınç dayanımı 41,4 MPa, elastisite modülü 20700 MPa olarak tasarlanan yapıda hafif agregası olarak geliştirilmiş şist kullanılmıştır (Colaco, 2004).

Hafif beton, Britanya'da ilk olarak 1958 yılında Brentford'da üç katlı bir ofis binasının inşaatında kullanılmış, 1960 ve sonrasındaki yıllarda ise hafif beton ile az sayıda yapı inşa edilmiştir. Bunlardan 1970'li yıllarda Londra'da inşa edilen "Guy's Hospital" binası 122 ve 145 m yüksekliğindeki iki kuleden oluşmaktadır. İri ve ince agregası olarak Lytag hafif agregası kullanılan betonun çimento dozajı 390 kg/m^3 , 28 günlük basınç dayanımı 31,3 MPa'dır (Clarke, 1993).

Hafif betonun Japonya'da kullanımı 1960'lara, Avustralya'da ise 1970'li yıllara dayanmaktadır. Sovyetler Birliği döneminde çok katlı konutların dış duvarlarında taşıyıcılık, ısı yalıtımı ve yangına karşı dayanıklılık gibi özelliklerin hepsini bünyesinde barındırması nedeni ile geliştirilmiş kilden mamul "keramzite" agregası ile üretilen hafif beton kullanılmıştır (Bremner ve Holm, 1995). İskoçya'da, 1966/67 yılında inşa edilen "Roxburgh County Offices" binasının temel ve bodrum katı dışındaki bütün taşıyıcı elemanlarında hafif beton kullanılmıştır. İskoçya'da tamamı hafif beton ile inşa edilen bu ilk yapının beton üretiminde agregası olarak "Lytag" diye adlandırılan sinterlenmiş uçucu kül hafif agregası ve

doğal kum kullanılmıştır (Clarke, 1993).

2.2 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Yoğunluk, ısı iletim katsayısı ve basınç dayanımı aralıkları Çizelge 2.2’de verilen hafif agregalı betonlar, aşağıda açıklandığı gibi taşıyıcı hafif betonlar, taşıyıcı/yalıtım hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere kullanım amacına göre üç gruba ayrılır (Clark, 1993; Lamond ve Pielert, 2006).

2.2.1 Taşıyıcı hafif betonlar

Taşıyıcı hafif beton, yoğunluk ve basınç dayanımına bağlı olarak; ASTM C 567’ye göre belirlenen yoğunluğu $1120\text{--}1920\text{ kg/m}^3$ arasında, 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa’ın üzerinde olan hafif betonlar olarak tanımlanmıştır (ACI 213R, 2003). RILEM’e göre ise taşıyıcı hafif betonlar, yoğunluğu $1600\text{--}2000\text{ kg/m}^3$, basınç dayanımı 15 MPa’ın üzerinde olan betonlardır (Clark, 1993). Taşıyıcı hafif betonlarda genellikle ısıl işlem görmüş şist, kil, arduvaz, genleştirilmiş cüruf ve volkanik kaynaklardan elde edilen agregalar kullanılmaktadır (Lamond ve Pielert, 2006).

2.2.2 Taşıyıcı/yalıtım hafif betonları

Taşıyıcı/yalıtım hafif betonlarının basınç dayanımının ve yoğunluğunun taşıyıcı beton ile yalıtım betonunun arasında olması yeterlidir. Basınç dayanımları 3,4–17,0 MPa arasında değişen bu betonların ısıl özellikleri yalıtım betonu ile taşıyıcı hafif beton arasında değerler alır. Bunlar, yüksek oranda hava boşluğu ihtiva edecek şekilde hafif agregalar ile üretilir ve genelde dolgu betonu kullanılmasını gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilir (Lamond ve Pielert, 2006).

2.2.3 Yalıtım hafif betonu

Yalıtım hafif betonu, taşıyıcı olmayan elemanlarda yüksek ısıl direnç sağlamak amacı ile kullanılan, düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı betonlardır. Bu betonun üretiminde vermikülit ve genleştirilmiş perlit gibi düşük yoğunluklu ve düşük dayanımlı agregalar kullanılır. Yalıtım hafif betonlarının yoğunluğu 800 kg/m^3 ’ün altındadır; basınç dayanımı 0,69 ile 3,4 MPa arasında değişir (Lamond ve Pielert, 2006).

Çizelge 2.2 Hafif betonun sınıflandırılması

Hafif Beton Sınıfı	Basınç Dayanımı (MPa)		Beton yoğunluğu * (kg/m ³)		Isı iletim katsayısı (W/m ² K)	
	A	B	A	B	A	B
Taşıyıcı (ACI 213R)	>17,0	>15,0	1120–1920	1600–2000	-	-
Taşıyıcı/Yalıtım	3,4–17,0	>3,5	800–1440	<1600	0,22–0,43	<0,75
Yalıtım	0,7–3,4	>0,5	240–800	<<1450	0,065–0,22	<0,30

A: Holm ve Ries'e göre, B: RILEM/CEB'e göre

* ACI 213R'de belirtilen dengeli yoğunluk (kg/m³)

Hafif betonlar TS EN 206-1'de de Çizelge 2.3 ve 2.4'te görüldüğü gibi; yoğunluğuna ve basınç dayanımına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Yoğunluğu 800 kg/m³ ile 1000 kg/m³ arasında olanlar D 1.0, yoğunluğu 1000 kg/m³ ile 1200 kg/m³ arasında olanlar D 1.2, yoğunluğu 1200 kg/m³ ile 1400 kg/m³ arasında olanlar D 1.4, yoğunluğu 1400 kg/m³ ile 1600 kg/m³ arasında olanlar D 1.6, yoğunluğu 1600 kg/m³ ile 1800 kg/m³ arasında olanlar D 1.8, yoğunluğu 1800 kg/m³ ile 2000 kg/m³ arasında olanlar D 2.0 olarak adlandırılır. Basınç dayanım sınıfı ise LC8/9 ile LC80/88 arasında değişmekte; en düşük karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck} , N/mm²), 8 ile 80 N/mm² arasında değerler almaktadır (Çizelge 2.5).

Çizelge 2.3 Hafif betonun yoğunluğa göre sınıflandırılması (TS EN 206-1)

Yoğunluk Sınıfı	D 1,0	D 1,2	D 1,4	D 1,6	D 1,8	D 2,0
Yoğunluk Aralığı (kg/m ³)	≥ 800 ve ≤ 1000	>1000 ve ≤ 1200	>1200 ve ≤ 1400	>1400 ve ≤ 1600	>1600 ve ≤ 1800	>1800 ve ≤ 2000

Hafif betonları kullanım amaçlarına göre birim ağırlık ve basınç dayanımı temelinde, düşük dayanımlı - düşük birim ağırlıklı; yalıtım hafif betonları, orta dayanımlı; hem taşıyıcı hem yalıtım hafif betonları, yüksek dayanımlı; taşıyıcı hafif betonlar olmak üzere üç grupta sınıflandırmak da mümkündür (Neville, 2000).

Hafif betonlar, sahip oldukları üstünlüklerden dolayı son yıllarda oldukça yaygın kullanılmaya başlanmış ve bu alanda önemli bir endüstri gelişmiştir. Hafif betonlar, hafif agrega kullanılarak, ince agrega kullanılmadan yalnız iri agrega ile, köpük oluşturularak ve gaz betonu olarak farklı yöntemlerle üretilmektedir (Postacıoğlu,1987).

Çizelge 2.4 Hafif beton için basınç dayanımı sınıfları (TS EN 206-1)

Basınç Dayanımı Sınıfı	En Düşük Karakteristik Silindir Dayanımı $f_{ck,sil}$ (N/mm ²)	En Düşük Karakteristik Küp Dayanımı $f_{ck,küp}$ (N/mm ²)
LC8/9	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28
LC30/33	30	33
LC35/38	35	38
LC40/44	40	44
LC45/50	45	50
LC50/55	50	55
LC55/60	55	60
LC60/66	60	66
LC70/77	70	77
LC80/88	80	88

Normal betonda olduğu gibi hafif betonlarda da basınç dayanımını etkileyen en önemli faktör, su/çimento oranı ve çimento dozajıdır dolayısı ile taşıyıcı hafif betonun karışım hesabını basınç dayanımı, işlenebilirlik ve birim ağırlık olmak üzere başlıca üç faktör etkiler (TS 2511). Bunlardan basınç dayanımı, su/çimento oranına bağlıdır, işlenebilirlik, agrega türüne bağlı olarak su içeriğine göre değişir, birim ağırlık ise agrega cinsine ve çimento içeriğine bağlıdır.

2.3 Hafif Beton Özellikleri

Hafif beton özellikleri de normal betonlarda olduğu gibi taze ve sertleşmiş beton özellikleri olarak incelenir.

2.3.1 Taze beton özellikleri

Normal betonda olduğu gibi hafif betonun da taze halde iken kütlesi homojen olmalı, kalıba kolay yerleştirilmeli, taşıma ve yerleştirme sırasında ayrılmamalıdır. Kütlesi homojen olan hafif betonun kıvamı, işlenebilirliği sağlayacak en düşük değerde olmalıdır. Hafif agregalı betonun aynı işlenebilirlikteki normal betona göre daha düşük çökme değeri vereceği dikkate alınarak çökme değerinin 10 cm'yi geçmemesi önerilmektedir (TS 2511). Hafif betonda, hafif agrega/çimento oranı arttıkça taze betonda çökme azalmakta, aynı işlenebilirlikteki normal beton ile hafif betonun çökme değerleri farklı olmaktadır (Gündüz, 2007). Bu nedenler ile

hafif betonlarda karışım hesabı yapılırken agreganın su emme oranı, birim ağırlığı, elde edilebilme koşulları ve agrega/çimento oranı dikkate alınmalıdır.

Agregaların su emme oranı taze beton özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Doğal ya da yapay olsun bütün agregalar zamana bağlı olarak belirli miktarda su emerler. Bu olay kuru ya da kısmen doygun agregalarda oldukça önemlidir çünkü taze betonun işlenebilirliğini, pompalanabilirliğini, yoğunluğunu, ısı özelliklerini, yangına ve donma-çözülme etkisine karşı dayanıklılığını doğrudan veya dolaylı olarak etkilemektedir. Bir agrega tanesinin su emme oranı ve su emme hızı, boşluk hacmine, boşluk dağılımına ve boşlukların yapısına, bir başka deyişle boşlukların sürekli ya da süreksiz oluşuna bağlıdır. Hafif agregalarda boşluk hacmi normal agregalara oranla daha fazla olduğundan su emme oranı ve hızı da daha fazla olacaktır. Agregaların su emme oranları genellikle etüv kurusu ağırlığa bağlı olarak 30. dakikada ve 24. saatteki su emmesine göre belirlenir. Hafif agregaların su emme oranı 30. dakikada %3-12 arasında iken 24. saatte %5-15 arasında oldukça yakın değerler almaktadır. Bu nedenle beton üretiminde hafif agregalar tarafından emilecek su miktarının yaklaşık olarak hesaplanmasında 30 dakikalık su emme oranı dikkate alınmaktadır (Clarke, 1993). Birim ağırlığı düşük, boşluklu yapısından dolayı kolayca su emebilen hafif agregalar, karışım ve yerleştirme sırasında kolayca yüzeye çıkarak işlenebilirliği olumsuz yönde etkileyebilirler. Bu gibi durumlarda, hafif betona ilave edilecek lifler betonda bir ağ yapısı oluşturarak segregasyonu etkin bir şekilde engelleyebilir (Chen ve Liu, 2005).

Hafif betonda, belirli bir beton sınıfı için hazırlanacak karışımların çimento içeriği, normal betona oranla genelde daha fazladır ve ulaşılabilecek en büyük dayanım kullanılacak agreganın cinsine bağlıdır. Hafif betonun kalıba yerleştirme ve kür işlemleri normal betondan farklı değildir ve agrega tanelerinde tutulan rezerv sudan dolayı hafif betonlar normal betona oranla olumsuz kür şartlarına karşı daha dayanıklıdır (Clarke, 1993; Neville, 2000).

2.3.2 Sertleşmiş beton özellikleri

Hafif betonların etüv kurusu birim ağırlığı (yoğunluğu), basınç dayanımı, rötresi ve ısı iletim katsayısı gibi temel özellikleri, beton üretiminde kullanılan agregaların cinsine, agrega tane boyutuna ve birim ağırlığına göre geniş bir alanda değişim göstermektedir. Sertleşmiş hafif betonların fiziksel ve mekanik özellikleri ve bunlara etki eden faktörler aşağıda özetlenmiştir.

2.3.2.1 Yoğunluğu

Hafif agregalı betonlarda, sertleşmiş betonun yoğunluğu, karışımdaki malzeme oranının, hava miktarının, su ihtiyacının ve hafif agreganın özgül ağırlığı ile nem içeriğinin fonksiyonu olan taze beton yoğunluğundan daha düşüktür. Bunun nedeni nem kaybıdır; nem kaybı, ortam şartlarının ve beton elemanın yüzey alanı/hacim oranının bir fonksiyonudur. Hafif beton karışımlarında ince hafif agreganın yerine normal kum kullanılması sertleşmiş beton yoğunluğunu arttıracaktır. Basınç dayanımı 35 MPa'nın üzerinde hafif beton elde etmek için genelde çimento miktarının artırılması gerekir, bu durumda da yoğunluk artacaktır (Lamond ve Pielert, 2006). Clarke'a (1993) göre;

- Çimento dozajındaki 100 kg/m³'lük bir artış, yoğunluğu yaklaşık 50 kg/m³ artırır.
- Karışımdaki hafif agregaların normal agregalar ile değiştirilmesi, yoğunluğu yaklaşık 150-200 kg/m³ artırır.
- Suyu doygun ya da kısmen doygun hafif agregalar ile üretilen betonların yoğunluğu daha fazladır, agreganın nem içeriğinin artması yoğunluğu artırır.
- Sürüklenmiş hava sonucu karışım oranlarında meydana gelen değişim, yoğunluğu yaklaşık 90 kg/m³ azaltır.

Ponza agregası ile üretilen hafif betonlarda yapılan çalışmalarda, etüv kurusu beton yoğunluğunun karışımdaki malzeme içeriklerine bağlı olarak düşürülebildiği, örneğin, Şahin, vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada ponza agregası kullanımı ile beton yoğunluğunun 1200 kg/m³'e indiği, Gündüz (2007) tarafından yapılan çalışmada ise 796 kg/m³ yoğunlukta ponza betonu üretilebildiği görülmektedir.

2.3.2.2 Basınç dayanımı

Bir çok hafif agreganın basınç dayanımı 35 MPa ve üzerinde hafif beton üretilmekte, sınırlı sayıda hafif agreganın de silindirik dayanımı 48-69 MPa olan hafif betonlar üretilebilmektedir. Basınç dayanımı 21-35 MPa olan hafif betonların dökümü yaygın iken, daha yüksek dayanıma sahip hafif betonlar prekast köprü elemanlarında ve offshore uygulamalarında kullanılmaktadır. Hafif agregalı betonda basınç dayanımı esas olarak kullanılan agreganın cinsine ve yapısına bağlıdır; bağlayıcı malzeme ilavesi dayanımda önemli ölçüde artış sağlamaz (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif agreganın rijitliği ile çimento hamuru rijitliğinin birbirine yakın oluşu nedeni ile gerilme dağılımı üniform olmakta, bu da

hafif betonun basınç dayanımının beklenenden daha yüksek çıkmasını sağlamaktadır (Bremner, 1998). Hafif betonda da basınç dayanımını normal betonda olduğu gibi agrega tanelerinin dayanımı, rijitliği ve nem içeriği, çimento miktarı, mineral katkıları ve lifler, betonun yaşı ve kür koşulları gibi faktörler etkiler; bunlar aşağıda açıklanmıştır.

- **Agrega Tanelerinin Dayanımı:** Betonun en büyük dayanımı, kullanılan agreganın cinsine ve dayanımına bağlıdır. Zayıf agrega taneleri, daha kuvvetli bir hamur fazını, dolayısı ile daha fazla çimento kullanılmasını gerektirir (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agrega miktarı arttıkça beton basınç dayanımı azalmaktadır (Hossain, 2004; Düzgün vd., 2005).
- **Agrega Tanelerinin Nem İçeriği:** Hafif betonun basınç dayanımına etki eden en önemli faktörlerden biri hafif agregaların nem içeriğidir. Genelde agregaların suya doyurulması betonun basınç dayanımında artış sağlamaktadır. Lo, vd. (2004), yaptıkları deneysel çalışmada en yüksek basınç dayanımına otuz dakika ön su emdirmesi işlemi uygulanan hafif agregalarla ulaşmışlardır. Lo, vd.'de (1999), Litcon hafif agregalı betonda agregalara ön su emdirmesi süresi uzadıkça hafif betonun basınç dayanımının arttığını ifade etmişlerdir.
- **Çimento Miktarı, Mineral Katkılar ve Lifler:** Beton basınç dayanımı, agrega cinsine bağlı olarak belirli bir işlenebilirlik için çimento miktarı ile artar, dozajdaki %10'luk artış, dayanımı yaklaşık % 5 artırır (Lamond ve Pielert, 2006). Şahin, vd. (2003) tarafından yapılan çalışmada dozajın 200 kg/m^3 'ten 500 kg/m^3 'e çıkarılması ile basınç dayanımının %265 arttığı ifade edilmektedir. Benzer şekilde Gündüz'ün (2007), ponza betonunda yaptığı deneysel çalışmada çimento miktarı arttıkça beton basınç dayanımının da arttığı belirtilmektedir. Kılıç, vd. (2003), yaptıkları çalışmada bazaltik ponza agregası ve silis dumanı kullanımı ile basınç dayanımı 40 MPa olan taşıyıcı hafif beton üretiminin mümkün olduğunu belirtmiş, taşıyıcı hafif betonda mineral katkı kullanımının yapılarda zati yükü daha da azaltacağını ve dayanımı arttıracığını ifade etmişlerdir. Hafif betona lif katılması basınç dayanımını olumlu yönde etkileyen bir başka faktördür. Chen ve Liu (2005), karma lif ilavesi ile hafif betonun basınç dayanımının lif katılmayan hafif betona oranla %20'den fazla arttığını, Düzgün vd. (2005) ponza betonuna çelik lif ilavesinin basınç dayanımını %21,1'e kadar arttırdığını belirtmektedirler.

- **Betonun Yaşı ve Kür Koşulları:** Zamanın hafif betona etkisi normal betondakine benzerdir; ancak normal beton kurduğunda hidrasyon sona ererken hafif betonlarda agregalarca emilen sudan dolayı durum biraz daha farklıdır ve hafif agregalı betonlar zayıf kür şartlarına normal betona oranla daha dayanıklıdır (Clarke, 1993). Gündüz (2007), ponza betonunun basınç dayanımının kür süresi ile paralel olarak arttığını ifade etmektedir. Benzer şekilde Haque, vd. (2004), yaptıkları çalışmada en iyi dayanım gelişiminin suda kür edilen hafif beton numunelerde gözlemlendiğini ifade etmişlerdir. Gündüz ve Uğur (2005), yaptıkları çalışmada ponza betonunun 28 günlük basınç dayanımının 14,6–26,1 MPa arasında olduğunu, kür süresinin ve çimento miktarının artışı ile dayanımın da arttığını ifade etmişlerdir.

2.3.2.3 Çekme dayanımı

Çekme dayanımı; kayma, burulma, aderans dayanımı ve çatlamaya karşı direnç gibi parametreler ile ilişkilidir. Betonun çekme dayanımı, iri agregata oranı ile harç fazının çekme dayanımına ve iki faz arasındaki aderansa bağlıdır ve genellikle basınç dayanımının bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır, ancak bu yaklaşımda agreganın tane dayanımı, yüzey karakteristikleri ve betonun nem içeriği ve dağılımı dikkate alınmamaktadır. Çekme ile ilişkili özelliklerin belirlenmesinde kullanılan yarma deneyi, basit ve pratik bir yöntemdir. Taşıyıcı hafif betonun yarma dayanımı, aynı basınç dayanımına sahip normal betonun yarma dayanımının %75'i ile %100 ü arasında değişir. Hafif ince agregata yerine normal ince agregata kullanılması, hafif betonun çekme dayanımını artırır (Lamond ve Pielert, 2006).

2.3.2.4 Şekil değiştirme

Hafif agregaların rijitliğinin az oluşu ve karışımda daha fazla çimento kullanılması, betonda daha yüksek deformasyonlar oluşmasına neden olur. Hafif agregalardaki gerilme şekil değiştirme ilişkisi normal betonlara göre daha lineer ve gevrekli. Böyle bir davranış, agregata oranları ile çimento matrisi arasındaki aderansın daha iyi oluşuna bağlıdır (Clarke, 1993). Düzgün, vd. (2005) tarafından yapılan çalışmada hafif betona çelik lif ilavesinin betonun şekil değiştirme kapasitesini artırdığı, gerilme-şekil değiştirme eğrisinin artan ve azalan kısımlarındaki eğimin çelik lif ilavesi ile değiştiği vurgulanmıştır. Bu çalışmada çelik lifin esas önemli etkisinin gerilme-şekil değiştirme eğrisinin azalan kısmında olduğu, lif oranı arttıkça bu bölgedeki eğimin azaldığı ifade edilmiştir.

2.3.2.5 Elastisite modülü

Betonun elastisite modülü, betonu oluşturan harç, hafif agreg, normal agreg gibi her bir ögenin elastisite modülünün ve karışımındaki oranlarının bir fonksiyonudur. Normal betonun elastisite modülünün hafif betonun elastisite modülünden yüksek olmasının nedeni normal agregaların genelde hafif agregalardan daha yüksek elastisite modülüne sahip olmasıdır. Beton iri agreg ve harç olmak üzere iki fazlı bir kompozit olarak dikkate alınır ise, kompozitin elastisite modülü, harcın ve iri agreganın rijitliğinin azalması ile düşecektir. Hafif agreg tanelerinin elastisite modülünün normal agregalardan daha düşük olması nedeni ile hafif agregalı betonların elastisite modülü normal betonların elastisite modülünün $1/2 \sim 3/4$ 'ü kadardır. Bundan dolayı hafif beton ile üretilen yapı elemanları belirli bir yük altında daha fazla deformasyon yapar (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993).

Yoğunluğu 1400 ile 2500 kg/m³ arasında değişen betonların elastisite modülü pratik olarak ACI 318'de verilen (2.1) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$E = 0,04\sqrt{D^3 f_c} \quad (2.1)$$

Bu bağıntıda; E (MPa), betonun sekant modülünü, D (kg/m³), betonun yoğunluğunu, f_c (MPa), betonun silindir basınç dayanımını ifade etmektedir. Bu bağıntı genellikle yüksek dayanımlı hafif betonun elastisite modülü için yüksek değerler verir. Bu nedenle bu tip denklemler yalnızca ilk yaklaşım olarak değerlendirilmelidir. Elastisite modülü, $\pm$ %25 gibi yüksek oranda bağlayıcının ve agreganın cinsine, nem içeriğine, vb. faktörlere bağlıdır. (Lamond ve Pielert, 2006).

Gündüz ve Uğur (2005), yaptıkları çalışmada yaklaşık 15–26 MPa basınç dayanımına sahip ponza agregalı betonun elastisite modülünü 8700–11000 MPa olarak belirlemişlerdir. Şahin, vd. (2003), yaptıkları çalışmada hafif betonda çimento dozajının betonun elastisite modülüne etkisini araştırmış, dozajın 200 kg/m³'ten 500 kg/m³'e çıkarılması ile betonun elastisite modülünde %112'lik bir artış olduğunu elastisite modülünün yaklaşık 28 MPa dayanım için 14657 MPa olduğunu belirlemişlerdir.

2.3.2.6 Sünmesi

Sabit gerilme etkisinde kalan bir malzemede zaman içinde meydana gelen yavaş, ancak ilerleyen deformasyona sünme denir. Sünmenin etkisi kuruma rötresi ile birlikte ele

alınmalıdır çünkü sünme ve rötne şekil değiştirmeleri, uzun-sürelili sehimili arttıracadından, öngerme kuvvetinde kayba yol açacağından ve gerilme yığılmasını arttıracadından bu tip zamanla ilişkili parametrelerin doğru bir şekilde hesaplanıp tasarımıda dikkate alınması önemlidir (Erdoğan, 2003; Lamond ve Pielert, 2006). Sünme ve kuruma rötresi birbiri ile yakından ilişkili kavramlardır ve agreganın cinsi, granülo metrissi ve nem içeriği, çimento tipi, karışımın su içeriği, sürüklenmiş hava miktarı, yüklenme yaşı, uygulanan gerilme değeri, numune veya yapı elemanın boyutları, kür yöntemi ve ortamın bağıl nemi gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Hafif agregalı betonlarda, elastisite modülünün daha düşük olması nedeni ile sünme şekil değiştirmesi normal betona göre daha yüksektir. Hafif agregalı betonun sünmesi, normal betonunkinin yaklaşık 1,0–1,15 katıdır; kuruma rötresi de normal betonunkinden daha yüksektir (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993).

2.3.2.7 Rötresi

Beton içindeki suyun fiziksel ve/veya kimyasal nedenlerle azalması sonucunda betonun boyunda ve hacminde meydana gelen küçülmeye rötne denir. Rötne, hem taze, hem de sertleşmiş betonda meydana gelir. Betonun kuruması, karbonatlaşması ve çimentonun hidratasyonu, sertleşmiş betonda bulunan suyun azalmasına yol açan başlıca etkenlerdir. Bu etkenler nedeni ile sertleşmiş beton rötresi, hidratasyon rötresi, karbonatlaşma rötresi ve kuruma rötresi olarak adlandırılır (Erdoğan, 2003). Harç ve özellikle betonlarda agreganın bulunması rötreyi engeller. Betonun rötresini, çimentonun rötresine bağlayan Pickett formülünde (2.2) agrega miktarının önemi vurgulanmaktadır.

$$\varepsilon_{rb} = \varepsilon_{rc} \times (1 - a)^n \quad (2.2)$$

Bağıntıda, ε_{rb} , betonun rötresini, ε_{rc} , çimento hamurunun rötresini, a , 1m³ betondaki toplam agrega mutlak hacmini, n ise 1,2~1,7 arasında değeri alan bir katsayıyı ifade etmektedir (Akman, 2000). Agrega gibi betona lif katılması da rötreyi azaltan bir faktördür. Chen ve Liu (2005) tarafından yapılan bir çalışmada; lif katılmayan yüksek dayanımlı betonların 100. gündeki rötresinin 1000 mikro deformasyon değeriine ulaştığı, lif ilavesinin erken yaşlarda rötne üzerinde etkili olmadığı, 60. günden sonra ise rötrenin neredeyse tamamen engellendiği, lif kullanımı ile rötrenin %24–30 arasında azaldığı ifade edilmiştir.

Kuruma rötresi, sertleşmiş beton rötresi veya hidrolik rötne olarak da adlandırılır ve üretimi izleyen günden başlayarak 5–6 ay kadar devam eder. Sertleşmiş çimento hamurundaki katı taneciklerin adsorpladığı su molekülleri, bu tanecikleri bir arada tutan elektrostatik kuvvetleri

oluştururlar. Adsorbe su tabakası inceldikçe taneleri birbirine doğru çeken kuvvetler artmakta, su tabakası kalınlaştıkça ters olay meydana gelmektedir. Çimento hamurunun kuruması sonucu, önce kılcal boşluklardaki su buharlaşmakta, bu boşluklara jel suyu akımı başlamakta ve daha sonra bu su da kısmen buharlaşmaktadır. Sonuçta adsorbe su tabakası incelmekte, taneler birbirine yaklaşmakta; hacim büzülmesi meydana gelmektedir (Akman, 2000).

Normal betonda olduğu gibi, taşıyıcı hafif betonun rötresi de esas olarak, çimento hamurunun rötresine, agregaların rijitliğine, çimento hamurunun ve agreganın mutlak hacim oranlarına ve ortam şartlarına bağlıdır. Hafif betonun rötresi, hafif agrega rijitliğinin normal agreganinkinden düşük olması nedeni ile normal betonun rötresinden yüksektir (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif agregalı betonların rötresi, normal betonlarınkinin 1,0~1,5 katı kadardır, ancak karışıma hafif ince agrega yerine normal ince agrega katılması durumunda normal betonlarınkine benzer sonuçlar elde edilir (ACI 213R, 2003; Clarke, 1993). Genelde, kuruma rötresi aynı tip agrega kullanılan betonlarda çimento miktarının artması ile artmaktadır (Alduaij, vd, 1999). Hafif betonlarda dayanımı arttırmak için normal betondan daha çok çimento kullanılması, hafif agregaların elastisite modülünün ve basınç dayanımının az olması nedeni ile hafif betonların rötresi normal betonların rötresinden daha fazladır. Gündüz (2007) tarafından düşük dayanımlı ponza betonunda yapılan çalışmada kuruma rötresinin ponza agregası/çimento oranı arttıkça azaldığı, beton numunelerde yapılan ölçümlerde rötrenin %0,08'in altında olduğu, Gündüz ve Uğur (2005) tarafından diğer bir çalışmada da ponza betonunda rötrenin %0,027–0,037 arasında değiştiği belirlenmiştir. Alduaij, vd. (1999) tarafından yapılan bir çalışmada da farklı tip hafif agrega kullanılarak üretilen betonların 28. gündeki kuruma rötresinin $71-212 \times 10^{-6}$ arasında değiştiği belirtilmiştir.

Kayalı, vd.(1999), normal beton ile hafif betonun uzun dönemdeki kuruma rötresini incelemişler, 400 günlük süreçte yüksek dayanımlı normal betonun kuruma rötresinin hafif betonun yarısı kadar olduğunu ve 500×10^{-6} değerinde sabitlendiğini belirtmişlerdir. Aynı çalışmada, sinterlenmiş uçucu kül agregalı hafif betonun ise ilk 100 gün artan hızda rötreyi yaptığı, bu artış oranının zamanla azalmadığını ifade etmişlerdir. Bu çalışmada ayrıca Nilsen ve Aitcin'in çalışmasına atıf yapılarak genleştirilmiş şist agregalı hafif betonların normal betonlara oranla %30-%50 daha az kuruma rötresi yaptığı, 28 gün kürlemeden sonra 56 gün kuruyan hafif betonun rötresinin $34-230 \times 10^{-6}$ arasında olduğu belirtilmiştir.

2.3.2.8 Yorulması

Maksimum statik gerilme değerinin altındaki gerilme değerlerinin tekrarlı uygulanmaları

sonucunda malzemede meydana gelen kırılma olayına yorulma denir (Erdoğan, 2003). Clarke (1993) tarafından yapılan çalışmada yoğunluğu 1500 kg/m^3 'ün üzerinde olan hafif betonun tekrarlı basınç yükleri altında normal betonla aynı davranışı gösterdiği gözlenmiştir. Ramakrishnan vd. (1992), yaptıkları deneysel çalışmada 30-50 MPa basınç dayanımına sahip hafif betonların yorulma mukavemetinin 2,2–3,0 MPa arasında değiştiğini ifade etmişlerdir.

2.3.2.9 Su emmesi

Yukarıda da işaret edildiği gibi çoğu hafif agreganın su emme oranı normal agregalarınkinden daha yüksektir. Bu nedenle hafif agregalı betonların su emme oranının normal betonlara oranla daha yüksek olduğu düşünülür. Ancak, hafif betonda agrega taneleri yüksek kalitede bir matris ile çevrili olduğundan, fark düşünüldüğü kadar yüksek değildir (Clarke, 1993).

Normal betonlarda su emme beton yaşı ile azalmaktadır, ancak Lo vd. (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada hava sürükleyici katılan düşük dayanımlı hafif beton numunelerinde su emmenin beton yaşının artışı ile arttığını tespit etmişlerdir. Elsharief, vd. (2005), kuru halde ve 24 saat suya doyurulan hafif agregalar ile üretilen harç numunelerde yaptıkları kılcal su emme deneyinde, suya doymuş agrega kullanılan harçların su emme oranlarının diğerlerinden yüksek olduğunu belirlemişler, bunun suya doymuş agregalı harçtaki arayüzey mikro yapısının daha boşluklu olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Şahin vd. (2003), betonda ponza agrega oranının %100 olması durumunda su emme oranının % 16,7 olduğunu gözlemlemişlerdir. Gündüz (2007), ponza betonunun ağırlıkça su emme oranının yaklaşık %12 ile %26 arasında değiştiğini, su emmenin, ponza agregası/çimento oranı arttıkça ve beton dayanımı azaldıkça arttığını belirlemiştir. Chia ve Zhang (2002), 0,55 su/çimento oranına ve 400 kg/m^3 dozaja sahip hafif betonun su geçirimsizliğinin normal betonunkinden daha az olduğunu, normal betonda su/çimento oranının 0,35 olması durumunda ise su geçirimsizliğinin hafif betona oranla çok daha düşük değerler aldığını, hafif ve normal betona silis dumanı ilavesinin su geçirimsizliğini azalttığını ifade etmişlerdir.

Betonun su geçirimsizliği, porozitenin, boşluk çapının, dağılımının ve sürekliliğinin bir fonksiyonudur. Bagel ve Zivica (1997), cıva porozimetresi deneyi ile belirlenen boşluk çapının, boşluk ile permeabilite arasındaki ilişkiyi belirlemek için en uygun boşluk parametresi olduğunu ifade etmişlerdir.

2.3.2.10 Karbonatlaşması

Hafif betonda agrega tanelerinin iyi kalitede bir matris içinde homojen dağılması durumunda

karbonatlaşma oranı normal betonunkinden çok farklı olmayacaktır. Ancak, korozyon dikkate alındığında hafif beton ile yapılan yapılarda örtü betonu kalınlığının normal betonlara oranla daha fazla tutulması gerekmektedir. Bununla birlikte kaliteli hafif betonlarda karbonatlaşmadan dolayı, donatıda korozyon etkisi nadiren gözlenmiştir (Clarke, 1993).

Karbonatlaşma etkisinin incelenmesi amacı ile II. Dünya savaşı sırasında hafif beton kullanılarak inşa edilen birçok betonarme gemiden karot numune alınarak ölçümler yapılmış, 40 yıl boyunca deniz suyuna maruz kalmasına rağmen bu gemilerde kullanılan betonun hala mükemmel durumda olduğu, alınan karot numunelerdeki donatılarda korozyon oluşmadığı, donatı-beton arayüzünde karbonatlaşmaya rastlanmadığı, karbonatlaşma derinliğinin yalnızca 1-2 mm arasında olduğu belirlenmiştir. 35 yıllık Chesapeake Bay köprüsünün hafif beton elemanlarından alınan karot numunelerde ise karbonatlaşma derinliğinin 2-13 mm arasında olduğu belirlenmiş, New York'taki Cocksackie köprüsünden alınan 15 yıllık hafif beton numunelerde karbonatlaşma derinliğinin 5-10 mm arasında olduğu gözlenmiş, donatıda korozyona rastlanmamıştır (Chandra ve Berntsson, 2003).

2.3.2.11 Isıl özellikleri

Isı bir enerji çeşidi olup, yüksek sıcaklıktaki bir ortamdan daha düşük sıcaklıktaki ortama kendiliğinden geçer. Ancak ısıнын düşük sıcaklıktaki bir ortamdan alınarak daha yüksek sıcaklıktaki bir ortama verilmesi, sisteme dışardan bir enerjinin verilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bilindiği üzere bu husus, Termodinamiğin II. Kanununun Clasius tarafından verilen ikinci ifadesinde belirtilmiştir. Isının farklı sıcaklıktaki iki ortamda birinden diğerine geçmesi halinde, bu iki ortamın arasında kalan ortamları da geçmesi söz konusudur. Geçen ısıнын büyüklüğü, ortamlar arasındaki sıcaklık farkına, yüzeye, zamana ve ortamların fiziksel özelliklerine bağlıdır (Dağsöz, 1995).

Bu çalışmada hafif agregalı betonun ısıl özellikleri deneysel olarak araştırıldığı ve boşluk yapısı ile ilişki kurulduğu için ısıl özellikler aşağıda etraflıca ele alınmaya çalışılmıştır. Isının geçtiği ortamlar katılar, gaz veya sıvı akışkanlar olabilir. Isı geçişi, ısı iletimi (kondüksiyon), ısı taşınımı (konveksiyon) ve ısı ışıınımı (radyasyon) olmak üzere üç şekilde gerçekleşir. Isı enerjisinin katı cisimlerde bir molekülden diğerine aktarılması ile meydana gelen ısı geçiş şekline ısı iletimi veya kondüksiyon, gaz veya sıvı akışkanlarda moleküllerin makroskobik hareketleri sonucu olan ısı geçiş şekline de ısı taşınımı veya konveksiyon denir. Katıların, sıvı veya gaz halindeki akışkanların, elektromanyetik dalgalar şeklinde yayınladıkları veya yuttukları ısı geçiş şekline ise ısı ışıınımı veya radyasyon adı verilir. Isının iletim yolu ile

geçtiği ortamdaki sıcaklıkların zamanla değişmesi hali “Değişken Rejim”, zamanla sabit kalması hali ise “Sabit Rejim” olarak adlandırılır (Toydemir vd., 2000; Dağsöz, 1995).

Isıl enerji alan malzemelerin iç enerjisi artar ve sıcaklığı yükselir. Bu enerjinin bir kısmı atomsal titreşimlerle kinetik enerjiye, bir kısmı da genleşme yolu ile potansiyel enerjiye dönüşür. Özgül ısı, ısı iletkenlik ve ısı genleşme birer ısı özellik olup malzeme türüne, içyapıya ve çevre koşullarına bağlıdır. Bunlardan ısı iletimi, özellikle metallerde büyük ölçüde elektron hareketleri ile gazlarda ise sürekli hareket halindeki atomlar ve moleküllerin kütsel hareketi ile sağlanır. Atomlararası bağ kuvvetleri elastik yay gibi davranarak titreşimleri atomdan atoma termoelastik dalgalar halinde iletirler. Bu termoelastik dalgaların frekansları ve hızları malzemenin atomsal yapısına, atomlararası bağ kuvvetine, elastik rijitliğine ve yoğunluğuna bağlıdır. Belirli bir enerji paketine sahip olan termoelastik dalgaların hareketi, elektronlarda olduğu gibi, fonon denen parçacıkların hareketine benzetilir. Her fonon belirli bir enerji içerir ve bu enerji fononun titreşim frekansı ile orantılıdır. Bir kütlenin ısı enerjisi yaklaşık olarak mevcut fononların enerjilerinin toplamı kadardır (Onaran, 2000). Isı iletiminin ana ifadesi Jean B. Joseph Fourier tarafından (2.3) bağıntısı ile verilmiştir.

$$\Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.3)$$

Bu ifadeye göre birim alandan birim zamanda geçen ısı miktarı, Φ , ısının aktığı yüzeyin normali doğrultusundaki sıcaklık gradyeni, $\partial T / \partial n$, ile orantılıdır ve λ orantı katsayısı ısı iletim katsayısı olarak adlandırılır. dA kesitinden dt zaman zarfında geçen ısı miktarı düşünülürse 2.3 ifadesi, aşağıda verildiği (2.4) şekilde yazılabilir (Dağsöz, 1995).

$$\overline{dQ} = -\lambda dA \frac{\partial T}{\partial n} dt \quad (2.4)$$

Isıl enerji alan atomlar titreşirler ve daha büyük çaplı atomlar gibi davranırlar, dolayısı ile atomlararası uzaklık artar ve boyutlar büyür. Katılarda ise atomlararası kuvvetli bağlar nedeni ile atom ve moleküllerin hareketleri kısıtlıdır, ısı enerji etkisi ile ancak denge konumu etrafında titreşim hareketi yapabilirler, titreşim yaparken bağ boyları arttığından ısı genleşme oluşur. Isıl genleşme, atomlararası potansiyel enerji çukurunun asimetrik oluşundan kaynaklanır. Potansiyel enerji çukurunun derinliği arttıkça eğrinin asimetrikliği azalır, ısı genleşme küçülür, ergime sıcaklığı artar. Bir malzemedeki sıcaklık dT kadar arttığı zaman boyu dl kadar uzar ise birim boydaki artış, sıcaklıktaki artışla orantılıdır (2.5).

$$\frac{dl}{l} = \alpha dT \quad (2.5)$$

Buradaki orantı katsayısı α ısı genleşme katsayısıdır ve 1 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık artışına karşın birim boydaki artış anlamına gelir. Isıl genleşme katsayısı malzemelerin türüne, içyapısına ve sıcaklığa bağlıdır (Onaran, 2000).

Hafif agregalı betonların ısı genleşme katsayıları normal betondan daha düşüktür. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek çekme şekil değiştirme kapasitesinin kombinasyonu sonucu hafif betonların ısı gerilmelerden dolayı hasar görme riski normal betona göre daha düşüktür. Çünkü gözenekli yapılarından dolayı hafif agregaların boşluklarındaki hava, ısı transfer hızını azaltmaktadır. Hafif agregaların çimento matrisi içinde yer almaları da ısı yalıtım özelliğini artırır. Bunun sonucu olarak hafif betonlar birçok yapıda ısı yalıtımı sağlamak amacı ile kullanım alanı bulmaktadır. Hafif agregalı betonların ısı iletim katsayısı betonun yoğunluğuna, agregası cinsine ve nem içeriğine bağlıdır (Clarke, 1993). Çeşitli kaynaklarda hafif betonun ısı direncinin normal betonun yaklaşık 6 katı olduğu ifade edilmektedir (Bremner, 1998; Gündüz, 2007; Hossain, 2004).

Gündüz ve Uğur (2005), yaptıkları deneysel çalışmada ponza betonunun ısı iletim katsayısını beton yoğunluğuna bağlı olarak 0,345–0,455 W/m $^{\circ}\text{K}$ olarak belirlemişlerdir. Gündüz (2008) tarafından yapılan başka bir çalışmada düşük dayanımlı ponza betonlarında ısı iletim katsayısının ponza agregası/çimento oranına bağlı olarak 0,200–0,352 W/m $^{\circ}\text{K}$ arasında değiştiği, bu oran arttıkça ısı iletim katsayısının azaldığı, çimento miktarı arttıkça ısı iletim katsayısının da arttığı ifade edilmiştir.

Hossain (2004), yaptığı çalışmada volkanik ponza agregası kullanılarak üretilen hafif betonların ısı iletim katsayısının 0,163–0,231 W/m $^{\circ}\text{K}$ arasında olduğunu belirlemiş, beton karışımındaki ponza agregasının miktarı arttıkça betonun ısı iletim katsayısının azaldığını ifade etmiştir. Demirboğa ve Gül (2003), yaptıkları çalışmada %100 ponza agregalı betonun ısı iletim katsayısının 0,3 W/mK civarında olduğunu, betona ponza agregası yerine genleştirilmiş perlit ilavesinin ısı iletim katsayısını azalttığını, silis dumanı ve uçucu külün de ısı iletim katsayısını azalttığını belirlemişlerdir.

2.3.2.12 Buhar difüzyonu

Atomların, iyonların ve diğer parçacıkların sıcaklığa bağlı olarak yer değiştirmeleri difüzyon olarak adlandırılır. Difüzyon, özellikle katı malzeme içinde kütle taşınmasını sağlayacak

ölçekteki hareketleri tanımlar. Derişiklik farkları, parçacıkların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu olay matematiksel olarak (2.6)'da verilen 1. Fick Kanunu ile ifade edilebilir (Bargel vd., 1993).

$$dm_A = -D_f \frac{dc_A}{dx} A dt \quad (2.6)$$

Bağıntıda; dm_A , derişiklik gradyeninin dc_A/dx olması durumunda, dt süresinde ve yayınma yönüne dik A yüzeyinden geçen madde miktarını, D_f ise difüzyon katsayısını ifade etmektedir.

Her yapı malzemesi için karakteristik olan su buharı difüzyon direnç faktörü, TS EN 12086'ya (2002) göre aşağıdaki (2.7) bağıntısı ile hesaplanır:

$$\mu = \frac{\delta_{hava}}{\delta} \quad (2.7)$$

Bağıntıda, δ_{hava} , havanın su buharı özgeçirgenliğini; δ ise malzemenin su buharı özgeçirgenliğini ifade etmektedir. Hem havanın, hem de malzemenin su buharı özgeçirgenlikleri barometrik basınca bağılı olduğu için, bunların birbirine oranı μ , barometrik basınçtan bağımsız sayılabilir (TS EN 12086).

Kearsley ve Wainwright (2001), yaptıkları çalışmada gaz betonun su buharı geçirimliliğinin yoğunlukla ve porozite ile ilişkisini belirlemişler, yoğunluk arttıkça ve porozite azaldıkça su buharı geçirimliliğinin de azaldığını ifade etmişlerdir.

2.3.2.13 Akustik özellikler

Duvar ve döşeme gibi yapı elemanlarında ses yalıtımı ağırlık ile doğrudan ilişkilidir (Short, 1963; Clarke, 1993). Bundan dolayı, aynı yalıtım özelliğini sağlayabilmesi için hafif beton ile üretilen yapı elemanlarının kalınlığının daha fazla olması gerekmektedir. Ancak, kapalı yüzey özelliğine sahip hafif agregalar ile üretilen hafif betonların ağırlıkları düşük olmasına rağmen beklenenden daha iyi ses yalıtımı sağladığı görülmüştür. Örnek olarak, genleştirilmiş kil agregası ile üretilen 200 mm kalınlığındaki bir duvar elemanının ses yalıtımının aynı boyutta normal beton ile üretilen duvar ile aynı yalıtım performansını gösterdiği belirlenmiştir (Clarke, 1993).

2.4 Hafif Betonun Dayanıklılığı

Dayanıklılık, malzemenin çevresel etkilere karşı koyma kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Yapı

malzemelerinde bu etkiler kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak görülebilir. Kimyasal etkiler genellikle zararlı yeraltı suyu, kirlı hava ve reaktif sıvıların etkisi olarak sıralanabilir. Fiziksel etkiler esas olarak donma, rötre ve ısıl gerilmelerden, mekanik hasarlar ise aşınmadan ve darbeden kaynaklanabilir (Short, 1963). Hafif agregalı betonların mekanik özellikleri ve dayanıklılığı beton matrisin boşluk yapısı ile doğrudan ilişkilidir (Lo, vd., 2008). Hafif agreganın rijitliği ile  imento hamurunun rijitliğinin birbirine yakın oluşu, üniform gerilme dağılımına neden olmakta, bu da hafif beton dayanımının beklenenden daha yüksek çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca,  imento hamuru matrisi ile hafif agreganın arasında oldukça iyi bir aderans olması nedeni ile arayüzeydeki dayanım oldukça yüksektir ve bu iki faktör, hafif agregalı betonun durabilitesini arttırmaktadır (Bremner, 1998).

Bir çok köprü yapısının performansı, taşıyıcı hafif betonun durabilitesinin iyi olduğunu göstermiş, hafif betonun daha geniş çapta kullanımını teşvik etmiştir. Yıllarca şiddetli agresif ortam şartlarına maruz kalan yapılardan alınan karot numunelerde yapılan incelemelerde agreganın  imento hamuru arasında herhangi bir aderans kaybı gözlenmemiştir. Hafif betonun bu kadar iyi performans göstermesindeki en önemli etken agreganın  imento hamuru arasındaki aderansın fiziksel ve kimyasal olmasından ve bir çok normal betona oranla daha iyi bir arayüz fazının oluşmasındandır. Agreganın tanelerinin hidrasyon sırasında terleyen suyu emmesi ve ileriki safhalarda betonun k r ne katkıda bulunması bu bölgenin gelişimine katkı sağlamaktadır (Holm, vd., 1984).

2.4.1 Kimyasal etkilere dayanıklılığı

Kimyasal dayanıklılık; gazların, kimyasalların ve sıcaklık değişimlerinin betonun bağlayıcısı olan  imento hamuru bileşenleri ile kimyasal etkileşimi sonucunda betonun zarar görmesine karşı direnç olarak tarif edilebilir. Asit etkisi, Alkali-Agrega reaksiyonu ve klorür iyon penetrasyonu kimyasal etkilere örnek olarak verilebilir (Chandra ve Berntsson, 2003).

Bir çok hafif agreganın yaklaşık 1200  C de ısıl işleme maruz kaldığından kararlıdır ve alkalilerle reaksiyona girmez. Ancak çoğu taşıyıcı hafif beton kısmen de olsa normal agreganın kullanılarak üretildiğinden bunların ayrıca deneye tabi tutulması gerekmektedir. Hafif betonda agregaların su emmiş olmasından dolayı matristeki serbest su/ imento oranı daha düşüktür, ayrıca  imento miktarının daha fazla olması durumunda geçirimsizlik düşecek, dolayısı ile dayanıklılık artacaktır (Clarke, 1993).

2.4.2 Donma-çözölme etkisine dayanıklılığı

Donma çözölme etkisi altındaki betonun hasar mekanizması oldukça karmaşık bir olay olduğundan hasar mekanizmalarını açıklamak için çeşitli teoriler ileri sürölmüştür. Bu teoriler arasında en önemli olanları; kapiler boşluklardaki donma nedeni ile hidrolik basıncın yayılması, donma başladıktan sonra jel suyunun kapiler boşluklara doğru hareketi, sıcaklık etkisi gibi yerel genleşmelerin neden olduğu farklı şekil değıştirmeler ve çözeltilerin kapiler boşluklardaki kısmi donmasından kaynaklanan osmotik basınçtır (Şahin vd., 2003). Donma olayını takip eden çözölme ve tekrar donmanın etkisi kümülatif olarak artmaktadır. Suyun donması ile hacminde yaklaşık %9'luk bir artış meydana gelmekte, bu artış ile boşluklarda bulunan fazla su basınç oluşturmaktadır (Neville, 2000).

Hafif agregalı betonların donma-çözölme etkisi altındaki performansı esas olarak agrega cinsine, nem içeriğine, karışım oranlarına ve sürüklenmiş hava miktarına bağlıdır. Laboratuar deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hava sürüklenmemiş hafif agregalı betonların aynı dayanıma sahip hava sürüklenmemiş normal betonlara oranla donma-çözölme etkisine çok daha dayanıklı olduğu görölmüştür. Ön su emdirme işlemi uygulanan hafif agregalarla üretilen hava sürüklenmiş hafif betonun performansının aynı özellikteki normal betonla hemen hemen aynı olduğu, ancak hava kurusu durumundaki hafif agregalar ile üretilen hava sürüklenmiş hafif betonun donma-çözölme etkisine karşı performansının normal betona göre çok daha iyi olduğu görölmüştür (Clarke, 1993).

Gao vd. (2002), yaptıkları çalışmada yüksek performanslı hafif betonlarda mikro çatlakların donda dayanıklılıkta ve durabilitede en önemli faktörler olduğunu, donma-çözölme çevrimine maruz kalan betonda çatlak oluşumunun temel sebeplerden ilkinin suyun donması, genleşmesi ve gerilme oluşturmaları, diğerinin ise tekrarlı donma-çözölme sırasında oluşan ısıl gerilmeler olduğunu belirtmişlerdir. Betona uçucu kül ilavesinin içyapının yoğunluğunu arttıracakını, bu şekilde mikro çatlak oluşumunun ve çatlak ilerleyişinin engelleneceğini ifade etmişlerdir.

Mao ve Ayuta (2008), genelde hafif agregalı betonların donma-çözölme dayanımının normal betonlardan daha kötü olduğunu, hafif agregaların kolayca su emmeleri nedeni ile donma-çözölme neticesinde betonun daha fazla zarar göreceğini belirtmişlerdir. Donma-çözölme dayanımındaki en önemli faktörün hafif agreganın boşluk yapısı olduğunu ifade eden araştırmacılar, yaptıkları deneysel çalışmada az boşluk hacmine ve daha küçük boşluklara sahip hafif agregaların donma-çözölme etkisine daha iyi dayanım gösterdiğini belirlemişlerdir.

2.4.3 Yüksek sıcaklığa dayanıklılığı

Malzemeler, yanıcılık bakımından yanıcı-tutuşabilir olanlar ve yanıcı olmayanlar şeklinde sınıflandırılabilir. Taş, tuğla ve beton gibi inorganik malzemeler yanıcı değildir. Bir binanın yapı elemanına yangının etkisi, ulaşılan sıcaklığa, yangının süresine ve yapı elemanının ısı özelliklerine bağlıdır (Short, 1963).

Clarke (1993) ve Neville'e (2000) göre, taşıyıcı hafif agregalı betonların yangına karşı dayanımı normal betonlara göre daha yüksektir, çünkü;

- Hafif agregalar, yüksek sıcaklık etkisinde stabilitesini korur, bu nedenle betonda dayanım kaybı daha az olur.
- Hafif agregaların ısı genleşmesinin düşük olması betonun hasar görme riskini azaltır.
- Hafif betonlar, normal betona göre daha iyi ısı performans göstermelerinden dolayı daha fazla yalıtım sağlar, yüzeyden itibaren sıcaklık artışı geciktirirler.

Hossain (2006), ponza betonunda yaptığı deneysel çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan ponza betonlarının dayanım ve dayanıklılıklarını koruyabildiklerini, bu betonun yangın riski büyük bölgelerdeki yapılarda kullanılabileceğini ifade etmektedir.

2.4.4 Aşınma direnci

Betonda aşınma direnci, betonun dayanımına, sertliğine, çimento matrisinin ve agregaların tokluk karakteristiklerine ve bu iki fazın aderansına bağlıdır. Taşıyıcı beton üretimine uygun olan çoğu hafif agregamı seramik bir yapıdan oluşur ve Mohs sertlik skalasında kuvarza denktir. Agregaların bu özelliği nedeni ile taşıyıcı hafif beton ile üretilen köprüler 100 milyondan fazla araç geçişine maruz kaldıklarında bile normal betona benzer aşınma performansı göstermişlerdir (Lamond ve Pielert, 2006). Hafif betonda aşınma dayanımını arttırmak için nispeten yumuşak olan iri agregayı sert ince agregayla birleştirmek ve matrisin kalitesini arttırmak gereklidir (Clarke, 1993).

2.4.5 Donatı korozyonuna etkileri

Hafif agregalı betonlarda çimento dozajının yüksek oluşundan dolayı betonun alkalitesi yüksektir ve donatı korozyonunu önleyici bir ortam oluşturur. Bu ortam, hafif betonun iyi yerleştirilmesi koşulu ile donatının korozyon riskini oldukça azaltır. Ancak, 300 kg/m³'ün altındaki düşük çimento dozajlarında erken korozyon meydana gelebilir. Her ne kadar BS

8110 hafif agregalı betonlarda paspayının daha geniş tutulmasını önerse de pratikte birçok durumda böyle bir uygulamanın gerekmediği gözlenmiştir (Clarke, 1993). Hafif beton ile üretilen birçok betonarme gemi ve köprü yapısında yapılan incelemelerde donatı korozyonuna rastlanmamıştır (Chandra ve Berntsson, 2003).

2.5 Hafif Beton Agregaları

Bu çalışmanın konusu olması nedeni ile hafif agregalar aşağıda etraflıca ele alınmıştır. Hafif agregalar, TS EN 1097-6'ya uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu 2000 kg/m³'ten veya TS EN 1097-3'e uygun olarak tayin edilen etüv kurusu yığın (boşluklu) yoğunluğu 1200 kg/m³'ten az olan mineral esaslı malzemelerdir. Hafif agregalar, TS 1114'e göre ise su, çimento ve gerektiğinde katkı maddeleri ile karıştırılarak hafif beton üretiminde kullanılan, gevşek birim ağırlığının en büyük değeri 1200 kg/m³'ü aşmayan, kırılmış veya kırılmamış gözenekli inorganik agregalar olarak tanımlanmaktadır (Çizelge 2.5). TS 1114, doğal hafif agregayı; meydana gelişleri sırasında gözenekli bir yapı kazanmış tuf, bims (ponza), sünger taşı, lav cürufu, diatomit vb. gibi kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlamaktadır. Aynı standartta yapay hafif agregalar ise; yüksek fırın cürufu, kil, uçucu kül, kuvars, perlit, obsidiyen, vermikülit, şist, arduvaz vb. inorganik elemanlardan genellikle ısıtma, bazı hallerde sinterleştirme, gaz veya köpük oluşturma yolu ile gözenekleştirilerek elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregalar olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 2.5 Hafif agregalar gevşek birim ağırlıkları

Standart	Agrega cinsi	Maksimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)	Minimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)
ASTM C 330 ve C331	İnce agregalar	1120	-
	İri agregalar	880	-
	Karışık agregalar	1040	-
ASTM C 332 Grup 1	Perlit	196	120
	Vermikülit	160	88
ASTM C 332 Grup 2	İnce agregalar	1120	-
	İri agregalar	880	-
	Karışık agregalar	1040	-
TS 1114	İnce agregalar	1200	-
	İri agregalar	1000	-
	Karışık agregalar	1100	-

Hafif agregalar, üretiminde kullanıldığı hafif betonların fonksiyonuna göre sınıflandırılır ise; perlit ve vermikülit ile yalıtım hafif betonu, ponza taşı ve volkanik cürufur ile hem taşıyıcı hem yalıtım hafif betonları, genleştirilmiş kil, şist, cüruf ve arduvaz ile taşıyıcı hafif beton

üretilebilmektedir (Neville, 2000).

2.5.1 Hafif agregaların özellikleri

Deneysel çalışmada hafif agrega kullanılarak hem taşıyıcı, hem yalıtım özelliği olan hafif beton üretilmiş olması nedeni ile aşağıda hafif agregaların fiziksel özellikleri genel olarak verilmiş, beton üretiminde kullanılan ponza agregası etraflıca ele alınmıştır.

2.5.1.1 İçyapı özellikleri

Hafif agregaların tane yoğunluğu, gözenekli yapılarından dolayı düşüktür. Tanelerdeki gözenekli yapı, belli başlı ham maddelerin erime sıcaklığına kadar ulaşması ile oluşur. Bu sıcaklıkta gazlar kütle içinde genişleyerek yaklaşık 5–300 μm boyutlu üniform dağılmış boşluk oluşturur, hacim artışına neden olur ve soğuma esnasında da bu durumunu korur (Lamond ve Pielert, 2006).

2.5.1.2 Tane şekli ve yüzey dokusu

Doğal hafif agregalar kaynağına, yapay hafif agregalar üretim yöntemine bağlı olarak tane şekli ve yüzey dokusu açısından önemli farklılıklar gösterir. Tane şekli kübik, küresel, sivri veya düzensiz olabilen hafif agregaların yüzey dokusu ince boşluklu olabilir, nispeten düzgün bir yapı gösterebilir ya da büyük boşluklu ve oldukça düzensiz bir yapıda olabilir. Tane şekli ve yüzey dokusu, beton karışımının işlenebilirliğini, iri/ince agrega oranını, çimento ve su gereksinimini ve bunlara bağlı olarak fiziksel ve mekanik özellikleri de doğrudan etkilemektedir (Lamond ve Pielert, 2006).

2.5.1.3 Birim ağırlık

Agrega birim ağırlığı, agrega yığını kütesinin, kapladığı hacme oranıdır. Bu hacim daneler arasındaki ve danelerin içindeki boşlukları kapsamaktadır. Birim ağırlık, dane şeklinin, boyutunun, inceliğinin ve nem içeriğinin bir fonksiyonudur ve aynı zamanda agregaların gevşek ya da sıkı yerleştirilmiş olmasına bağlıdır. Her malzemenin birim ağırlığı farklıdır, bu farklılık aynı tür malzemenin farklı boyut ve incelikte olması durumunda da geçerlidir. Çizelge 2.5’de ASTM C 330, C331 ve C332’ye göre hafif agregaların maksimum kuru gevşek birim ağırlıkları verilmiştir (Lamond ve Pielert, 2006).

2.5.1.4 Özgöl ağırlık

Agrega özgöl ağırlığı, agrega kütesinin, agreganın dolu kısmındaki partiküllerin toplam hacmine oranıdır. Bu dolu hacim, partiküllerdeki mikro boşlukları kapsar ancak partiküller arasındaki mezo ve makro boşlukları kapsamaz. Bu partiküllerin özgöl ağırlığı, boşluksuz camsı malzemenin özgöl ağırlığına ve partiküllerdeki mikro boşlukların hacmine bağlıdır ve genellikle tane boyutu azaldıkça artar (Lamond ve Pielert, 2006).

2.5.1.5 Su emme

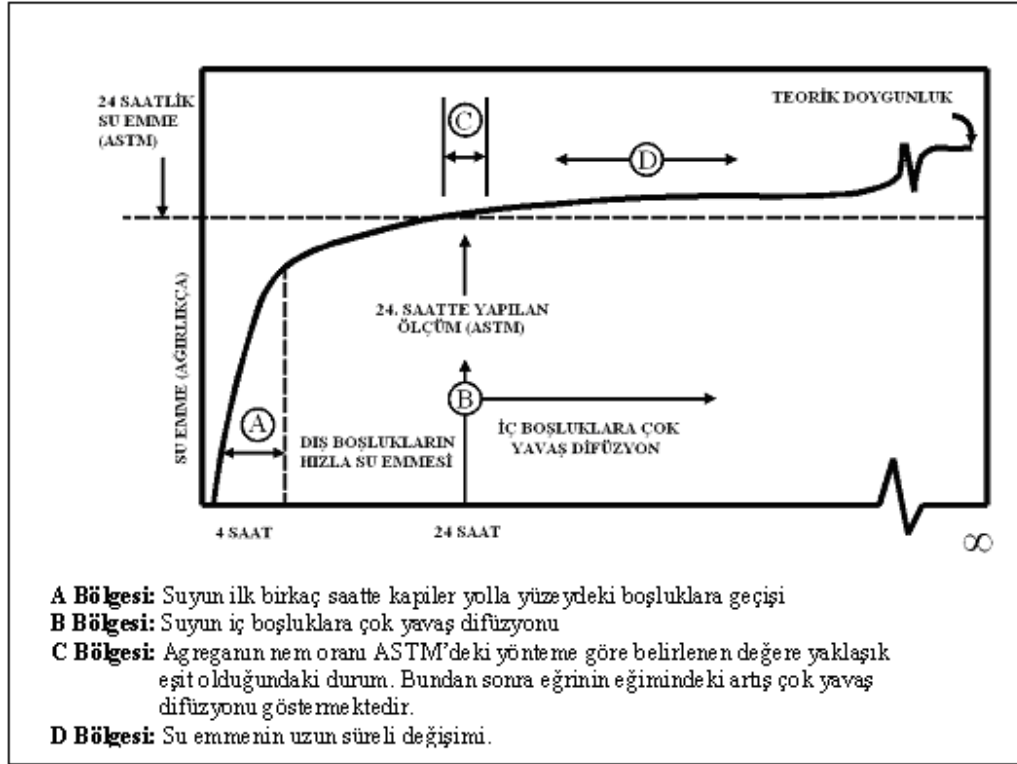
Hafif agregalar, boşluklu yapılarından dolayı normal agregalara oranla %5 ile %25 oranında daha fazla su emer; bu durumun beton üretiminde dikkate alınması önemlidir. Taşıyıcı hafif beton üretiminde kullanılan bazı hafif agregaların su emme oranları Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6 Hafif agregaların bazı özellikleri (Clarke, 1993)

Tip	Şekil	Su emme oranı (%)	Etüv kurusu yoğunluk (kg/m ³)
Genleştirilmiş kil	Yuvarlak	12–14	350–500
Genleştirilmiş şist	Yuvarlak	12–14	500–800
Ponza	Düzensiz	30–40	500–880
Sinterlenmiş uçucu kül	Yuvarlak	9–15	800–850

Hafif agregaların su emme oranı boşluk boyutuna, yapısına, boşlukların dağılımına ve sürekliliğine bağlıdır. Yüzeye yakın, dışa açık ve birbiri ile ilişkili boşluklar, nemli ortamda ilk birkaç saatte dolarken, daha iç kısımda yer alan süreksiz boşluklar yıllarca su içerisinde bekletilse bile boş kalır. Dane tarafından adsorbe edilen su, çimento ile hemen kimyasal reaksiyona girmez. Ancak uzun süreli kür, çimentonun hidratasyonu ve agrega/matris arayüzeyinin gelişmesinde oldukça yararlıdır.

Taşıyıcı hafif agregaların doygunluk derecesi, bütün boşlukların teorik toplam doygunluğunun yaklaşık %25~35’i arasında değerler alır, ancak Şekil 2.1’de görülebileceği gibi su emme oranı zamana bağlı olarak belirli bölgelere ayrılabilir; bunun için Holm ve Ries’e göre ASTM’de hafif agregalar için tanımlanan doygun yüzey kuru ifadesi teorik olarak hatalı, analitik olarak yanıltıcıdır ve uygun değildir (Lamond ve Pielert, 2006). Yüksek dayanımlı bağlayıcı malzemeler, sertleşmiş halde üstün özelliklere sahiptir ancak otojen rötre ve benzeri nedenlerden dolayı erken yaşta çatlak oluşumuna karşı oldukça duyarlıdır.



Şekil 2.1 Hafif agregaların tipik su emme-zaman ilişkisi (Lamond ve Pielert, 2006)

Konvansiyonel kür teknikleri bu çatlakları önlemede her zaman etkin olmamaktadır çünkü suyun beton içerisine nüfuzu, çimento hamurunun sızdırmazlığından dolayı sınırlıdır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için kullanılacak yöntemlerden biri suya doyurulmuş hafif agregaların su rezervuarı olarak kullanımıdır (Akçay ve Taşdemir, 2008; Lura, vd., 2003). Karışımdaki su rezervuarlarının dağılımı içsel kür mekanizmasında öne çıkan en önemli parametredir. Düşük su/çimento oranına sahip hamurda suyun maksimum taşınım uzaklığı birkaç yüz mikrometre olarak tahmin edilmektedir. Su rezervuarlarının matris içerisinde iyi dağılması ile içsel kür işleminin verimliliği de artmış olacaktır. İçsel kürlemede en yeni görüşlerden birisi çok küçük doymuş hafif agregaların beton içerisinde dağıtılarak küçük su rezervuarları oluşturulmasıdır. Agregataneleri arasındaki mesafe azalacağından bu tanelerdeki suyun difüzyonu/sızması için uzun mesafe kat etmesine gerek kalmayacaktır (Lura, vd., 2003). Yapılan deneysel çalışmalarda beton içerisindeki doymuş hafif agregaların otojen rötre azaltmakta, hatta engellemekte oldukça etkin olduğu görülmüştür (Kovler, vd., 2004; Akçay ve Taşdemir, 2008).

Bu tezin deneysel çalışmasının konusu olan hafif beton üretiminde ponza agregası kullanılması nedeni ile aşağıda ponza ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir.

2.5.2 Ponza

Ponza, TS 3234'te birbirine bağlantısız boşluklu, sünger görünümlü silikat esaslı, birim hacim ağırlığı genellikle $1,0 \text{ gr/cm}^3$ 'ten küçük, hafif, suda yüzebilen sertliği Mohs skalasına göre yaklaşık 5–6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir madde olarak tanımlanmıştır. Ponza taşında bulunan mikro gözeneklerin arası genelde süreksiz olduğundan permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı oldukça yüksektir. Ponza kendisine özgü bazı özellikleri ile perlit, obsidyen, pektayn gibi benzer volkanik camsı kayalardan ayrılır. Rengi, gözenekliliği ve kristal suyunun olmaması nedeni ile diğer volkanik kayalardan pratik olarak ayırt edilmektedir. Renk benzerliği/yakınlığı ve kimyasal bileşimi bakımından perlit ile karıştırılmakta, bazı durumlarda perlitten ayırt edilmesi zorlaşabilmektedir. Ponzada gözenekler, gözle görülebilecek boyutlardan, mikroskobik boyutlara kadar değişmektedir ve her bir gözenek diğerinden camsı bir zarla yalıtılmıştır. Ponzanın kimyasal bileşiminde genel olarak %60-75 SiO_2 , %13-17 Al_2O_3 , %1-3 Fe_2O_3 , %1-2 CaO , %7-8 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ ve eser miktarda TiO_2 ile SO_3 bulunmaktadır. Ponzanın içeriğindeki Al_2O_3 kayaca ateşe ve sıcaklığa karşı yüksek dayanıklılık, SiO_2 ise aşındırıcı özellik kazandırmaktadır (Gündüz, 1998). Volkanik faaliyetler sonucunda asidik ve bazik olmak üzere iki tür ponza oluşur (Çizelge 2.7). Bazik ponza, kahverengimsi, siyahımsı koyu görünümde, özgül ağırlığı $1-2 \text{ gr/cm}^3$ civarında taşlardır. Bazik ponzaya bazalt curufu veya scoria da denilmektedir.

Çizelge 2.7 Ponzanın kimyasal özellikleri (Gündüz, 1998)

Bileşim	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	$\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$
Asidik Ponza	%70	%14	%2,5	%0,9	%0,6	%9
Bazik Ponza	%45	%21	%7	%11	%7	%8

Yeryüzünde en yaygın bulunan ve en çok kullanılan asidik ponza ise kirli beyaz veya grimsi beyaz renkte olabilmektedir. Her iki tür de, oluşum esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi ani olarak terk etmesi sonucu oldukça gözenekli bir yapı kazanmıştır. Asidik karakterli ponzada silis oranı daha yüksek olup, inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulabilmektedir. Bazik karakterli ponzada alüminyum, demir, kalsiyum ve magnezyum bileşenleri daha yüksek oranda bulunması nedeni ile diğer endüstriyel alanlarda, örneğin gübre sanayinde ve tarımda toprak ıslahı amacı ile kullanılmaktadır (Gündüz, 1998).

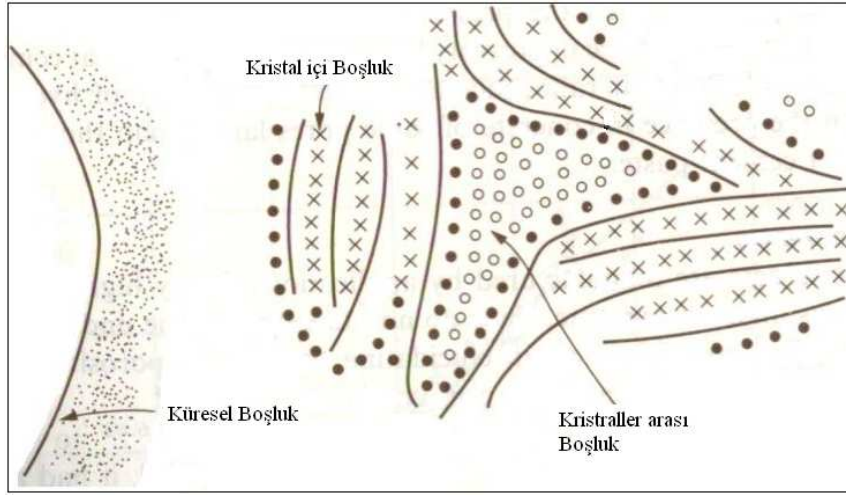
2.6 Betonda Boşluk Yapısı

Heterojen yapıya sahip kompozit bir malzeme olan beton agrega, çimento hamuru matrisi ve agrega-çimento arayüzeyi olmak üzere üç farklı fazdan oluşmaktadır. Taze ve sertleşmiş betonda farklı oranda ve boyutlarda, beton özelliklerini önemli ölçüde etkileyen boşluklar bulunmaktadır. Normal betonlarda olduğu gibi hafif betonlarda da fiziksel ve mekanik özellikler boşluk yapısı ile yakından ilişkilidir.

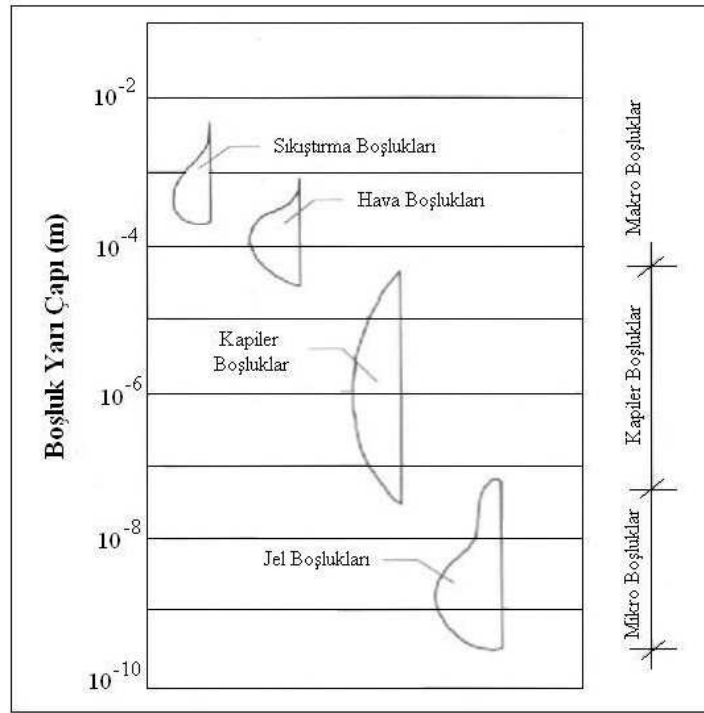
Sertleşmiş betondaki boşluklar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Erdoğan, 2003).

- Taze betonun yerleştirilmesi sırasında betonun içinde oluşan hapsolmuş hava boşlukları,
- Agrega tanelerinin yapısında bulunan boşluklar,
- Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki jel boşlukları, kapiler boşluklar ve sürüklenmiş hava boşlukları,
- Taze betondaki terleme nedeni ile sertleşmiş çimento hamurundaki boşluklar,
- Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeni ile çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşan boşluklar.

Çimento hamuru ve betondaki boşluklar çoğunlukla yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terlemesi, buharlaşma olayları veya kimyasal katkılar nedeni ile oluşur. Uyan (1975), beton içindeki boşlukları yedi kısımda incelemiştir. Bunlar, agrega tanelerinin kendi bünyesi içindeki boşluklar, sertleşmiş çimento hamuru içinde yer alan 10-35Å⁰ boyutundaki jel boşlukları, 60-10⁶Å⁰ boyutundaki kılcal boşluklar ve 0,1mm'nin üzerindeki büyük boşluklar, agrega yığını içinde kalan boşluklar, betonun farklı oturmasından kaynaklanan boşluklar ve çimento harcının agrega tanelerinin arasını doldurmaları sırasında meydana gelen küresel hava boşlukları olarak tanımlamıştır. Neville (2000), hidrate çimento hamurundaki boşlukları Şekil 2.2'de görüldüğü gibi küresel boşluklar, kristal içi boşluklar ve kristaller arası boşluklar olarak tanımlamıştır. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluklar boyutuna göre Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te görüldüğü gibi gruplandırılabilir. Çimento hamurunun içinde yaklaşık su molekülü boyutlarında olan çok küçük gözenekler vardır. Hidratasyon sonucunda oluşan jellerin yapısında yer alan bu boşluklara jel boşlukları adı verilir. Birbiri ile bağlantısı olan bu boşlukların boyutu 15–20 Å civarındadır. Jel boşluklarındaki su, serbest su gibi kolayca hareket edemez ve boşlukları kolayca terk edemez.

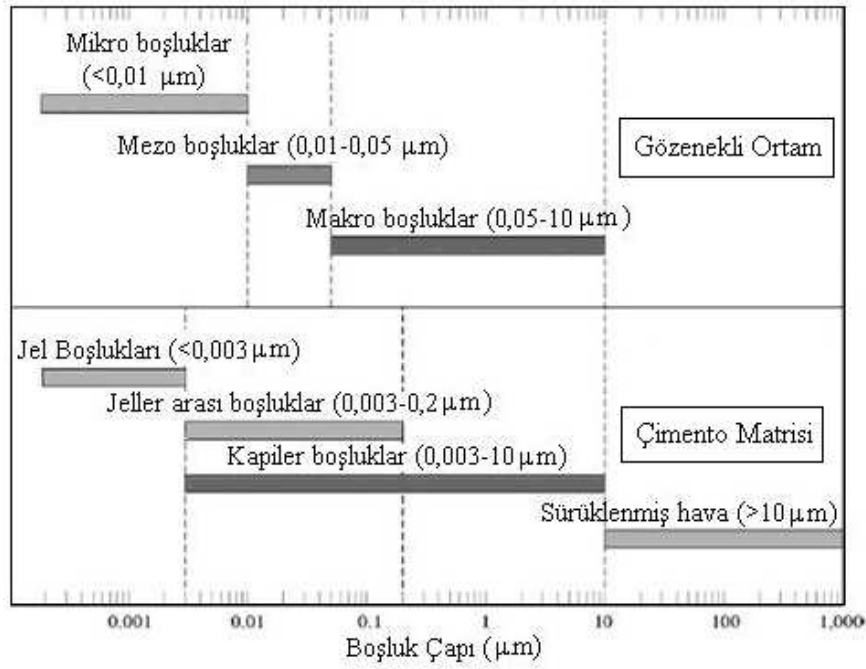


Şekil 2.2 Hidrate çimento hamurundaki boşluk sistemi (Neville, 2000)



Şekil 2.3 Çimento hamurundaki boşluklar (Baradan vd., 2002)

Hidratasyon sonucu oluşan jelin yapısındaki jel boşluğu hacim olarak yaklaşık %28 oranındadır. Hidratasyon devam ettikçe çimento hamurunun içerisindeki jel ve jel boşlukları artmakta ancak boşluk oranı değişmemektedir (Baradan vd., 2002; Erdoğan, 2003; Neville, 2000).



Şekil 2.4 Boşluk çaplarının sınıflandırılması (Moon vd., 2006)

Çimento hamurundaki kapiler boşluklar, hidrasyonun herhangi bir aşamasında hidrasyonun katı ürünleri tarafından doldurulamayan gözeneklerdir. Hidrasyonun ilerlemesine bağlı olarak jel büyümekte ve kapiler boşluk sistemi azalmaktadır. Çimento hamurundaki kapiler boşluk oranı su/çimento oranına ve hidrasyon derecesine bağlıdır. Çimento hamuru içinde rastgele dağılmış halde bulunan kapiler boşlukların boyutu yaklaşık $1.3 \mu\text{m}$ 'dir. (Neville, 2000). Hidrasyonun tam geliştiği yoğun çimento hamurlarında, kapiler boşluklar jel tarafından doldurulur, ağ sistemi şeklindeki gözenekler tıkanır, dayanıklı ve geçirimsiz yapı oluşur. Çimento hamuru içerisinde rastgele dağılım gösteren, değişik şekil ve boyutlardaki kapiler boşluklar, çimento hamurunun karıldığı anda genelde birbirleri ile bağlantılı durumdadır. Hidrasyonun devamı ve jel miktarının artışı ile bu boşluklar arasındaki bağlantı azalır. Kapiler boşluk oranı çimento hamurunun dayanımını, su geçirimsizliğini ve dayanıklılığını etkilemektedir (Erdoğan, 2003). Hidrasyonun tam olgunluğa ulaşabilmesi için gerekli olan süre, büyük ölçüde su/çimento oranına ve ıslak kür süresine bağlıdır. Çizelge 2.8'de aynı kür koşullarında saklanan çimento hamurlarında kapiler boşlukların arasındaki bağlantıların bloke edilmesi için gerekli olan sürenin su/çimento oranı ile değişimi verilmiştir (Baradan vd., 2002).

Çizelge 2.8 Kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli süre (Baradan vd., 2002)

Su/Çimento Oranı (%)	Kapiler boşlukların bloke edilmesi için gerekli olgunluk süresi
0,40	3 gün
0,45	7 gün
0,50	14 gün
0,60	6 ay
0,70	1 yıl
>0,70	İmkansız

Sürüklenmiş hava kabarcıkları, hava sürükleyici katkı maddeleri kullanıldığında çimento hamuru içerisinde oluşan boşluklardır. Oluşturulan bu boşluklar çimento hamuru taze iken kararlılık göstermekte ve sertleşmiş çimento hamurunda da yer almaktadır. Küresel biçimde, 0,05–1,25 mm boyutunda ve düzenli dağılım gösteren bu tip boşluklar arasında bağlantı yoktur, aralarındaki mesafe genellikle 0,2 mm'den azdır.

Hapsolmuş hava boşlukları, betonun karıştırılması ve yerleştirilmesi sırasında beton içerisine kendiliğinden giren havanın yarattığı, değişik şekil ve boyutlara sahip gelişigüzel dağılım gösteren boşluklardır. Bu boşlukların miktarı beton üretiminde kullanılan malzeme oranlarına bağlıdır. En büyük agrega boyutunun artması hapsolmuş hava boşluğu oranını azaltmaktadır. Normal olarak sıkıştırma işlemi uygulanmış bir betonun içerisinde yer alan hava boşluklarının toplam miktarı beton hacminin yaklaşık olarak %0,5'i ile %3'ü arasında değişir.

Çimento hamurundaki boşluklardan başka beton içerisinde yer alan agregaların bünyesinde bulunan boşluklar da önemlidir. Betonda kullanılan normal ağırlıklı agregalarda %0-%20 arasında boşluk bulunabilmektedir. Hafif agregalarda ise bu oran genelde %30-%50 kadardır. Agregalardaki boşluklar değişik şekil ve boyutlarda olabilmekte, bu boşlukların boyutları ve miktarı betonun dayanımını, geçirimliliğini ve dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir (Erdoğan, 2003).

Hidrate çimento nanometreden mikrometre ölçeğine kadar boşluk boyutuna sahip oldukça gözenekli bir malzemedir. Çimento esaslı malzemelerde boşluk sayısı fazla olmasına rağmen Powers'ın da önceki çalışmalarında işaret ettiği gibi bu sistemlerin permeabilitesi düşüktür. Porozite, malzeme özelliklerini, bilhassa dayanımı ve permeabiliteyi önemli ölçüde etkilemektedir. Çimento esaslı malzemelerin boşluk yapısının kompleks olmasından dolayı toplam porozite ve boşluk boyutu dağılımı gibi boşluk parametrelerini belirlemek oldukça güçtür (Abell vd., 1998; Cook vd., 1999). Betonun boşluk yapısı SEM ve BSE gibi mikroskobik görüntü analiz teknikleri ile ve cıva porozimetresi, su buharı adsorpsiyonu ve

azot adsorpsiyonu gibi deneyler ile belirlenmektedir. Bunlardan cıva porozimetresi diğerlerine oranla daha kolay ve basit bir deney olduğundan yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem çimento esaslı malzemelerdeki boşluk boyutlarının gerçek dağılımını vermekte yetersiz kalmaktadır (Lange vd., 1994; Abell vd., 1998; Zhang, 1998; Moro vd., 2002; İgarashi vd., 2005).

Çimento esaslı malzemelerde tek bir yöntem ile boşluk yapısını karakterize etmek mümkün değildir. Örneğin, cıva porozimetresi deneyi ile büyük çaplı kapiler boşluklar (0,005-10 μm) ölçülebilirken adsorpsiyon yöntemleri ile C-S-H jeli boşlukları (<0,03 μm) gözlemlenebilir. Bundan dolayı boşluk yapısını tam olarak belirleyebilmek için yukarıda ifade edilen yöntemlerden bir kaçını bir arada kullanmak daha doğru sonuçlar verecektir (Abell vd., 1998).

Boşluk sistemi, betonun bir çok özelliğini, en önemlisi dayanımını etkilemektedir. Sertleşmiş çimento hamurundaki kapiler boşluklar su/çimento oranına bağlıdır. Su/çimento oranı aynı zamanda betonda arayüzey porozitesini de etkilemektedir. Literatürde beton dayanımı ile su/çimento oranı arasında boşluk sistemi karakteristiklerini de dolaylı olarak dikkate alan bir çok bağıntı mevcuttur. Ancak bu tip dolaylı bağıntılar sertleşmiş betondaki boşlukları dikkate almamaktadır. Boşluk sisteminin en önemli karakteristik parametreleri porozite ve cıva porozimetresi deneyi ile belirlenen boşluk çapı dağılımıdır. Çimento esaslı malzemelerde 4 farklı boşluk tipi mevcuttur. Bunlar 0,5-10 nm boyutlarında mikro boşluklardan oluşan jel boşlukları, ortalama yarıçapı 5-5000 nm olan mezo boşluklardan oluşan kapiler boşluklar, sürüklenmiş hava neticesinde oluşan ve yetersiz yerleşmeden kaynaklanan makro boşluklardır. Çoğunlukla 1,5-2,0 nm boyutunda olan jel boşluklarının beton dayanımına belirgin bir etkisi yoktur ancak bu tip boşluklar sünme ve rötreyi etkiler. Kapiler boşluklar ve diğer büyük boşluklar ise dayanım ve elastisite gibi betonun mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Bundan dolayı betonun dayanım-boşluk ilişkisi araştırılırken jel boşlukları ihmal edilebilir (Kumar vd., 2003).

Boşluk yapısı, betonun dayanım, elastisite, rötre, durabilite, vb. özelliklerini belirleyen önemli bir mikro-mezo özelliktir. Beton bilimi boşluk yapısını mikro ($\leq 1\mu\text{m}$), mezo ($1\mu\text{m}-1\text{cm}$) ve makro ($>1\text{cm}$) ölçekte sınıflandırmaktadır. Molekül ve kristal yapılar, jeller ve boşluklar gibi mikro ölçekteki yapılar süresiz ve heterojendir. İri ve ince agregalar, çimento hidratları, hidrate olmamış çimento taneleri, boşluklar ve arayüzey gibi mezo ölçekteki yapılar sürekli ve heterojendir. Makro ölçekte ise beton sürekli ve homojen yapıdadır. Betondaki boşluklar mikro boşluklar ($\leq 25\text{\AA}$), mezo boşluklar ($25-500\text{\AA}$), makro boşluklar ($500\text{\AA}-10\mu\text{m}$) ve hava boşlukları ($>10\mu\text{m}$) olarak tanımlanırlar (Zhang, 1998). Betondaki boşluk boyutları jel,

kapiler ve hava boşlukları olarak Çizelge 2.9’da özetlenmiştir.

Çizelge 2.9 Betondaki boşluk boyutları

Araştırmacılar	Jel Boşlukları	Kapiler Boşluklar	Hava Boşlukları
Neville		1,3 μm	
Erdoğan	1,5-2 nm		50-1250 μm
Abell		0,005-10 μm	
Kumar	0,5-10 nm	0,01-10 μm	
Zhang			>10 μm
Moon	<3 nm	0,003-10 μm	>10 μm
Alınan Değerler	<10 nm	10nm-10 μm	10-1250 μm

Literatürde çimento esaslı malzemelerin dayanım-porozite ilişkisini veren bir çok bağıntı mevcuttur (Çizelge 2.12). Örneğin Feret, (2.8) bağıntısında görüldüğü gibi basınç dayanımını çimentonun (V_c), suyun (V_w) ve havanın hacmi (V_a) ile ilişkilendirmiştir (Kendall vd., 1983; Narayanan vd., 2000).

$$f_c = A \left[\frac{V_c}{V_c + V_w + V_a} \right]^2 \quad (2.8)$$

Çizelge 2.10 Dayanım-porozite ilişkisi (Bouguerra, 1998)

Model	Ampirik Bağıntı
Bal’shin	$f_c = f_{c0}(1 - p)^m$
Ryshkewitch	$f_c = f_{c0}e^{-m \cdot p}$
Schiller	$f_c = K \ln(p / p_0)$
Hasselman	$f_c = f_{c0} - m \cdot p$

Çizelge 2.10’da verilen bağıntılarda f_c , boşluklu malzemenin basınç dayanımını, f_{c0} , sıfır porozite için teorik basınç dayanımını, p , poroziteyi, p_0 , sıfır dayanım için kritik poroziteyi, K ve m ise ampirik sabitleri ifade etmektedir. Bu bağıntılardan farklı olarak Odler ve Röfler (1985) dayanım-porozite ilişkisini belirlemek için boşluk yarıçaplarını farklı aralıklara bölmüş, bu aralıklardaki poroziteyi belirleyerek (2.9) bağıntısında görüldüğü gibi dayanım ile ilişkilendirmiştir (Zhang, 1998).

$$f_c = f_{c0} - a \cdot p_{>106nm} - b \cdot p_{106-53nm} - c \cdot p_{53-10,6nm} - d \cdot p_{<10,6nm} \quad (2.9)$$

Bağıntıda, a , b , c ve d sabit katsayıları, p ise ilgili yarıçap aralığına bağlı olarak poroziteyi ifade etmektedir.

Atzeni, vd. (1987) ise, basınç dayanımı ile poroziteyi boşluk boyutu dağılımının etkisini dikkate alarak, cıva porozimetresi deneyinden elde edilen ortalama dağılım yarıçapını da (r_m) kullanarak (2.10) bağıntısı ile ilişkilendirmiş, f_{co} değerini lineer dayanım-boşluk ilişkisinden belirlemiştir.

$$f_c = K \frac{f_{co}(1-p)}{\sqrt{r_m}} \quad (2.10)$$

Kumar, vd. (2003), Atzeni, vd. tarafından verilen (2.10) bağıntısına, oransal olarak bağlayıcı miktarı (C), agrega cinsi (f_{ca}), asidik çözeltilerin etkisi (f_e), beton yaşı (f_a) ve sertleşmiş betonun maruz kalabileceği yüksek sıcaklık etkisi (f_T) gibi faktörleri ekleyerek (2.11) bağıntısına ulaşmıştır.

$$f_c = K \cdot f_{ca} \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_T \cdot C \cdot \frac{(1-p)}{\sqrt{r_m}} \quad (2.11)$$

Ding, sertleşmiş çimento hamurunun basınç dayanımını (f_c), toplam porozite (p) ve özgül yüzey alanı (S) ile ilişkilendirmiş ve (2.12) bağıntısına ulaşmıştır (Zhang, 1998).

$$f_c = K_1 \frac{(1-p)}{(1+2p)} [K_2(1-p)]^{K_3S+K_4} \quad (2.12)$$

Huang vd., (2.12) bağıntısını mikro ve mikro-makro boşlukları ayrı ayrı ele alarak yeniden düzenlemiş, (2.13) bağıntısına ulaşmıştır (Zhang, 1998).

$$f_c = [K_1 K_2^{(K_3+K_4)}] [K_2^{K_3(S-1)} (1-p)^{(K_3S+K_4)}] \left[\frac{(1-p)}{(1+2p)} \right] \quad (2.13)$$

(2.12) ve (2.13) bağıntılarında K_1 , K_2 , K_3 ve K_4 sabitleri ifade etmektedir.

Bir malzeme içinde boyut, şekil ve dağılımı ile boşluklar ısı ve buhar geçişine etki eder. Katı faz içerisinde hapsedilen havanın çok sayıda mikroskobik boşluklara dağılması elverişli bir durumdur. Buna karşın büyük boşluklar elverişsizdirler ve ısı iletimini fark edilir ölçüde arttırırlar. Ortalama boşluk çapı azaldıkça, boşluk içinde hava sirkülasyonu azaldığından malzemenin ısı iletimi azalır (Özer, 1982). Kanca (1980), boşluklu bir malzemenin boşluklarının çapı küçüldükçe ısı yalıtma kabiliyetinin arttığını ifade etmiştir. Benzer ifade Narayanan ve Ramamurthy (2000) tarafından da dile getirilmiştir.

Gözenekli malzemelerin ısı iletkenliğine katı fazın kimyasal yapısı, birim ağırlığı, dağılık fazı oluşturan boşlukların miktarı, boyutu, dağılımı ve bu boşluklar içindeki gazın cinsi etki eder.

Isı iletkenliğinde bunlardan başka malzemenin sıcaklığı ve nem oranı da etkilidir (Aköz vd., 2001).

Betonun ısı iletim katsayısı büyük ölçüde karışım oranlarına, agreganın cinsine ve kaynağına, nem içeriğine ve birim ağırlığına bağlıdır (Kim vd., 2003).

Agreganın cinsi, porozitesi ve nem içeriği betonun ısı iletimine en çok etki eden özellikler olduğundan genelde agreganın ısı iletim katsayısı betonun yalıtım kalitesini belirleyen en önemli faktördür. Düşük ısı iletim katsayısına sahip agregalı betonların ısı iletim katsayısı da düşük olur. Nem oranının artışı ile betonun ısı iletim katsayısı kuru duruma göre %70 daha fazla olabilir. Literatürde ısı iletim katsayısını porozite ile ilişkilendiren sınırlı sayıda teorik bağıntı mevcuttur. “Boulder Canyon Project” raporu betonun ısı iletim katsayısını teorik olarak veren en eski kaynaklardan biridir ve betonun karışım oranlarını ve agreganın petrografik bileşimini esas almaktadır. Campbell-Allen ve Thorne’un önerdiği modelde ise hacim oranları ve iri agrega ile harç fazın ısı iletim katsayıları girdi olarak kullanılmıştır. Diğer taraftan Harmathy, betonun porozitesini, katı fazın ısı iletkenliğini ve nem içeriğini göz önüne alarak yeni bir model geliştirmiş, bu modelin beton ve diğer yapı malzemeleri için daha uygun olduğu görülmüştür. Zimmerman ise poroziteye ilave olarak boşluk geometrisini de dikkate alan bir model geliştirmiş, bu modeli kayaçların doymuş ve kuru durumdaki ısı iletim katsayısının tahmininde kullanmıştır. Boşluk yapısını dikkate alarak yapı malzemelerinin ısı iletim katsayısının tahminine yönelik bir diğer yaklaşım Bhattacharjee vd. tarafından önerilmiş, iki farklı boşluk yapısı tanımlanarak modellenmiştir. Betonun ısı iletim katsayısının tahmini için Campbell-Allen ve Thorne tarafından önerilen modelde, betonun sürekli bir harç fazı ve bu fazın içinde dağınık olarak yer alan süreksiz agrega fazından oluştuğu kabul edilmiş, ısı iletim katsayısı (2.15) bağıntısı ile ifade edilmiştir (Khan, 2002).

$$\lambda = \lambda_m (2M - M^2) \left[\frac{\lambda_m \lambda_a (1 - M)^2}{\lambda_a M + \lambda_m (1 - M)} \right] \quad (2.15)$$

(2.15) bağıntısındaki M, harç fazın hacimsel oranına (V_{hf}) bağlı olarak (2.16) bağıntısında görüldüğü gibi ifade edilmiştir.

$$M = 1 - (1 - V_{hf})^{1/3} \quad (2.16)$$

(2.15) ve (2.16) bağıntılarında V_{hf} harç fazının hacminin beton hacmine oranını, λ ısı iletim katsayısını, m ve a indisleri ise sırası ile harç ve agregayı ifade etmektedir.

Kim vd. (2003), normal agregalı betonun ısı iletim katsayısına etki eden yaş, agrega hacim

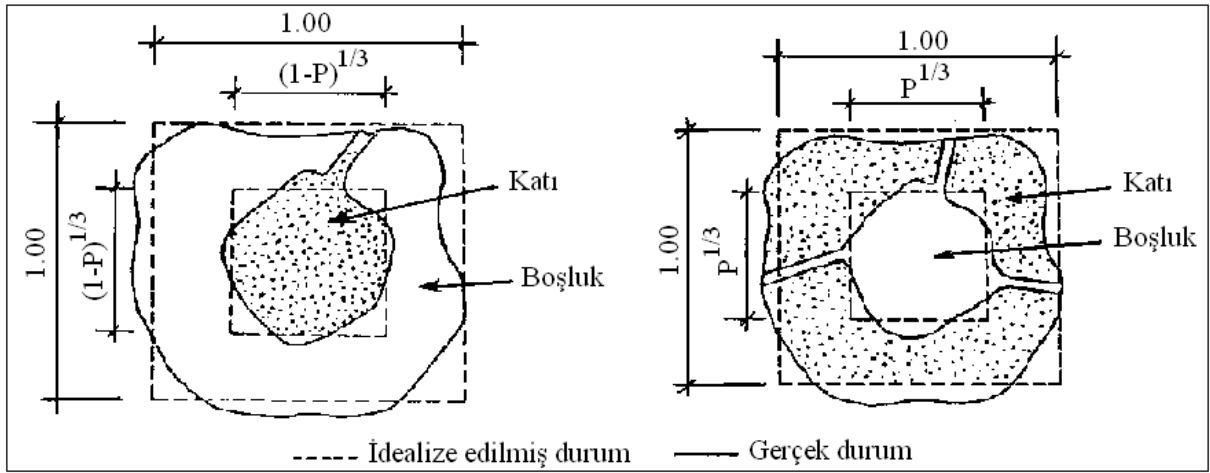
oranı, çimento miktarı, katkı cinsi, ince agrega oranı, sıcaklık ve nem içeriği gibi parametreleri ayrı ayrı irdelemiş, kendi çalışmalarında kullandıkları malzemeler için (2.17) bağıntısını geliştirmişlerdir.

$$\lambda_c = \lambda_{ref} [0,293 + 1,01 A_O] [0,8(1,62 - 1,54(W/C)) + 0,2 R_h] [1,05 - 0,0025 T] [0,86 + 0,0036(A_O)] \quad (2.17)$$

Bağıntıda λ_c betonun teorik ısı iletim katsayısını, A_O betondaki agrega hacim oranını, W/C su/çimento oranını, R_h nem içeriğini, T sıcaklığı, $A_i O$ betondaki ince agrega hacim oranını, λ_{ref} ise referans numunenin ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

Gözenekli bir malzemenin boşluklarının çapı küçüldükçe ısı yalıtım kabiliyeti artar (Kanca, 1980). 3 mm'den daha küçük çaplı boşluklarda radyasyon ve konveksiyon etkisi, diğer ısı taşınım modları dikkate alındığında ihmal edilebilir düzeydedir. Normal ortam koşullarında, katı fazda ve boşluklarda ısı taşınımı önemli oranda kondüksiyon yolu ile gerçekleşir. Bazı çok eski çalışmalarda yapı malzemelerinin ısı iletim katsayısı yoğunluğa ve nem içeriğine bağlı olarak ifade edilmiş, ancak ilerleyen yıllarda porozitenin gözenekli malzemelerin ısı iletim katsayısında en önemli faktörlerden biri olduğu anlaşılmıştır. Gözenekli yapı malzemelerindeki ısı taşınım modları ve genel ısı iletim modelleri dikkate alındığında porozite, katı fazın ısı iletim katsayısı ve boşluklardaki hava veya su malzemenin ısı iletim katsayısına etki eden en önemli parametrelerdir (Bhattacharjee ve Krishnamoorthy, 2004).

Gözenekli malzemelerin ısı iletim katsayısının tahmin edilmesi için etkin ortam yaklaşımı (EMA) ve Ohm Kanunu adlı iki farklı model öne sürülmüştür (Khan, 2002; Bhattacharjee ve Krishnamoorthy, 2004). Temel konseptlerinden dolayı EMA modelleri birbiri ile kesişmeyen kapalı boşluklu sistemler için kullanılmaktadır. Ohm Kanununa dayalı modeller ise gözenekli yapının birbirini izleyen katı ve boşluk tabakalarından oluştuğunu varsaymaktadır. Beton, tuğla, hafif bloklar gibi yapı malzemelerinde ise birbiri ile bağlantılı boşluklar olduğundan bu iki modelin bu tarz malzemelere uygulanması gerçekçi sonuçlar vermeyecektir. Bundan dolayı boşlukların daha farklı bir şekilde idealize edilmesi gerekmektedir. Seramik yapı malzemelerindeki boşluklar şekil ve boyut olarak farklılıklar göstermektedir. Bu boşlukların büyük çoğunluğu birbiri ile bağlantılıdır. Isı iletim katsayısını modellemek için Bhattacharjee ve Krishnamoorthy (2004) birbiri ile bağlantılı bu boşluk sistemini iki farklı tip boşluk içeren birim hücreler ile ifade etmiştir. Bunlar hacminin neredeyse tamamı katı faz ile çevrelenen kapalı boşluklar ve katı fazı tamamen çevreleyen açık boşluklardır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5a Katı fazı çevreleyen açık boşluk Şekil 2.5b Katı faz ile çevrelenen kapalı boşluk

Şekil 2.5 İdealize edilmiş birim hücre (Bhattacharjee ve Krishnamoorthy, 2004)

Araştırmacılar, p porozitesine sahip bir malzemedeki kapalı boşlukların oranını “ f ” ile, açık boşlukların oranını ise “ $1-f$ ” ile ifade etmiş, ısı iletim katsayısını boşlukların kuru olması durumunda (2.18) bağıntısı ile, suya doymun olması durumunda ise (2.19) bağıntısı ile vermiştir (Bhattacharjee ve Krishnamoorthy, 2004).

$$\frac{\lambda_d}{\lambda_k} = \lambda_{1d}^{(1-f)} \times \lambda_{2d}^f \quad (2.18)$$

$$\frac{\lambda_s}{\lambda_k} = \lambda_{1s}^{(1-f)} \times \lambda_{2s}^f \quad (2.19)$$

Bağıntılarda λ_d boşlukların kuru olması durumundaki ısı iletim katsayısını, λ_s boşlukların suya doymun olması durumundaki ısı iletim katsayısını, λ_k katı fazın ısı iletim katsayısını, λ_{1d} ve λ_{2d} açık ve kapalı boşlukların kuru durumdaki ısı iletim katsayısını, λ_{1s} ve λ_{2s} ise açık ve kapalı boşlukların suya doymun durumdaki ısı iletim katsayısını ifade etmektedir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Ponza agregalı hafif betonun fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması, boşluk yapısı ile bu özellikler arasındaki ilişkilerin irdelenmesi amacı ile planlanan bu deneysel çalışma, agregaların suya doyurulması ve öndeneyle, numune üretimi, kürü, fiziksel ve mekanik deneyler olmak üzere beş aşamada gerçekleştirilmiştir. Taze betonda slump, VeBe süresi, yoğunluk; sertleşmiş betonda yoğunluk, su emme, ısı iletim katsayısı, su buharı difüzyon direnç faktörü, rötre, basınç dayanımı, yarma dayanımı, statik elastisite modülü belirlenmiş, boşluk yapısı optik mikroskop ve cıva porozimetresi ile araştırılmıştır.

Agregaların suya doyurma yönteminin birbiri ile karşılaştırılması için üç farklı yöntem ile beton üretilmiştir.

- Birinci grupta ponza agregaları olduğu gibi kullanılmış, bu grupta, ponza agregalarının su emme oranları deneysel olarak belirlenmiş, karma suyu bu orana göre artırılmıştır.
- İkinci grupta agregalar normal koşullarda suya doyurulmuş, agregalar bu hali ile üretimde kullanılmış, üretimde normal karma suyu ilave edilmiştir.
- Üçüncü grupta ise agregalar bu çalışmada geliştirilen teknik ile vakumlanarak suya doyurulmuştur.

Üç farklı yöntem ile suya doyurulan aynı granülometrideki ponza agregaları ve kalker esaslı kırma kum kullanılarak çimento dozajı 350 ve 500 kg/m³ olan, hava sürükleyici katkı maddesi katılan ve katılmayan olmak üzere toplam 12 farklı seride beton üretilmiştir. Agregaların olduğu gibi kullanıldığı seride; öncelikle laboratuvar ortamında saklanan ponza agregalarının bir saatlik su emme oranı deneysel olarak belirlenmiş, bu oranda su karma suyuna ilave edilmiştir. Üretimde karma suyunun yarısı beton mikseri içindeki agregalara katılmış, suyu emmesi için otuz dakika beklenmiş, agregaların yüzeylerinin ıslanması sağlanmıştır. Normal koşullarda suya doyurulan ve vakum ile suya doyurulan ponza agregalı üretimlerde ise ön su emdirme işlemine gerek kalmamıştır.

Malzeme miktarları TS 3234'e uygun olarak, ağırlık esasına göre belirlenmiştir. Her bir serinin üretiminde taze betonda, slump, VeBe süresi, yoğunluk deneyleri yapılmış; sertleşmiş betonda, yoğunluk, ses geçiş hızı, su emme, ısı iletim katsayısı, su buharı difüzyon direnç faktörü, kuruma rötresi, basınç dayanımı, yarma dayanımı ve statik elastisite modülü değerleri belirlenmiş, betonun boşluk yapısı optik mikroskop ve cıva porozimetresi ile incelenmiş, mekanik ve fiziksel özellikler arasındaki ilişkiler boşluk parametrelerine bağlı olarak

araştırılmıştır. Beton üretiminde kullanılan malzemeler ve üretim ile ilgili aşamalar aşağıda verilmiştir.

3.1 Malzemeler

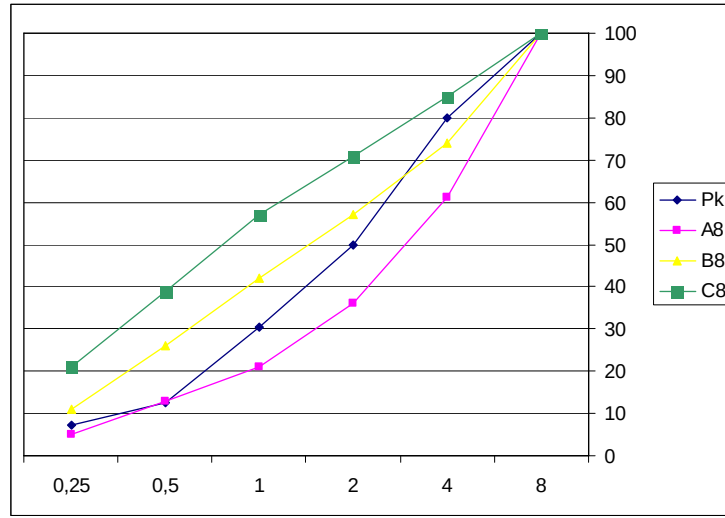
Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen ponza agregası, kalker esaslı kırma kum, CEM I 42.5R çimentosu, şehir şebeke suyu, süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı maddeleri kullanılmıştır.

3.1.1 Agregalar

Beton üretiminde fiziksel özellikleri ve karışım oranları Çizelge 3.1’de verilen Nevşehir yöresinden temin edilen maksimum dane boyutu 8 mm olan ponza taşı ve Cebeci yöresinden temin edilen maksimum dane boyutu 2 mm olan kalker esaslı kırma kum kullanılmıştır. Granülometrisi Şekil 3.1’de verilen ponza agregalarının karışım oranları dane boyutuna göre; 8–4mm arası %20, 4–2mm arası %15, 2–1mm arası %30, 1–0mm arası %20, kırma kum %15 olarak belirlenmiştir. Ponza taşına ait mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 3.2a ve 3.2b’de, kimyasal özellikler Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.1 Agregaların fiziksel özellikleri ve karışım oranları

Malzeme		0–1 (mm)	1–2 (mm)	2–4 (mm)	4–8 (mm)	Kırma Kum
β (kg/m ³) EK		795	627	579	563	1750
γ (kg/m ³) SDYK		1803	1565	1418	1354	2670
Karışım oranı (%)		20	15	30	20	15
Su emme oranı (%)	10 dk	8,7	8,7	11,5	10,5	-
	30 dk	9,4	9,1	11,9	10,9	-
	1 saat	10,2	9,5	12,6	11,2	-
	24 saat	10,9	13,9	16,1	16,7	-



Şekil 3.1 Beton üretiminde kullanılan karışım agregasına ait granülometri eğrisi

Çizelge 3.2a Ponza taşının fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (γ , kg/m ³)	Yoğunluk (D, kg/m ³)	Porozite (p, %)	Ağırlıkça Su Emme (a_s , %)
2166	593	73	49

Çizelge 3.2.b Ponza taşının mekanik özellikleri

Nem Durumu	Etüv Kuru	Hava Kuru	Suya Doygun
Basınç Dayanımı (f_c , MPa)	2,0	3,1	6,4

Çizelge 3.3 Ponza agregasının kimyasal özellikleri

Bileşim	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Kızdırma Kaybı
Analiz Sonuçları (%)	72,9	12,8	1,7	0,3	0,2	0,1	3,1	3,7	<0,01	4,3

3.1.1.1 Agregaların suya doyurulması

Deneyisel çalışmada hafif agregalar olarak kullanılması planlanan genleştirilmiş perlit agregası ile yapılan öndeneylelerde taze ve sertleşmiş beton özelliklerinde istenen/beklenen performans sağlanamamış, bundan dolayı hafif agregalar olarak ponza agregası kullanılmasına karar verilmiştir. Hafif agregalı beton üretiminde, ACI 213R’de (2003) ifade edildiği gibi hafif agregaların kondisyonlanması gerekmektedir. TS 3234 standardında da belirtildiği üzere

betoniyere konulacak hafif agregalar belirli bir oranda nemli olmalıdır. Bundan dolayı bazı durumlarda agregalar betoniyere konularak bir miktar su ile ön karıştırma yapılarak olabildiği kadar üniform nemli bir agrega elde edilmeye çalışılmalıdır. Yapılan ön deneylerde bu yöntemlerin taze betonda yeterli işlenebilirliği sağlamadığı ve agrega doygunluğunun homojen olmadığı gözlenmiş, agregaların vakum yöntemi ile suya doyurulmasının uygun olacağı düşünülmüş, bu çalışmada 650 mmHg sütunu negatif basınç uygulanarak vakumla doyurma yöntemi geliştirilmiştir.

Beton üretiminde kullanılan ponza agregaları üç farklı yöntem ile suya doyurulmuştur. Birinci yöntemde ponza agregaları 24 saat su içinde bekletilerek suya doyurulmuş, bu agregalı betonlar S ile kodlanmıştır. İkinci yöntemde ise ponza agregaları bu çalışmada geliştirilen sistem ile vakum uygulanarak suya doyurulmuş; bu grup, V ile kodlanmıştır. Bu grupta, ponza agregaları, Şekil 3.2’de görülen plexiglass’tan imal edilen 15 litre hacmindeki şeffaf bir kap içerisine yerleştirilmiş, vakum pompası ile iç ortamın basıncı, -650 ± 10 mmHg’ya düşürülmüş, havası alınarak basıncı düşürülen ortama su verilerek agregalar 10 dakika bu durumda bekletilmiş ve suya doygun hale getirilmiştir.



Şekil 3.2 Agregaların vakumlanarak suya doyurulması

Her iki yöntem ile suya doyurulan ponza agregaları elekler üzerine serilmiş, rüzgarsız laboratuvar ortamında ortalama 24 saat süre ile bekletilmiş, yüzeylerindeki fazla suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Üçüncü yöntemde ise ponza agregalarının 1 saatlik su emme oranları belirlenmiş, bu orana bağlı olarak karma suyu arttırılmış, betoniyere konulan ponza agregalarına karma suyunun yarısı ilave edilerek 30 dakika bekletilmiş, agregaların ıslanması sağlanmıştır.

3.1.2 Çimento

Beton üretiminde fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'te verilen CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır.

Çizelge 3.4 Üretimde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Analiz	Standartlar (%)	Analiz Sonuçları (%)	Fiziksel Deneyler	Standartlar	Deney Sonuçları
Çözünmez Kalıntı	Maks. 1,5	-	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	-	3,2
SiO ₂	-	20,73	Birim Ağırlık (g/cm ³)	-	1,1
Al ₂ O ₃	-	3,96	Priz Başlangıç	Min. 60 dk	230 dk
Fe ₂ O ₃	-	3,98	Priz Son	Maks. 600 dk	336 dk
CaO	-	64,38	Hacim Sabitliği	Maks. 10mm	2mm
MgO	Maks. 5,0	0,97	Özgül Yüzey (cm ² /g)	Min. 2800	3006
SO ₃	Maks. 3,5	2,29	Basınç Dayanımı		
K ₂ O	-	0,57			
Na ₂ O	-	-	Gün	Standart (min) (N/mm ²)	Deney Sonucu
Cl ⁻	Maks. 0,1	-	2	20,0	20,1
Kızdırma Kaybı	Maks. 4,0	2,24	7	-	-
S. CaO		1,09	28	42,5	50,2

3.1.3 Kimyasal katkılar

Taze betonda işlenebilmeyi arttırmak amacı ile katı madde oranı % 11,8 olan naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, beton içerisinde boşluk oluşturmak amacı ile de katı madde oranı %18,4 olan yağ alkolü ve amonyum tuzu esaslı hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmış her iki malzemeye ait fiziksel özellikler Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5 Kimyasal katkı maddelerinin özellikleri

Fiziksel Özellik	Süper Akışkanlaştırıcı	Hava Sürükleyici
Yoğunluk (g/cm ³)	1,21	1,01
Klor İçeriği (%)	< 0,1	< 0,1
Renk	Kahverengi	Amber
Homojenite	Homojen	--
Alkali İçeriği (%)	--	<10
Katı Madde Oranı (%) (TS EN 480-8)	11,8	18,4

3.2 Numune Üretimi ve Kodlanması

Beton üretiminde, çimento dozajı 350 ve 500 kg/m³ olan karışımlarda etkin su/çimento oranı 0.55 olarak sabit tutulmuş, malzeme miktarları TS 3234'e uygun olarak ağırlık esasına göre belirlenmiştir. Agregada nem içeriğine göre üç ayrı üretim tekniği uygulanarak 12 farklı beton karışımı hazırlanmıştır. Üretimde işlenebilmenin artırılması için farklı oranlarda süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi, boşluk oranını arttırmak amacı ile de % 0,3 oranında hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmış, bu oranlar ödeneyler ile belirlenmiştir. Numuneler, agrega doygunluğuna (N, S, V), çimento dozajına (35, 50) ve hava sürükleyici katkı kullanılmasına (a, b) göre (Çizelge 3.6a ve 3.6b) kodlanmıştır.

Çizelge 3.6a Numunelerin kodlanması

Agrega Nemliliği			Çimento Dozajı		Hava Sürükleyici İçeriği	
N	S	V	35	50	a	b
Laboratuar ortamı nemliliğindeki ponza agregası ile üretilen beton	Suya doygun yüzey kuru ponza agregalı beton	Vakumlanarak suya doyurulan ponza agregalı beton	350 kg/m ³ dozajlı beton	500 kg/m ³ dozajlı beton	Hava sürükleyici katılmamış beton	% 0.3 Hava sürükleyici katılmış Beton

Çizelge 3.6b Numune kodlarının açılımı

Kod	Açıklama
N35a	Laboratuar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
N35b	Laboratuar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
N50a	Laboratuar nemliliğinde ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
N50b	Laboratuar nemliliğinde ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili
S35a	Suya doygun ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
S35b	Suya doygun ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
S50a	Suya doygun ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
S50b	Suya doygun ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili
V35a	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz
V35b	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicili
V50a	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicisiz
V50b	Vakum ile suya doyurulan ponza agregalı, 500 dozlu, hava sürükleyicili

Her bir karışımda, 1 m³ taze beton için gerekli olan malzeme miktarları Çizelge 3.7'de verilmiştir. Beton üretimi, düşey eksenli, cebri karıştırıcılı, 45 lt kapasiteli betonyerde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.7 1 m³ taze beton için gerekli malzeme miktarları

Kod	Agrega (kg)					Çimento (kg)	Su (kg)	Kimyasal Katkı (kg)	
	P (8-4)	P (4-2)	P (2-1)	P (1-0)	Kırma Kum			Süper Akışkanlaştırıcı	Hava Sürükleyici
N35a	188	283	162	245	270	350	192,5	7,7	0
N35b	171	278	153	256	270	350	192,5	7,7	1,1
N50a	142	219	133	211	218	500	275	5,0	0
N50b	141	220	127	200	217	500	275	5,0	1,5
S35a	179	289	162	244	270	350	192,5	5,6	0
S35b	184	284	156	243	270	350	192,5	5,6	1,1
S50a	144	228	121	184	217	500	275	0	0
S50b	150	226	119	189	217	500	275	0	1,5
V35a	208	309	167	257	271	350	192,5	5,6	0
V35b	190	301	169	259	271	350	192,5	5,6	1,1
V50a	156	248	134	207	218	500	275	0	0
V50b	151	246	132	200	218	500	275	0	1,5

Üretim tekniğine ve malzemelere göre 12 farklı karışımdaki betonda yapılacak yoğunluk, su emme, elastisite modülü ve basınç deneyleri için 10/20 cm boyutlu silindir, standart basınç dayanımının belirlenmesi amacı ile 15 cm boyutlu küp, ısı iletim katsayısının belirlenmesi amacı ile 30x30x4 cm boyutlu plak, su buharı difüzyon direnç faktörünün belirlenmesi için 10/4 cm boyutlu silindir (disk), boy değişiminin izlenmesi için 40x40x160 mm boyutlu prizma numuneler hazırlanmış, boy değişimi ölçümleri birer hafta ara ile yapılmış, diğer özellikler ise 28., 56. ve 90. günlerde yapılan deneyler ile en az 3'er numunede belirlenmiştir.

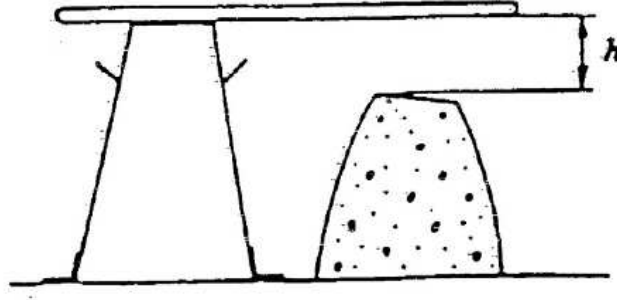
3.3 Taze Beton Deneyleri

Düşey eksenli, cebri karıştırıcılı, 45 lt kapasiteli betonyerde gerçekleştirilen her bir seri için her üretimde taze betonun çökmesi (h, cm), Ve-Be süresi (t, sn) ve taze beton yoğunluğu (D, kg/m³) belirlenmiştir. Deney sonuçlarının ortalama değerleri Çizelge Ek1'de verilmiştir.

3.3.1 Çökme (Slump) deneyi

Taze beton, TS EN 12350-2'ye göre Şekil 3.3'te gösterilen kesik huni şekilli kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı, kalıp yüksekliğinin yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde doldurulmuş, doldurma esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile 25 defa şişlenerek sıkıştırılmıştır. Doldurma ve sıkıştırma işlemlerinden sonra kesik huni düşey şekilde yukarıya doğru çekilerek alınmış, kalıbın

alınmasından hemen sonra, kalıp üst yüzey seviyesi ile çöken beton kütesinin en yüksek noktası arasındaki mesafe (h) ölçülerek taze betonun çökmesi (slump) belirlenmiştir.



Şekil 3.3 Taze betonda çökmenin ölçülmesi (TS EN 12350-2)

3.3.2 Ve-Be deneyi

Taze beton, TS EN 12350-3'e uygun şekilde çökme hunisi içerisine sıkıştırılarak doldurulmuş, kalıp yukarı doğru çekilerek alınmış ve taze beton kütlesi serbest bırakılmıştır. Saydam bir disk, beton kütlesi üzerine, betonla temas edinceye kadar indirilerek betonun çökmesi kaydedilmiş, titreşim masası çalıştırılmış ve saydam diskin alt yüzünün beton ile tamamen kaplanması için geçen süre (Ve-Be süresi) ölçülmüştür.

3.3.3 Yoğunluk deneyi

Taze beton, TS EN 12350-6'ya uygun olarak, ağırlığı (m_1 , kg) ve hacmi (V , m^3) belli olan bir kalıp içerisine sıkıştırılarak doldurulmuş, kalıp üst yüzeyi çelik mala ile tesviye edilmiş, beton ile dolu olan kalıp tartılmış (m_2 , kg), taze beton yoğunluğu (D , kg/m^3) (3.1) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

3.4 Numunelerin Kürü

Numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, yapılacak deneye göre aşağıda açıklandığı gibi farklı koşullarda kür edilmiştir.

3.4.1 Basınç deneyi numuneleri

Standart basınç dayanımının belirlenmesi amacı ile hazırlanan 15 cm boyutlu küp numuneler, TS 3234'te belirtildiği üzere üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış, 7. güne kadar suda bekletilmiş, 18 gün süre ile sıcaklığı ortalama 21 ± 3 °C, bağıl nemi 55 ± 10 olan laboratuvar

ortamında tutulmuştur. Bundan sonra 3 gün süre ile 60 ± 3 °C sıcaklığa ayarlı etüvde kurutulmuş, ortam sıcaklığına gelinceye kadar soğutulmuş ve tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Basınç dayanımının zamana bağlı değişimini belirlemek amacı ile hazırlanan 10/20 cm boyutlu silindir numuneler ise deney gününe kadar kür havuzunda bekletilmiş, basınç deneyi, numuneler suya doymun durumda iken yapılmıştır.

3.4.2 Isı iletim katsayısı deney numuneleri

Isı iletim katsayısının belirlenmesi için hazırlanan numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış, deney gününe kadar 21 ± 3 °C sıcaklıktaki su içinde, standart koşullarda saklanmıştır. Deneyden önce 100 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuş, ısı iletim deneyi, numuneler etüv kurusu halde iken yapılmıştır.

3.4.3 Buhar difüzyonu numuneleri

Su buharı difüzyon direnç faktörünün (μ) belirlenmesi için hazırlanan 10/20 cm boyutlu silindir numuneler üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış, deney gününe kadar 21 ± 3 °C sıcaklıktaki su içinde, standart koşullarda saklanmıştır. Taş kesme aletinde 4 cm kalınlığında kesilen numuneler, 100 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuş, deneyden önce sıcaklığı 23 ± 1 °C, bağıl nemi $\%85\pm3$ olan nem kabininde 24 saat süre ile kondisyonlanmıştır.

3.4.4 Rötire numuneleri

Boy değişiminin izlenmesi için hazırlanan 40x40x160 mm boyutlu, pimli numuneler, üretimden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve ilk ölçümler (l_0 , mm) yapılmıştır. Numuneler laboratuvar ortamında bekletilmiş, boy değişimi (Δl_i , mm) birer hafta ara ile ölçülmüştür.

3.5 Sertleşmiş Beton Deneyleri

Beton numunelerde 28. , 56. ve 90. günlerde yoğunluk, su emme, buhar difüzyonu, ısı iletimi, basınç, yarma ve ultrases geçiş süresi ölçümleri, birer hafta ara ile boy değişimi ölçümleri yapılmış, bu deneylere ait sonuçların ortalama değerleri Çizelge Ek1’de verilmiştir. Betonda boşluk yapısı optik mikroskop ve cıva porozimetresi ile incelenmiş, sonuçlar Çizelge Ek2’de verilmiştir. Deneyler aşağıda açıklanmıştır.

3.5.1 Yoğunluk deneyi

Sertleşmiş betonda yoğunluk tayini deneyi TS 12390-7'ye uygun olarak suya doymun (SDYK) ve etüv kurusu (EK) durumdaki numunelerde yapılmıştır. Yoğunluk (D , kg/m^3), numunenin tayin edilen kütlesinin (m , kg) hacmine (V , m^3) oranlanması ile hesaplanmıştır.

3.5.2 Su emme deneyi

Sertleşmiş beton numunelerde hacimce su emme oranı ve kapiler su emme belirlenmiş, deneyler aşağıda açıklanmıştır.

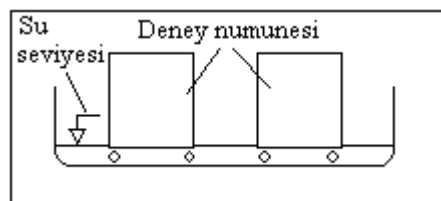
3.5.2.1 Hacimce su emme

Etüvde 105 ± 5 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa kadar kurutulan beton numuneler, desikatörde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (W_0). Bu numuneler suya doymun hale getirilmiş, suya doymuşunun havadaki ağırlığı (W_{SH}) ve suya doymuşunun su içindeki ağırlığı (W_{SS}) belirlenmiştir. Tartımlar, 0,1 g duyarlılıklı 4000 g kapasiteli dijital terazide yapılmış, hacimce (h_s , %) su emme oranı (3.2) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$h_s = \frac{W_{SH} - W_0}{W_{SH} - W_{SS}} * 100 \quad (3.2)$$

3.5.2.2 Kapiler su emme deneyi

Beton numunelerde su emme deneyi TS 4045'e uygun olarak yapılmıştır. Numuneler, etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulduktan sonra desikatörde ortam sıcaklığına kadar soğutulmuş ve kuru tartımları alınmıştır (W_0 , g). Numunelerin su ile temas eden yüzey alanı (F , cm^2), boyutlar kumpas ile ölçülerek belirlenmiş, bu numuneler, içinde 20 ± 3 °C sıcaklıkta su bulunan bir kap içerisine Şekil 3.4'te görüldüğü gibi konulmuş, yüzeylerinden su ile temas ettirilmiş, aynı anda kronometre çalıştırılmıştır. 1/2 saat sonra sudan çıkartılan numunenin ıslanmış yüzeyi kurulama bezi ile kurulandıktan sonra tartılmış, numune, 1/2 saat daha aynı şekilde suda bekletilmiştir.



Şekil 3.4 Kapiler su emme deneyi

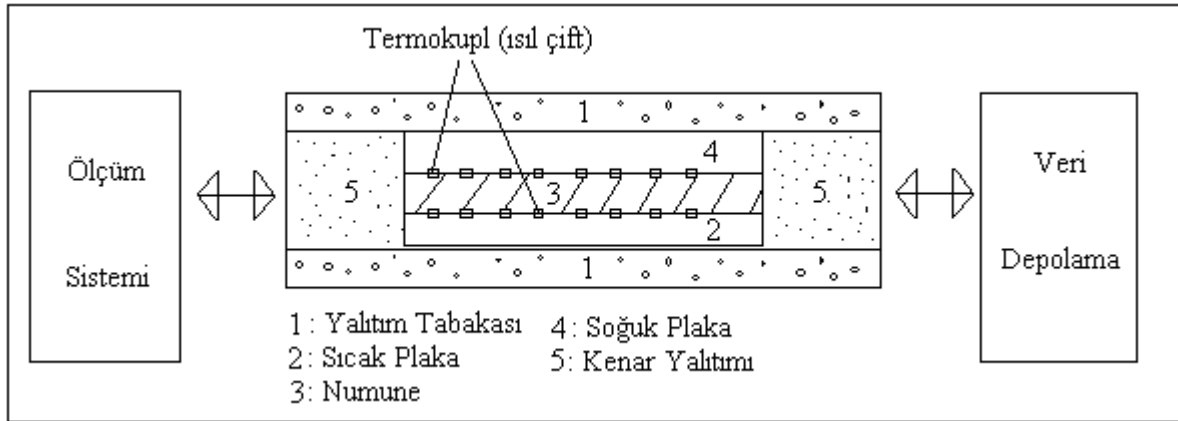
Numune bundan sonra 1'er saat ara ile suda bekletilerek kütle değişimi belirlenmiş; tartımlara, kütle değişimi doğrusallıktan sapıncaya kadar, bu gerçekleşmediği takdirde 24. saate kadar devam edilmiştir. Kapiler su emme, (3.3) bağıntısından hesaplanmıştır.

$$m = \frac{\Delta m}{\Delta \sqrt{t}} \quad (3.3)$$

Bağıntıda; m ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$), kapiler su emme miktarını, Δm (kg/m^2), diyagramın doğrusal olduğu bölgede birim yüzeyden emilen kapiler su nedeniyle kütle artışını, $\Delta \sqrt{t}$ ise diyagramın doğrusal olduğu bölgedeki zaman aralığını ifade etmektedir. Diyagramın doğrusal olmaması durumunda, 24 saat sonunda meydana gelen kütle artışı dikkate alınarak kılcal su emme belirlenmiştir.

3.5.3 Isı iletim katsayısını belirleme deneyi

Isı iletim katsayısının (λ , W/mK) belirlenmesi için TS ISO 8302'ye (2002) uygun olarak Şekil 3.5'te gösterilen tek deney parçalı mahfazalı sıcak plaka cihazından yararlanılmıştır.



Şekil 3.5 Tek deney parçalı mahfazalı sıcak plâka cihazı

Deney, 30x30x4 cm boyutlu prizmatik numunelerde, kararlı hal şartları dikkate alınarak yapılmış, ısı iletim katsayısı (3.4) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

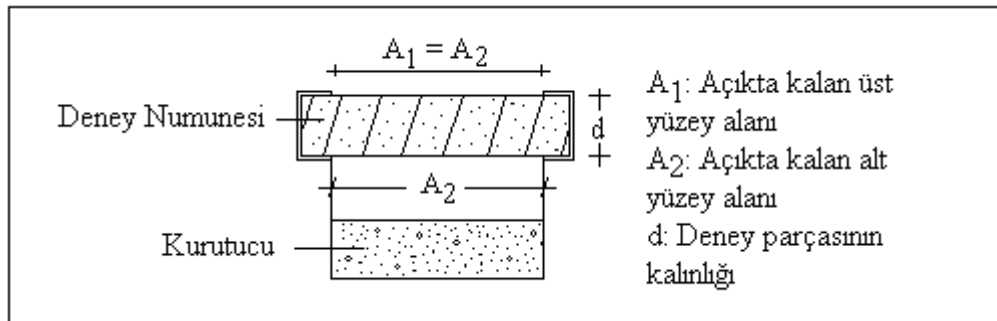
$$\lambda = \frac{Qd}{A(T_1 - T_2)} \quad (3.4)$$

Bu bağıntıda, Q (W), ısıtma ünitesinin ölçme kısmına sağlanan gücü, d (m), deney parçasının ortalama kalınlığını, T_1 (K), deney parçasının sıcak yüzeyinin, T_2 (K), deney parçasının soğuk yüzeyinin ortalama sıcaklığını, A (m^2), deney parçasının ölçme alanını ifade etmektedir.

3.5.4 Buhar difüzyonu deneyi

Su buharı difüzyon direnç faktörü, μ , havanın su buharı özgeçirgenliğinin, malzemenin su buharı özgeçirgenliğine oranı olarak tanımlanır. Bu faktör, aynı zamanda malzemenin su buharı direncinin, aynı sıcaklıkta ve aynı kalınlıktaki durgun bir hava tabakasına nazaran büyüklüğünü ifade etmektedir (TS EN 12086). Su buharı difüzyon direnç faktörünün belirlenmesi için yapılan deneyde, içinde kurutucu bir tuz ihtiva eden deney kabının ağzı deney parçası ile sıkıca kapatılır, deney düzeneği, sıcaklık ve nemi kontrol edilebilen bir deney hücresine yerleştirilir. Deney düzeneği ile deney hücresi arasındaki kısmi su buharı basınç farkından dolayı, su buharı deney parçasından geçmeye başlar. Deney düzeneği, su buharı geçirgenlik hızı kararlı hale gelinceye kadar periyodik olarak tartılır.

Bu çalışmada, buhar difüzyonu deneyi 6 adet $\varnothing 10 \times 4$ cm boyutlu numunede Şekil 3.6'da görüldüğü gibi yapılmıştır. Numuneler, deneyden önce 3.4.3'de açıklandığı gibi kondisyonlandıktan sonra bağıl nemi $\%85 \pm 3$, sıcaklığı 23 ± 3 °C aralığında kalacak şekilde sabit tutulan nem kabininde 24 saat süre muhafaza edilmiş, ölçümlere bundan sonra başlanmıştır.



Şekil 3.6 Buhar geçirimliliği deney düzeneği

Her bir deney parçasının kütleindeki değişme, $G_{1,2}$, mg/h, (3.5) bağıntısı ile hesaplanmış, ardışık beş adet $G_{1,2}$ değerinin ortalaması (G , mg/h) belirlenmiştir. Ardışık son beş $G_{1,2}$ değerinin her birinin ortalamadan bağıl farkı $\pm\%5$ aralığında kalıncaya kadar tartımlara devam edilmiş, G 'nin nihai değeri belirlenmiştir.

$$G_{1,2} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad (3.5)$$

Bağıntıda; t_1 ve t_2 saat cinsinden ardışık tartım zamanlarını, m_1 ve m_2 , deney düzeneğinin t_1 ve t_2 zamandaki miligram cinsinden kütleini ifade etmektedir. Bu işlemin ardından su buharı

geçirgenlik hızı, g ($\text{mg}/\text{m}^2\text{h}$), (3.6) bağıntısı ile, su buharı geçirgenliği, W ($\text{mg}/\text{m}^2\text{hPa}$), (3.7) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$g = \frac{G}{A} \quad (3.6)$$

Bağıntıda; A , deney parçasının açıkta kalan üst ve alt alanlarının m^2 cinsinden aritmetik ortalamasını ifade etmektedir.

$$W = \frac{g}{\Delta P} \quad (3.7)$$

Bağıntıda; ΔP , Paskal cinsinden su buharı basınç farkını ifade etmektedir. Su buharı basınç farkı, bu deneydeki sıcaklık ve bağıl nem şartları için 2390 Pa alınmıştır. Su buharı özgeçirgenliği, (3.8) bağıntısı ile belirlenmiştir.

$$\delta = W.d \quad (3.8)$$

Bağıntıda; d , metre cinsinden deney parçasının kalınlığını ifade etmektedir.

Havanın su buharı özgeçirgenliği, δ_{hava} , Schirmer bağıntısı ile (3.9) hesaplanmış, (3.10) bağıntısı ile su buharı difüzyon direnç faktörü hesaplanmıştır.

$$\delta_{\text{hava}} = \frac{0,083 \times P_0}{R_D \times T \times P} \times \left(\frac{T}{273}\right)^{1,81} \quad (3.9)$$

Bağıntıda; R_D , $462 \times 10^{-6} \text{ Nm}/\text{mgK}$, su buharının gaz sabitesini, T , Kelvin cinsinden deney sıcaklığını, P , hPa cinsinden deney sırasındaki ortalama barometrik basıncı, P_0 ise 1013,25 hPa, normal barometrik basıncı ifade etmektedir.

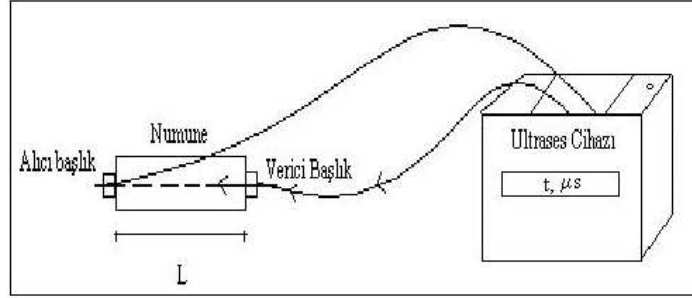
$$\mu = \frac{\delta_{\text{hava}}}{\delta} \quad (3.10)$$

Bağıntıda δ_{hava} , deney sırasındaki ortalama barometrik basınca bağlı olarak havanın su buharı özgeçirgenliğini, δ ise numunenin su buharı özgeçirgenliğini ifade etmektedir.

3.5.5 Ultrases deneyi

Farklı özellikteki beton serilere ait numuneler içindeki boşluk oranının, ultrases geçiş hızı ile ilişkilendirilebilmesi için numunelerin ses geçiş süresi (t , μs), frekansı 55 kHz olan BS 1881 Part 1'e uygun PUNDIT tipi ultrases aleti ile doğrudan ölçüm yöntemi ile ölçülmüştür (Şekil 3.7). Her numunede problemler yer değiştirilerek ölçüm iki kez tekrarlanmış, ses geçiş hızları (V ,

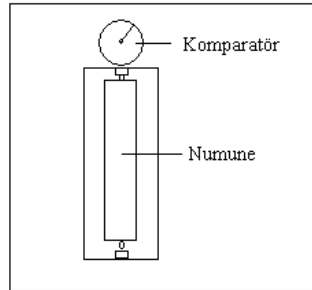
mm/ μ s), numunenin ölçüm yapılan boyunun ses geçiş süresine oranlanması ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.7 Ses geçiş süresinin ölçümü

3.5.6 Boy değişimi ölçümleri

Her seri betondan hazırlanan, 24 saat sonra kalıptan çıkarılan 40x40x160 mm boyutlu pimli numunelerin boyu, başlangıçta (Δl_0 , mm) ve birer hafta aralıklarla (Δl_i , mm) Şekil 3.8’de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Boy değişim oranı, (ϵ_r , mm/mm), boy değişiminin ($\Delta l = \Delta l_i - \Delta l_0$) numunenin ilk boyuna ($L_0 = 160$ mm) oranlanması ile hesaplanmıştır (TS 3234, 1978).



Şekil 3.8 Boy değişimi ölçümleri

3.5.7 Basınç deneyi

Basınç deneyi, hafif agregalı betonun sınıf dayanımının ve elastisite modülünün belirlenmesi, basınç dayanımının zamanla değişiminin gözlenmesi amacı ile yapılmıştır.

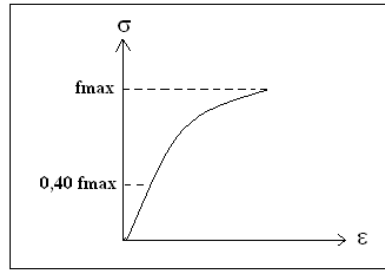
Sınıf dayanımının belirlenmesi amacı ile her seride üç adet 15cm boyutlu küp numunede TS EN 12390-3’a uygun olarak tek eksenli basınç deneyi yapılmış, beton sınıfı TS EN 206-1’e göre belirlenmiştir.

Basınç dayanımının zamana bağlı değişiminin belirlenmesi amacı ile 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28, 56 ve 90. günlerde TS EN 12390-3’a uygun olarak basınç deneyi yapılmış,

kırma yükü (F , N) belirlenmiştir. Basınç dayanımı, f_c (MPa), kırma yükünün basınç yükünün uygulandığı kesit alanına (A , mm²) oranlanması ile hesaplanmıştır. Bu deneyde, boy değişimi LVDT ile yük ise loadcell yardımı ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

3.5.7.1 Elastisite modülü

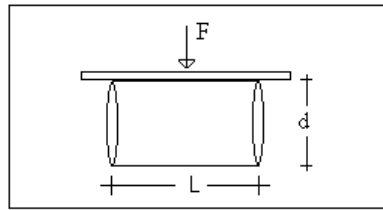
Elastisite modülünün belirlenmesi amacı ile basınç deneyinde ölçülen ve kaydedilen boy değişimi, yük değerlerinden Şekil 3.9’da görüldüğü gibi gerilme–şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisi çizilmiştir. Bu ilişkide $0,40f_{max}$ değerine kadar olan bölge lineer kabul edilmiş, her bir seri için elastisite modülü (E , MPa) lineer bölgenin eğiminden belirlenmiştir (ASTM C 469, 2006).



Şekil 3.9 Gerilme – Şekil değiştirme grafiği

3.5.8 Yarma deneyi

Betonların yarmada çekme dayanımının belirlenmesi amacı ile üretilen 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28., 56. ve 90. günlerde TS EN 12390-6’ya uygun olarak Şekil 3.10’da görüldüğü gibi yarma deneyi yapılmıştır.



Şekil 3.10 Yarma deneyi

Deneyde, yarma aparatının içine yerleştirilen numuneler, 0.80 kN/sn’lik yükleme hızı ile yüklenmiş, kırma yükü (F , N) belirlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı, f_{ct} (MPa), (3.11) bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$f_{ct} = \frac{2xF}{\pi L d} \quad (3.11)$$

Bu bağıntıda, f_{ct} , yarmada çekme dayanımını (MPa), F , kırma yükünü (N), L , numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğunu (mm), d ise numunenin en kesit boyutunu (mm) ifade etmektedir.

3.5.9 Boşluk yapısının incelenmesi

Hafif betonun boşluk yapısı optik mikroskop ölçümü ve cıva porozimetresi deneyi ile araştırılmış, boşluk dağılımı, boşluk boyutu ve porozite ($\%p_{om}$ ve $\%p_{Hg}$) belirlenmiş, toplam porozite ($\%p_t$) optik mikroskop ve cıva porozimetresinden elde edilen porozitelerin toplamı ile hesaplanmış, deneyler aşağıda açıklanmıştır.

3.5.9.1 Optik mikroskop incelemesi

Optik mikroskop ile porozitenin belirlenmesi amacı ile üretilen betonlardan kesilen parçaların yüzeyleri taşlanıp parlatılarak incelemeye uygun, pürüzsüz yüzey oluşturulmuştur. Numunelerin yüzeyinde 6mm aralık ile birbirine paralel ölçüm doğruları çizilmiş, optik mikroskop ile bu çizgiler boyunca 60X büyütme altında tarama yapılmış, ölçüm doğrularının kestiği hava boşluğu sayısı ve hava boşluklarına karşılık gelen giriş uzunlukları kaydedilmiştir. Kaydedilen giriş uzunlukları 0–4000 μm aralığında 28 farklı sınıfa ayrılmış, her sınıfta boşluk çapı en büyük giriş uzunluğuna karşılık gelen çap olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan ortalama boşluk çapı (D_m , μm) hesaplanmış, boşlukların küre olduğu kabul edilerek porozite (p_{om} , %) TS EN 480–11’e uygun olarak belirlenmiş, sonuçlar Çizelge Ek3’te verilmiştir.

3.5.9.2 Cıva porozimetresi incelemesi

Optik mikroskop incelemesi ve boşluk boyutu ölçümü yapılan numunelerde daha sonra Quantachrome Poremaster model cıva porozimetresi cihazı ile deney yapılmıştır. Bu deneyde cıvanın yüzey gerilimi 480 N/m, temas açısı $141,3^\circ$ alınmış, incelenen numunelerde porozite (p_{Hg} , %) belirlenmiş, ortalama boşluk yarıçapı (r_m , nm) (3.12) bağıntısı ile hesaplanmış, sonuçlar Çizelge EK3’te verilmiştir.

$$\ln r_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \ln r_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (3.12)$$

Bağıntıda r (nm), boşluk yarıçapını V_i , i ’nci boşluk yarıçapına karşılık gelen cıva hacim artışını ifade etmektedir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

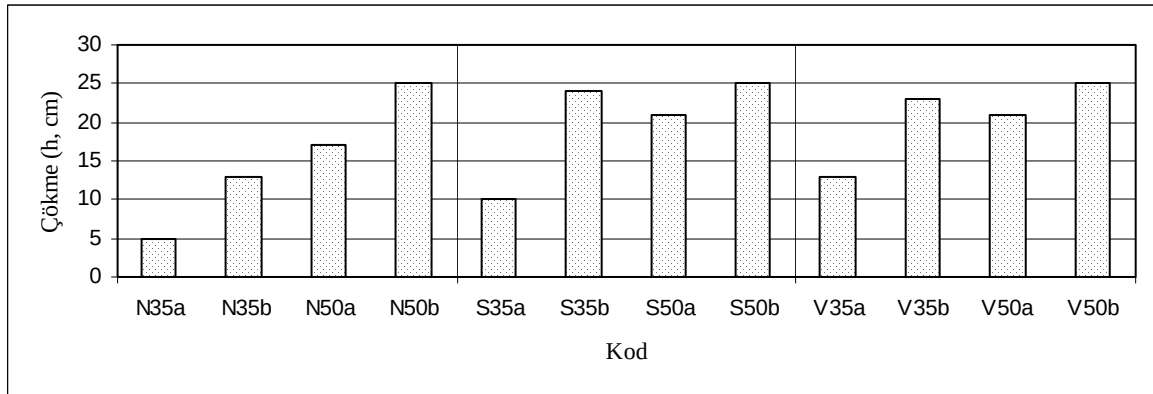
Bu bölümde, toplam 12 farklı seride yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, taze ve sertleşmiş beton özellikleri için değerlendirilmiştir.

4.1 Taze Beton Özellikleri

Taze betonda her seride işlenebilirlik ve yoğunluk belirlenmiş, deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiş, ortalama değerler Çizelge Ek1’de ve Şekil 4.1–4.3’te verilmiştir.

4.1.1 Çökme (Slump)

Taze betonda işlenebilmenin belirlenmesi amacı ile her seri üretimde TS EN 12350-2’ye uygun olarak yapılan çökme deneyi sonuçlarına göre farklı karışımlardaki betonların çökme sınıfları S2-S5 aralığında çıkmıştır.



Şekil 4.1 Taze betonun çökmesi

Taze beton serilerinin çökmesi, çimento dozajından, ponza agregalarının doygunluğundan ve hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmasından etkilenmiş, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi çökme, agrega doygunluğunun ve dozajın artması ve hava sürükleyici katılması ile artmıştır.

Laboratuar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz (N35a) taze betonun çökmesi 5 cm iken suya doygun ponza agregalı (S35a) ve vakum ile suya doyurulan ponza agregalı (V35a) taze betonun çökmesi sırası ile 10 cm ve 13 cm olarak ölçülmüş, agrega doygunluğunun artması ile agrega ve beton yoğunluğu artmış (Şekil 4.3), buna bağlı olarak taze betonun çökmesi de artmıştır.

Karışımlardaki çimento dozajının artması betonun kohezyonunu ve yoğunluğunu arttırmış,

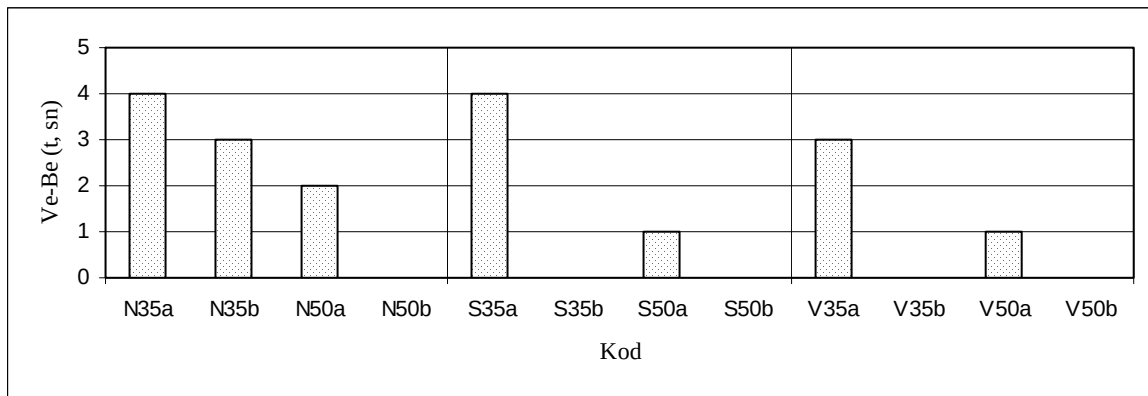
dolayısı ile homojen özellikteki taze betonun çökmesini arttırmış, örneğin, 500 dozlu betonlarda çökme; N50a'da 17 cm, S50a ve V50a'da 21 cm olarak ölçülmüştür.

Taze betona hava sürükleyici katılması beklenildiği gibi işlenebilirliği, dolayısı ile çökmeyi arttırmıştır. Bu artış N35 serisinde %160, S35'te %140, V35'te %77 olarak gözlenmiştir. 500 dozlu serilerde hava sürükleyici katılması ile çökmede meydana gelen artış N50'de %47, S50'de ve V50'de %19 olarak belirlenmiştir. Hava sürükleyici katkı, işlenebilirliği düşük olan 350 dozlu betonların çökmesini daha fazla arttırmıştır. Çökme değeri en yüksek 500 dozlu, hava sürükleyicili serilerde (N50b, S50b, V50b) 25 cm olarak belirlenmiştir. Hava sürükleyici katılmayan serilerin çökmesi 5-21 cm arasında iken hava sürükleyicili serilerin çökmesi 13-25 cm arasında değerler almıştır.

4.1.2 Ve-Be süresi

Taze betonda işlenebilirliğin belirlenmesi amacı ile her seri üretimde TS EN 12350-3'e uygun olarak Ve-Be deneyi yapılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi taze betonun Ve-Be süresine, farklı doygunlukta ponza agregası kullanımının, 350 dozlu, hava sürükleyici katılmamış (N35a, S35a, V35a) serilerde etkisi belirgin olmamıştır. Bunlardan laboratuvar nemliliğinde (N), suya doygun (S) ve vakum ile suya doyurulan ponza agregalı (V) taze betonların Ve-Be süresi; sırası ile 4 sn, 4 sn ve 3 sn, 500 dozlu betonları ise 2 sn, 1 sn ve 1 sn olarak ölçülmüştür. Hava sürükleyici katılan (b) ve ponza agregalarının vakum ile suya doyurulduğu (V) betonlarda Ve-Be süresi her iki dozajda da en düşük değerleri almıştır.



Şekil 4.2 Taze betonun Ve-Be süresi

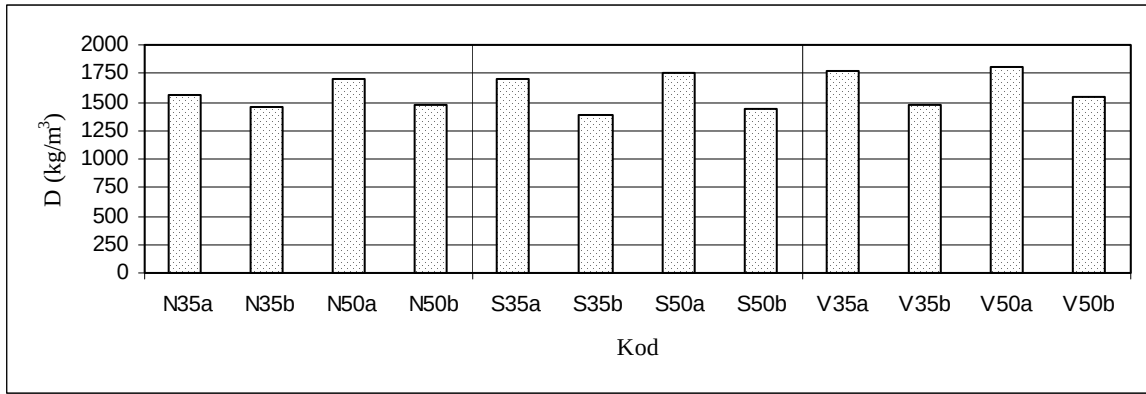
Hava sürükleyici katılmayan (a) serilerde Ve-Be süresi, çimento dozajının artması ile azalmış,

örneğin 350 dozlu serilerde 4 ve 3 sn olarak ölçülen Ve-Be süresi, 500 dozlu betonlarda 1–2 sn aralığında ölçülmüştür.

Yukarıda açıklanmaya çalışıldığı gibi hava sürükleyici katkı ilavesi işlenebilirliği arttırmış, dolayısı ile taze betonun Ve-Be süresini azaltmıştır. Bu süre, hava sürükleyicisiz betonlarda 1–4 sn aralığında iken hava sürükleyicilerinkine, N35b serisinde 3 sn, diğer serilerde (N50b, S35b, S50b, V35b ve V50b) sıfır saniye olarak ölçülmüştür.

4.1.3 Yoğunluk

Taze betonda yoğunluk TS EN 12350-6'ya uygun olarak belirlenmiş, sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi taze beton yoğunluğu, beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğu ve çimento dozajı arttıkça artmış, hava sürükleyici katılması ile beklendiği gibi azalmıştır.



Şekil 4.3 Taze betonun yoğunluğu

Ponza agregalarının laboratuvar nemliliğinde olduğu 350 dozlu (N35a) seride; taze betonun yoğunluğu, 1570 kg/m^3 iken suya doygun (S35a) ve vakum ile suya doyurulan ponza agregalı (V35a) taze betonların yoğunluğu sırası ile 1705 ve 1765 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

Dozajın artması ile taze beton yoğunluğu tüm serilerde bir miktar artmıştır; örneğin, 500 dozlu serilerde, ponza agregalarının laboratuvar nemliliğinde olduğu (N) betonların yoğunluğu 1700 kg/m^3 , suya doygun ponza agregalı (S) betonlarınkine 1755 kg/m^3 , ponza agregalarının vakum ile suya doyurulduğu (V) betonlarda ise 1805 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. Agreganın nemliliğinin ve çimento dozajının artması ile işlenebilirlik arttığından betonun yerleşmesi kolaylaşmış, dolayısı ile yoğunluk artmıştır.

Beton üretiminde karışıma hava sürükleyici katkı maddesi katılması ilave boşluklar

oluşturmuş ve beklendiği gibi taze betonun yoğunluğunu azaltmıştır. Hava sürükleyici katkı maddesi katılmış serilerde, 350 dozlu betonların yoğunluğu; laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda 1455 kg/m^3 , suya doymuş ponza agregalı (S) betonlarda 1380 kg/m^3 , vakum ile suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda ise 1475 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Çimento dozajı 500 kg/m^3 olan betonlarda ise taze beton yoğunluğu, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda 1465 kg/m^3 , suya doymuş ponza agregalı betonlarda 1440 kg/m^3 , vakum ile suya doyurulan ponza agregalı betonlarda ise 1540 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

Beton üretiminde %0.3 oranında hava sürükleyici katılması, taze beton yoğunluğunda N35 serisinde %7, N50'de %14, S35'te %19, S50'de %18, V35'te %16, V50'de %15 oranında azalmaya neden olmuştur. Hava sürükleyicinin en belirgin etkisi suya doymuş ponza agregalı serilerde (S, V) görülmüş, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı, 350 dozlu (N35) seride ise hava sürükleyicinin taze beton yoğunluğuna etkisi %7 ile en düşük değeri almıştır.

4.2 Sertleşmiş Beton Özellikleri

Sertleşmiş beton özellikleri 28, 56 ve 90. günlerde yapılan mekanik ve fiziksel deneyler ile belirlenmiş, değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

4.2.1 Boşluk parametreleri

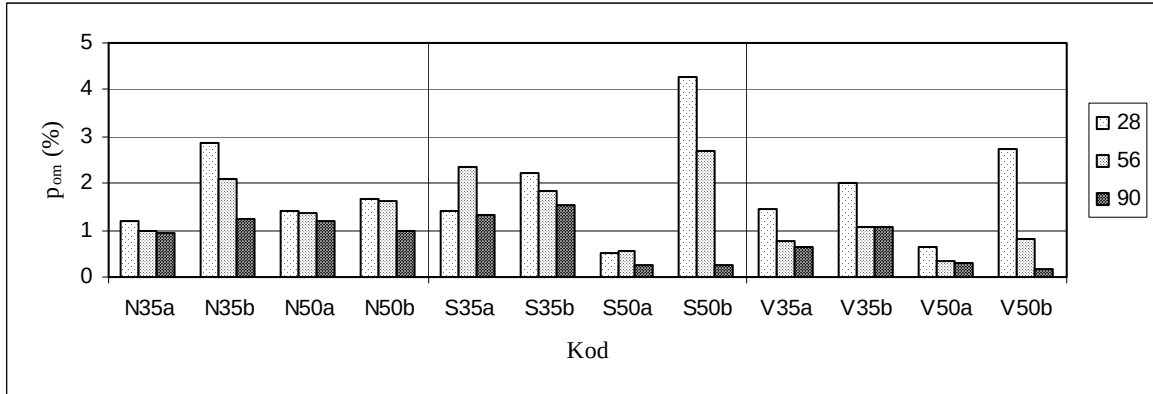
Hafif betonda boşluk yapısının mekanik ve fiziksel özelliklerle ilişkisini belirlemek amacı ile betonların boşluk yapısı optik mikroskop ölçümü ve cıva porozimetresi deneyi ile araştırılmıştır. Bu deney ve ölçümler sonucunda boşluk boyutu ve porozite ($\%p_{om}$ ve $\%p_{Hg}$) belirlenmiş, toplam porozite ($\%p_t$) optik mikroskop ve cıva porozimetresinden elde edilen porozitelerin toplamı ile hesaplanmış, bu parametrelerin mekanik ve fiziksel özellikler ile ilişkisi aşağıda verilmiştir.

4.2.1.1 Porozite

Sertleşmiş betonda porozite, optik mikroskop ölçümü ile ve cıva porozimetresi deneyi ile belirlenmiştir. Optik mikroskop ile ölçülebilen boşlukların çapı yaklaşık 200 ile 1250 μm arasında çıkmış, bu çaplara bağlı olarak betonlardaki porozite (p_{om} , %) %0,19 ile %4,26 arasında değişmiştir (Şekil 4.4). Cıva porozimetresi ile ölçülebilen boşluk çapı ise yaklaşık 70 ile 350 nm arasında değişmiş, bu çaplara bağlı olarak betonlardaki porozite (p_{Hg} , %) %25 ile %45 arasında değişmiştir (Şekil 4.5).

Optik mikroskop ölçümlerinden ve cıva porozimetresi deneyinden elde edilen porozitelerin

toplamı toplam porozite (p_t , %) olarak adlandırılmış, mekanik ve fiziksel özellikler toplam porozitenin fonksiyonu olarak incelenmiş, sonuçlar aşağıda verilmiştir.

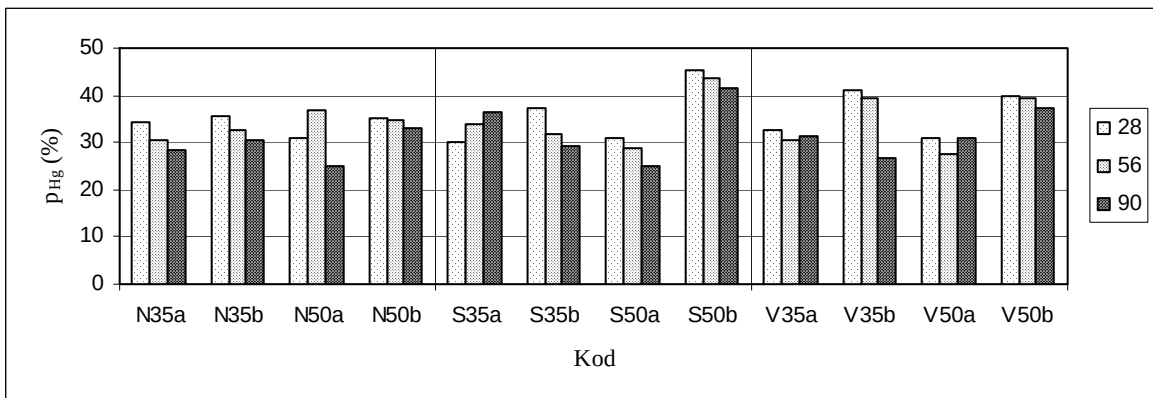


Şekil 4.4 Optik mikroskop ile belirlenen porozitenin zamana bağlı değişimi

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi optik mikroskop ölçümü ile belirlenen porozite bütün serilerde kür süresinin artması ile azalmış, bu azalma özellikle hava sürükleyicili (b), 500 dozlu, suya doygun (S) ve vakum ile suya doyurulan (V) ponza agregalı betonlarında daha belirgin olmuştur.

Hava sürükleyici ilavesi beklendiği gibi bütün serilerde poroziteyi arttırmış, çimento dozajının artması ile laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlar hariç diğer serilerin boşluk oranları azalmıştır.

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile porozite 500 dozlu betonlarda azalmış, 350 dozlu betonlarda ise kararlı bir değişim gözlenmemiştir.



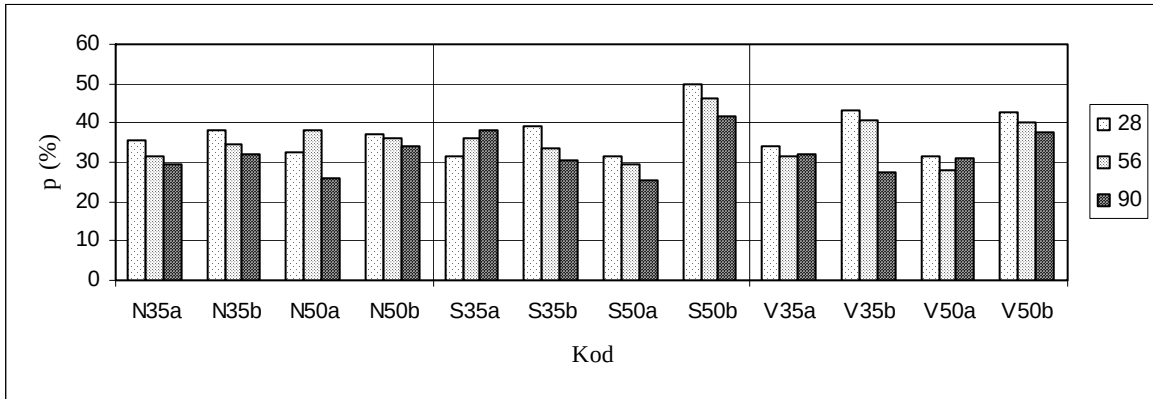
Şekil 4.5 Cıva porozimetresi ile belirlenen porozitenin zamana bağlı değişimi

Beton numunelerde cıva porozimetresi deneyi ile belirlenen porozitenin (p_{Hg} , %) ortalama

değerleri Şekil 4.5'te, Şekil Ek15'te ve Çizelge Ek3'te verilmiştir.

Bu sonuçlara göre S35a ve N50a dışındaki betonlarda porozitenin zamanla azaldığı, bu azalmanın laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda %6-%19, suya doygun ponza agregalı (S) betonlarda %9-%19, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda ise %7-%35 oranında olduğu görülmüştür. Çimento dozajındaki artışın ve agrega doygunluğunun poroziteye belirgin bir etkisi olmamıştır.

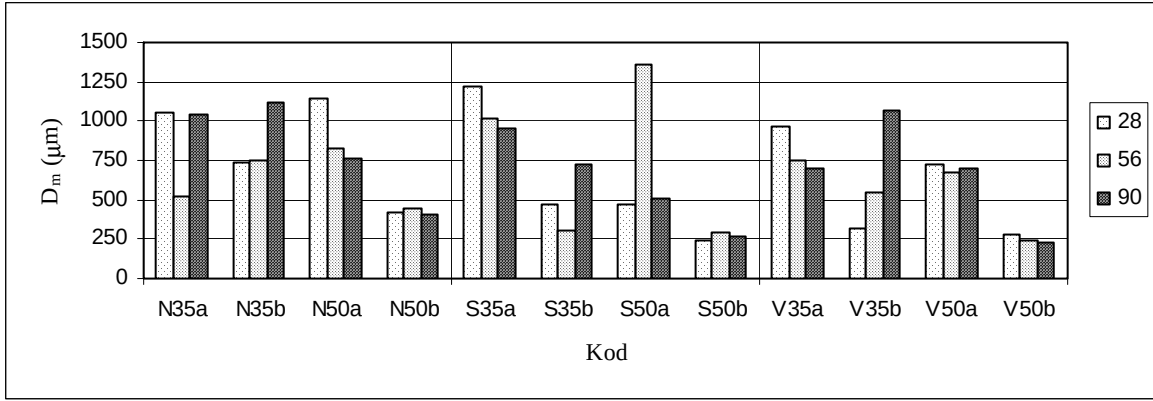
Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi hemen hemen bütün serilerde poroziteyi arttırmış, 350 dozlu betonlardaki ortalama artış, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N35) betonlarda %5, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V35) betonlarda %13 olmuş, suya doygun ponza agregalı (S35) betonlarda belirgin bir artış gözlenmemiştir. 500 dozlu betonlardaki ortalama artış ise, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N50) betonlarda %11, suya doygun ponza agregalı (S50) betonlarda %54, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V50) betonlarda ise %22 oranında olmuştur.



Şekil 4.6 Toplam porozitenin zamana bağlı değişimi

4.2.1.2 Ortalama boşluk boyutu

Sertleşmiş beton numunelerde ortalama boşluk boyutu, optik mikroskop ile yapılan ölçümlerden ve cıva porozimetresi deneyi sonuçlarından hesaplanmış, sonuçlar Çizelge Ek3'te, ortalama boşluk boyutunun zamana bağlı değişimi Şekil 4.7-4.8'de verilmiştir.

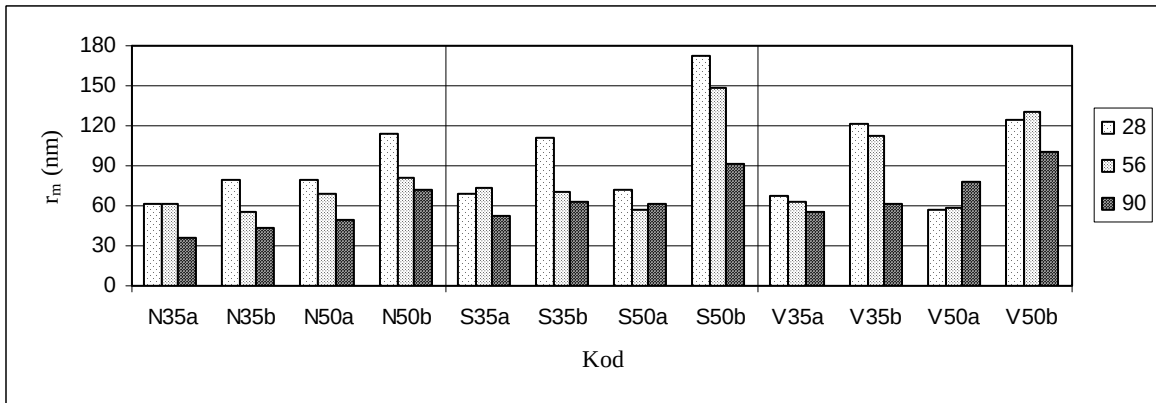


Şekil 4.7 Ortalama boşluk boyutunun (D_m) zamana bağlı değişimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi kür süresinin ve çimento dozajındaki artışın ortalama boşluk çapına belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

Hava sürükleyici katılması hemen hemen bütün serilerde ortalama boşluk çapını azaltmış, en belirgin etki suya doymuş ponza agregalı (S, V) serilerde görülmüştür.

Ortalama boşluk yarıçapı (r_m , nm) cıva porozimetresi deneyinden elde edilen sonuçlar kullanılarak (3.12) bağıntısı ile hesaplanmış, sonuçlar Çizelge Ek3’te ve Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Ortalama boşluk yarıçapının (r_m) zamana bağlı değişimi

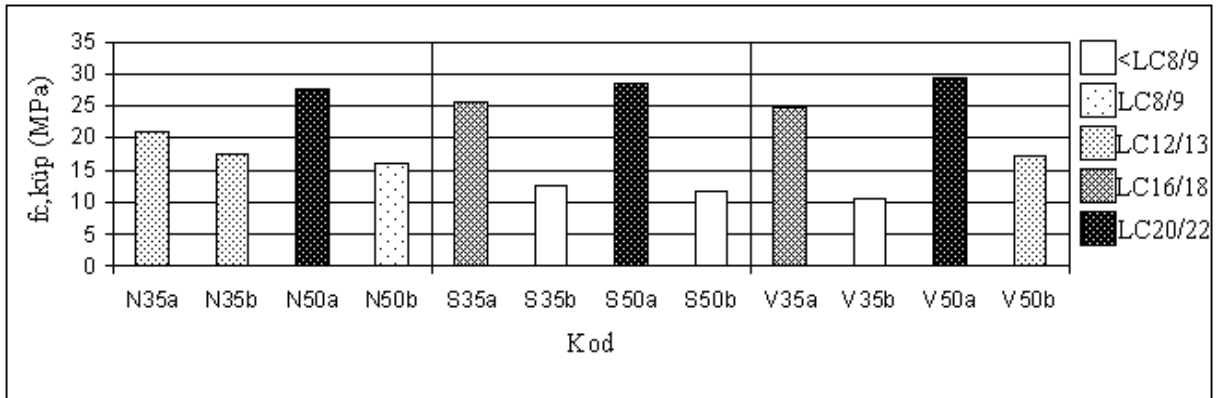
Bu sonuçlara göre ortalama boşluk yarıçapının hemen hemen bütün serilerde zamanla azaldığı, bu azalmanın laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda %1-%43, suya doymuş ponza agregalı (S) betonlarda %14-%24, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda ise %7-%17 oranında olduğu görülmüştür. Çimento dozajındaki artışın ve agrega

doğunluğunun ortalama boşluk yarıçapına belirgin bir etkisi olmamıştır.

Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi bütün serilerde ortalama boşluk yarıçapını arttırmış, 28. gündeki değerler dikkate alındığında; 350 dozlu betonlardaki ortalama artış, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N35) betonlarda %29, suya doymun ponza agregalı (S35) betonlarda %63, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V35) betonlarda %82 olmuştur. 500 dozlu betonlardaki ortalama artış ise, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N50) betonlarda %43, suya doymun ponza agregalı (S50) betonlarda %141, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V50) betonlarda ise %115 oranında olmuştur.

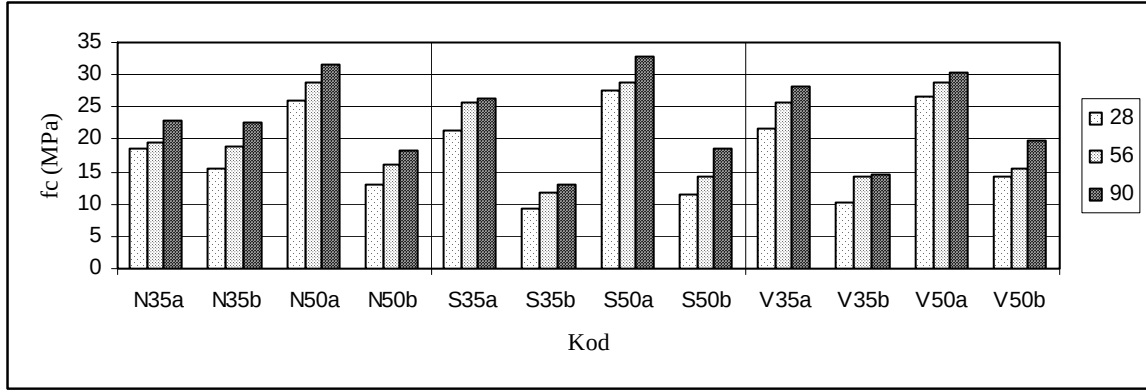
4.2.2 Basınç dayanımı

Hafif agregalı beton serilerin sınıf dayanımı, 15cm boyutlu küp numunelerde yapılan basınç deneyinden, TS EN 206-1'e göre belirlenmiş, S35b, S50b ve V35b dışındaki seriler ile beton sınıfı LC 8/9 ile LC20/22 aralığında olan hafif betonlar üretilmiş, sonuçlar Çizelge Ek2'de ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına ve yapılan irdlemeye göre N50b betonunun LC8/9 sınıfını, N35a, N35b ve V50b betonlarının LC12/13'ü, S35a ve V35a betonlarının LC16/18'i, N50a, S50a ve V50a betonlarının ise LC20/22 sınıfını sağladığı görülmüştür. S35b, S50b ve V35b betonlarının kalitesi LC8/9'un altında kalmıştır.



Şekil 4.9 Küp numunelerin ortalama basınç dayanımı

Basınç dayanımının zamana bağlı değişiminin araştırılması ve elastisite modülünün belirlenmesi amacı ile 10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28, 56 ve 90. günlerde TS EN 12390-3'a uygun olarak yapılan basınç deneyinde; 28 günlük silindir basınç dayanımları 9,4 MPa ile 27,6 MPa arasında değerler almış, basınç dayanımı bütün serilerde zamanla artış göstermiş, 90. gündeki artış 350 dozlu betonlarda %23 ile %31, 500 dozlu betonlarda %14 ile %22 oranında olmuştur (Şekil 4.9 ve Şekil Ek1).



Şekil 4.10 Tüm serilerde basınç dayanımının zamana bağlı değişimi

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının suya doygunluğunun artması taze betonda işlenebilmeyi arttırmış ve betonun daha iyi yerleşmesini sağladığı için, Lo, vd.'nin de (1999, 2004) belirttiği ve Şekil 4.10 ve Şekil Ek2'de görüldüğü gibi basınç dayanımını arttırmıştır. Artış oranı, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlara göre, 350 dozlu serilerde 28. günde %16 ile %17; 56. günde %32, 90. günde %16 ile %24 oranında olmuş, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonların basınç dayanımı en yüksek değeri almıştır. 500 dozlu betonlarda ise agrega doygunluğuna bağlı olarak basınç dayanımındaki artış, 28. günde %2 ile %6 oranında olmuş, 56 ve 90. günlerde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir.

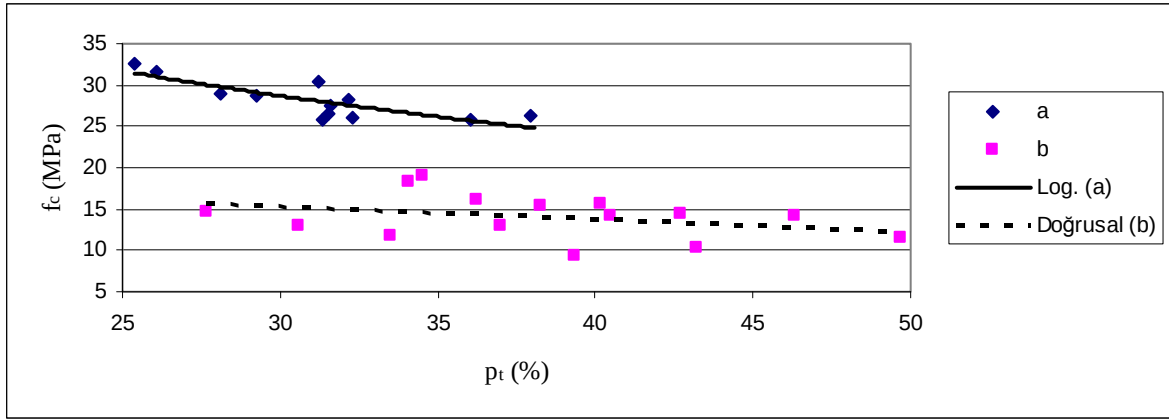
Çimento dozajındaki artış, Lamond ve Pielert (2006), Şahin, vd. (2003) ve Gündüz'ün de (2007) belirttiği gibi bütün serilerde betonun basınç dayanımının artmasını sağlamıştır (Şekil 4.10). 500 dozlu serilerin basınç dayanımının, 350 dozlu serilere göre laboratuvar nemliliğindeki agregalı betonlarda (N) 28. günde %41, 56. günde %48, 90. günde %39; suya doygun agregalı serilerde (S) 28. günde %28, 56. günde %11, 90. günde %24; vakumla suya doyurulan agregalı serilerde (V) 28. günde %23, 56. günde %12, 90. günde %8 daha yüksek olduğu görülmüştür. Beton numuneler suda kür edildiği için agregaların suya doyurulmasının dayanıma etkisi açıkça görülememiştir. Numunelerin havada kür edilmesi durumunda agreganın suya doyurulmuş olması içten kür sağlayacağı için dayanıma etkisi daha belirgin olacaktır (Akçay ve Taşdemir, 2008).

Taze betona hava sürükleyici katkı maddesi ilave edilmesi betonda ilave boşluk oluşturmaları nedeni ile beklendiği gibi basınç dayanımını düşürmüştür. Hava sürükleyicinin etkisi ile 350 dozlu betonlarda basınç dayanımındaki azalma, kür süresine bağlı olarak agregaların laboratuvar nemliliğinde olduğu betonlarda (N35), 28. günde %17, 56. günde %3, 90. günde %1; suya doygun agregalı betonlarda (S35), 28. günde %56, 56. günde %54, 90. günde %51;

vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V35) ise 28. günde %52, 56. günde %45, 90. günde %48 olmuştur. Agregaların laboratuvar nemliliğinde olduğu betonlarda hava sürükleyicinin etkisi daha az olmuş, agrega boşluklarının doygun durumda olmaması nedeni ile katkının bir kısmı agregalar tarafından emilmiştir. 500 dozlu betonlarda ise basınç dayanımındaki azalma, kür süresine bağlı olarak laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N50), 28. günde %50, 56. günde %44, 90. günde %42; suya doygun ponza agregalı betonlarda (S50), 28. günde %58, 56. günde %51, 90. günde %43; vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V50), 28. ve 56. günlerde %46, 90. günde %35 olmuştur. Şekil Ek1’de görüldüğü gibi hava sürükleyicinin etkisi, ponza agregalarının suya doyurulması ile ve dozajın artması ile artmış, basınç dayanımındaki azalma, 500 dozlu ve suya doygun ponza agregalı (S50) betonda % 58 değeri ile daha belirgin olmuştur.

4.2.2.1 Basınç dayanımı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

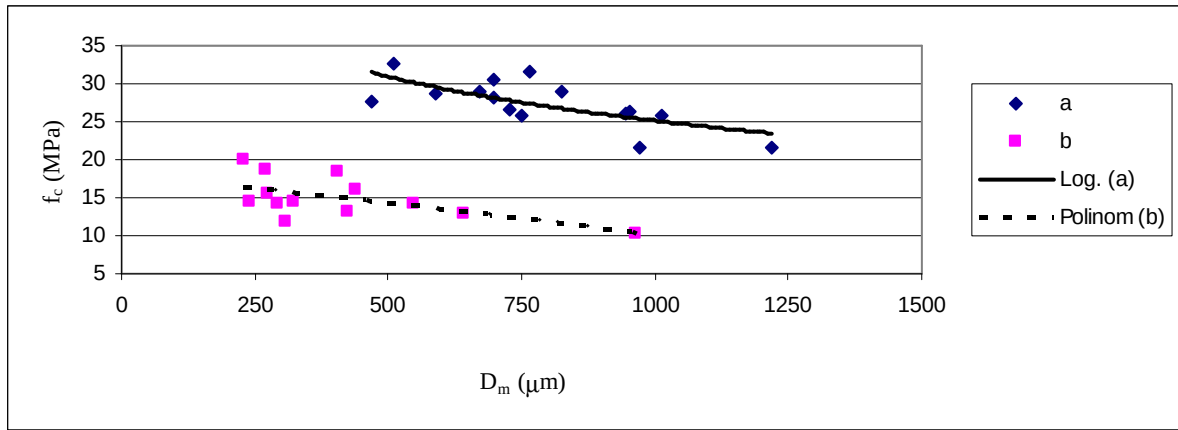
Basınç dayanımının toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.11’de verilmiştir. Basınç dayanımının 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.12’de, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.13’te verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.



Şekil 4.11 Toplam porozite - basınç dayanımı ($\%p_t-f_c$) ilişkisi

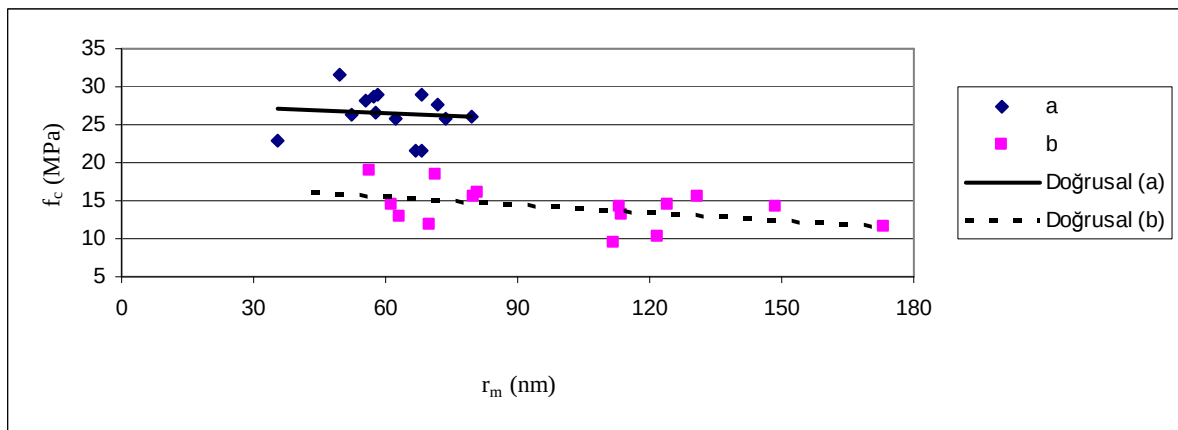
Optik mikroskop ve cıva porozimetresinden elde edilen porozitelerin toplamı (p_t , %) hava sürükleyicisiz betonlarda %25 ile %40 arasında, hava sürükleyicililerde ise %30 ile %50 arasında değişmiştir. Hava sürükleyicisiz betonlarda toplam porozitenin yaklaşık %50’lik artışı basınç dayanımında %20’lik azalmaya neden olmuştur. Hava sürükleyici katılması toplam poroziteyi katılmayan serilere göre ortalama %20 arttırmış, basınç dayanımında

yaklaşık %45’lik bir azalmaya neden olmuştur (Şekil 4.11).



Şekil 4.12 Ortalama boşluk çapı - basınç dayanımı (D_m-f_c) ilişkisi

Optik mikroskop ölçümlerinden belirlenen ortalama boşluk çapı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.12’de verilmiştir. Buna göre hava sürükleyicisiz betonlardaki boşluk çapı 500 ile 1250 μm , hava sürükleyicili betonlarda ise 250 ile 1000 μm arasında değişmektedir. Hava sürükleyici katılması betonda daha yüksek oranda ancak daha küçük boyutlu boşluklar oluşturmuştur. Hava sürükleyicisiz betonlarda boşluklar 750 μm civarında yoğunlaşmış iken hava sürükleyicili betonlarda yoğunlaşma 250-500 μm etrafında olmuştur. Hava sürükleyici katılan ve katılmayan beton serilerde ortalama boşluk çapı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Bu azalma, hava sürükleyicisiz betonlarda yaklaşık %25, hava sürükleyicililerde %40’tır.



Şekil 4.13 Ortalama boşluk yarıçapı - basınç dayanımı ilişkisi (r_m-f_c)

Cıva porozimetresi deney sonuçlarından belirlenen ortalama boşluk yarıçapı ile basınç

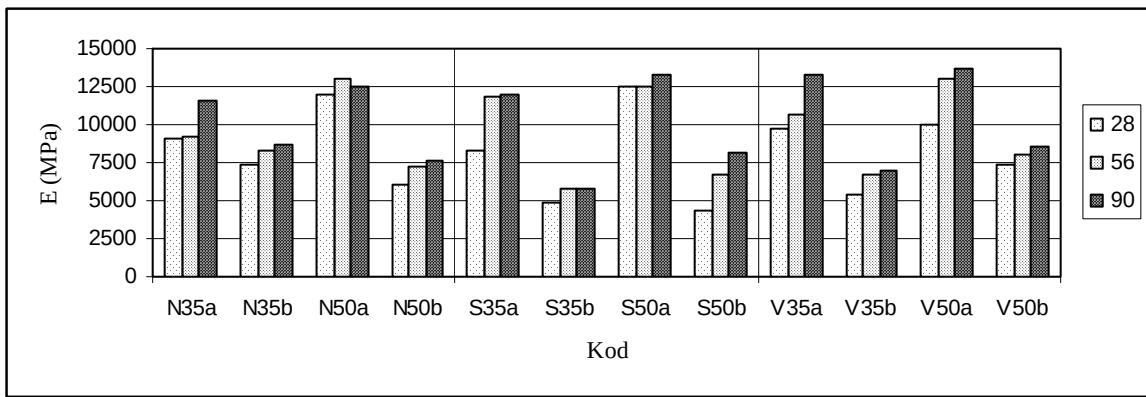
dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.13'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi hava sürükleyicisiz betonların ortalama boşluk yarıçapı 35-90 nm arasında, hava sürükleyicili betonların ortalama boşluk yarıçapı ise 50-180 nm arasında değişmiştir. Burada incelenen boşluklar çoklukla çimento hamurundaki boşluklardır ve optik mikroskop ile ölçülen boşluk boyutlarına göre daha küçük boyutlu ve daha belirgindir.

Ortalama boşluk yarıçapının hava sürükleyicisiz betonların basınç dayanımına belirgin bir etkisi olmamış, ortalama boşluk yarıçapı arttıkça dayanımda ortalama %5'lik bir azalma meydana gelmiştir. Buradan nm boyutundaki küçük boşlukların basınç dayanımına etkisinin önemsiz olduğu sonucuna varılabilir. Hava sürükleyicili betonlarda belirlenen ortalama boşluk yarıçapı daha büyük değerler almış, boşluk yarıçapı arttıkça dayanımda ortalama %25'e varan bir azalma gözlenmiştir.

4.2.3 Elastisite modülü

Silindir numunelerde 28., 56. ve 90. günlerde yapılan basınç deneyinde boy değişimi LVDT ile, yük ise loadcell ile ölçülmüş ve kaydedilmiş, gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisi çizilmiş, elastisite modülü (E, MPa) Bölüm 3.5.7.1'de anlatıldığı gibi ASTM C 469'a uygun olarak belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre Şekil 4.14'te görüldüğü gibi elastisite modülü bütün serilerde zamanla artış göstermiş, kür süresinin artması ile 350 dozlu hava sürükleyicisiz betonların elastisite modülü %28 ile %45 arasında, 500 dozlu betonların elastisite modülü %5 ile %37 arasında artmıştır (Şekil Ek5).



Şekil 4.14 Elastisite modülünün zamana bağlı değişimi

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile Şekil Ek6'da da görüldüğü gibi elastisite modülündeki artış 350 dozlu hava sürükleyicisiz betonlarda 28.

günde %8; 56. günde %16 ile %29, 90. günde %3 ile %15 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlarda ise agrega doygunluğuna bağlı olarak elastisite modülündeki artış 28. günde %5, 90. günde %5 ile %9 oranında olmuş, 56. günde ise belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir.

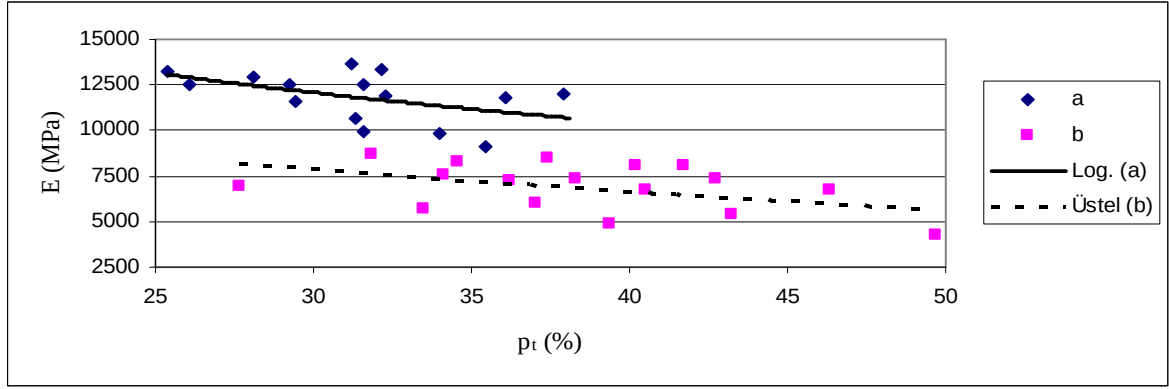
Çimento dozajındaki artış, Şahin, vd. (2003)'nin de belirttiği gibi basınç dayanımında olduğu gibi bütün serilerde betonun elastisite modülünün artmasını sağlamış, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) hava sürükleyicisiz (a) betonlarda bu artış 28. günde %31, 56. günde %42, 90. günde %8; suya doygun ponza agregalı (S) serilerde 28. günde %52, 56. günde %6, 90. günde %11; vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) serilerde 28. günde %2, 56. günde %22, 90. günde %3 olmuştur.

Hava sürükleyici katkı ilavesi diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi elastisite modülünü düşürmüş, bu düşüş suya doygun ponza agregalı (S) ve vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) serilerde daha belirgin olmuştur. Elastisite modülündeki azalma 350 dozlu, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N35), 28. günde %19, 56. günde %9, 90. günde %25; suya doygun ponza agregalı betonlarda (S35), 28. günde %40, 56. günde %51, 90. günde %51; vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V35), 28. günde %45, 56. günde %37, 90. günde %48 olmuştur. 500 dozlu betonlardaki azalma, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N50) serilerde, 28. günde %50, 56. günde %44, 90. günde %40; suya doygun ponza agregalı (S50) serilerde, 28. günde %66, 56. günde %46, 90. günde %39; vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V50) serilerde, 28. günde %27, 56. günde %38, 90. günde %38 oranında olmuştur.

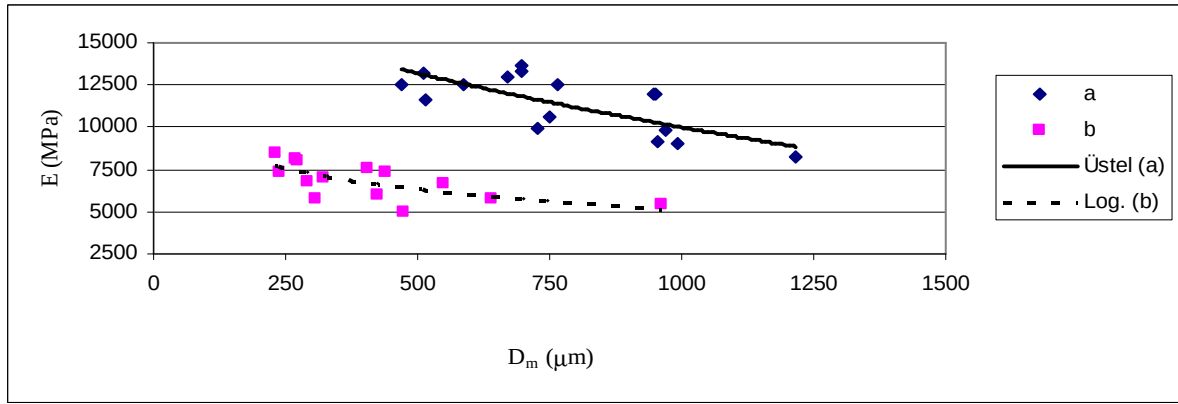
4.2.3.1 Elastisite modülü ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

Elastisite modülünün toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.15'te verilmiştir. Elastisite modülünün 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.15'te, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.

Toplam porozite (p_t , %) arttıkça Şekil 4.15'te görüldüğü gibi hava sürükleyicili ve hava sürükleyicisiz betonların elastisite modülü azalmış, betona hava sürükleyici katkı maddesi katılması, poroziteyi arttırmış, elastisite modülünde yaklaşık %35 oranında azalmaya neden olmuştur.

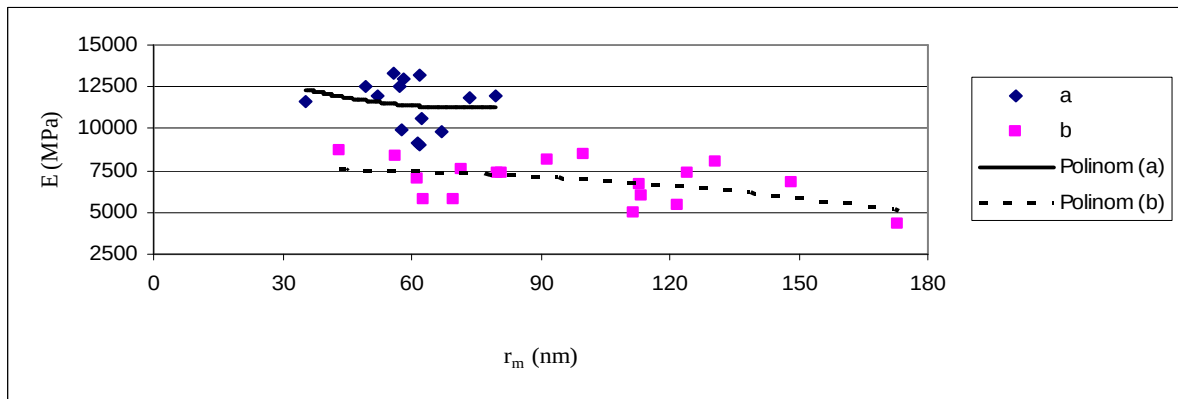


Şekil 4.15 Toplam porozite - elastisite modülü ($\%p_t$ -E) ilişkisi



Şekil 4.16 Ortalama boşluk çapı - elastisite modülü (D_m -E) ilişkisi

Şekil 4.16'da görüldüğü gibi ortalama boşluk çapı arttıkça elastisite modülü azalmış, hava sürükleyici katılması durumunda elastisite modülünde yaklaşık %55 oranında azalma meydana gelmiştir. Ortalama boşluk çapı arttıkça hava sürükleyicili ve sürükleyicisiz betonların elastisite modülündeki düşüş yaklaşık %30 oranında olmuştur.

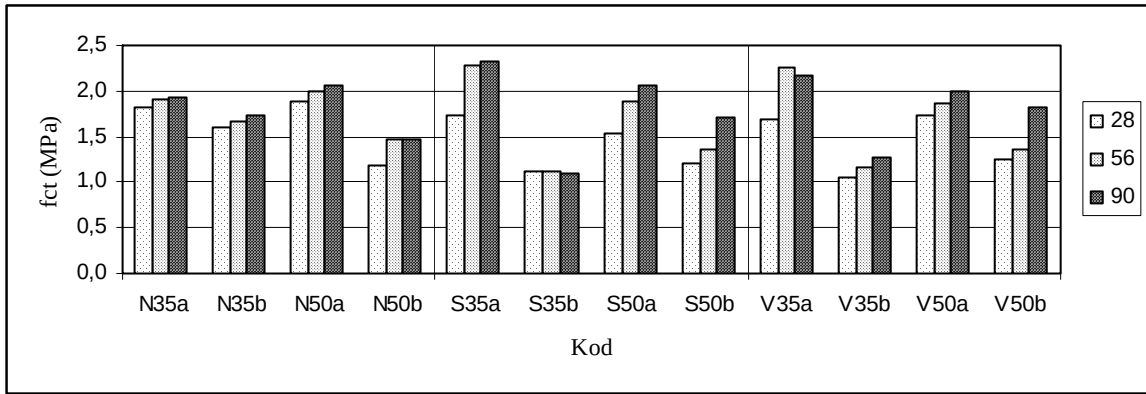


Şekil 4.17 Ortalama boşluk yarıçapı - elastisite modülü ilişkisi (r_m -E)

Şekil 4.17’de görüldüğü gibi ortalama boşluk yarıçapı arttıkça elastisite modülü azalmıştır. Ortalama boşluk yarıçapı arttıkça hava sürükleyicisiz betonların elastisite modülü yaklaşık %10, hava sürükleyicilerinki ise yaklaşık %30 oranında azalmıştır. Ortalama boşluk yarıçapı hava sürükleyicili betonlarda daha yüksek değerler almış, bu serilerde, elastisite modülündeki azalma daha fazla olmuştur.

4.2.4 Yarma dayanımı

10/20 cm boyutlu silindir numunelerde 28., 56. ve 90. günlerde yapılan yarma deneyinden elde edilen sonuçlara göre; Çizelge Ek2’de ve Şekil 4.18’de görüldüğü gibi hafif betonların 28 günlük yarma dayanımı 1,05 MPa ile 1,89 MPa arasında değişmiştir.



Şekil 4.18 Yarma dayanımının zamana bağlı değişimi

Yarma dayanımı bütün serilerde zamanla artış göstermiş, kür süresinin artması ile 350 dozlu hava sürükleyicisiz betonların yarma dayanımı %6 ile %33 arasında, 500 dozlu hava sürükleyicisiz betonların yarma dayanımı %10 ile %35 oranında artmıştır (Şekil 4.18 ve Şekil Ek 3).

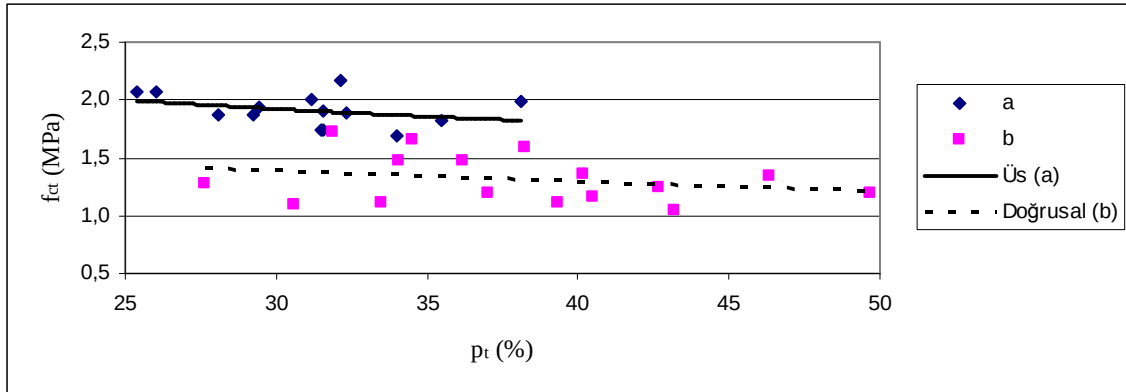
Çimento dozajının yarma dayanımına belirgin bir etkisi gözlenmemiş, hatta bazı serilerde dozaj arttıkça yarma dayanımında azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.18 ve Şekil Ek 3). Şekil 4.14’te görüldüğü gibi çimento dozajı arttıkça betonlar gevrekleştiği için elastisite modülü artmış, yarma dayanımı azalmıştır.

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artışı ile yarma dayanımının değişimi 56 ve 90. günlerde daha belirgin olmuş, kür süresinin artması ile agrega-çimento hamuru arayüzeyindeki aderans artmış, buna bağlı olarak yarma dayanımı daha yüksek değerler almıştır (Şekil 4.18 ve Şekil Ek 4).

Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi Şekil 4.18’de görüldüğü gibi yarma dayanımını düşürmüştür. Düşüş oranı, 350 dozlu laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N35), 28. ve 56. günlerde %13, 90. günde %11; suya doygun ponza agregalı betonlarda (S35), 28. günde %36, 56. günde %51, 90. günde %53; vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V35), 28. günde %38, 56. günde %49, 90. günde %41 olmuştur. 500 dozlu betonlardaki düşüş oranı, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N50), 28. günde %37, 56. günde %26, 90. günde %29; suya doygun ponza agregalı betonlarda (S50), 28. günde %22, 56. günde %28, 90. günde %17; vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V50), 28. günde %28, 56. günde %27, 90. günde %10 olmuştur. Hava sürükleyiciden dolayı 28 günlük betonların yarma dayanımındaki en belirgin düşüş %38 ile V35 serisinde görülmüştür.

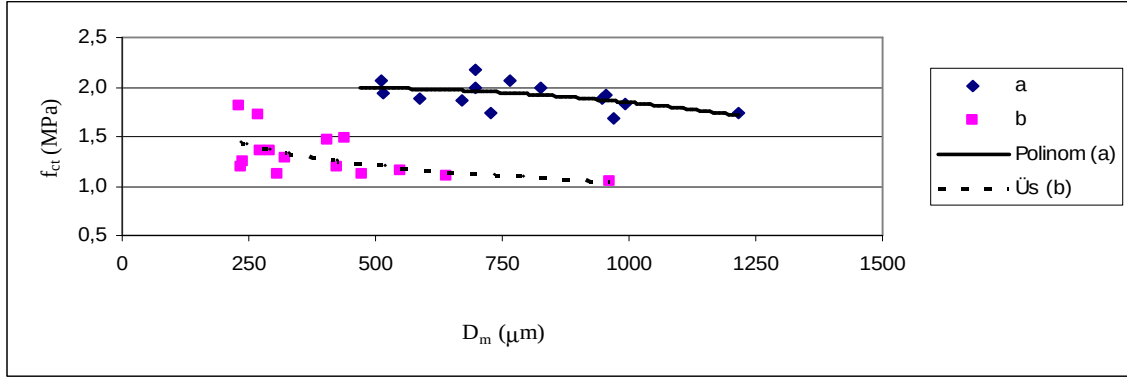
4.2.4.1 Yarma dayanımı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

Yarma dayanımının toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.19’da verilmiştir. Yarma dayanımının 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.20’de, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.21’de verilmiştir..



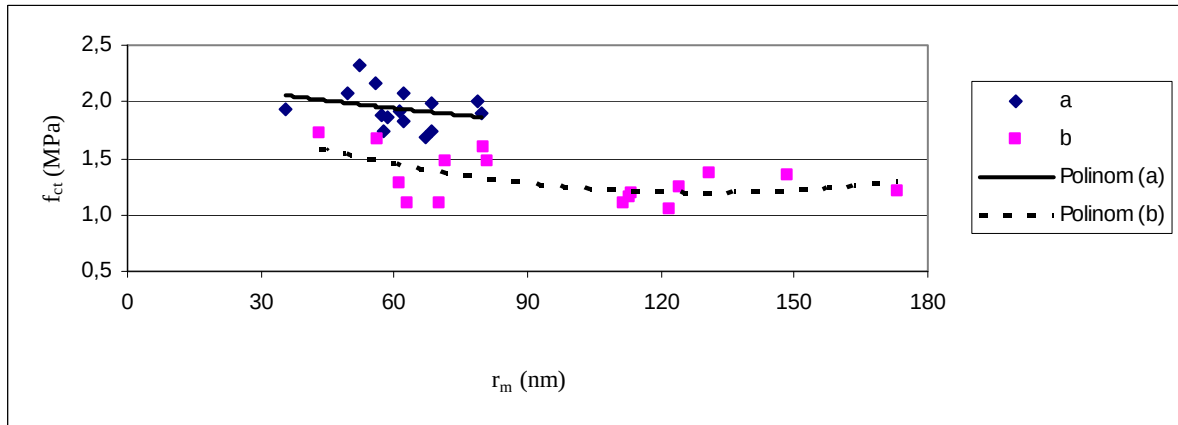
Şekil 4.19 Toplam porozite - yarma dayanımı ($\%p_t-f_{ct}$) ilişkisi

Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir. Toplam porozite (p_t , %) arttıkça Şekil 4.19’da görüldüğü gibi hava sürükleyicili ve hava sürükleyicisiz betonların yarma dayanımı azalmış, betona hava sürükleyici katkı maddesi katılması poroziteyi arttırmış ve yarma dayanımında yaklaşık %30 azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.20 Ortalama boşluk çapı - yarma dayanımı (D_m-f_{ct}) ilişkisi

Yarma dayanımı ile boşluk boyutu arasındaki ilişki, basınç dayanımındakine benzerlik göstermiştir. Şekil 4.20’de görüldüğü gibi ortalama boşluk çapı arttıkça yarma dayanımı azalmış, hava sürükleyici katılması durumunda yarma dayanımında ortalama %45 oranında azalma meydana gelmiştir. Hava sürükleyicisiz betonlarda ortalama boşluk çapı arttıkça yarma dayanımında %15, hava sürükleyicililerde ise %30 oranında azalma gözlenmiştir.



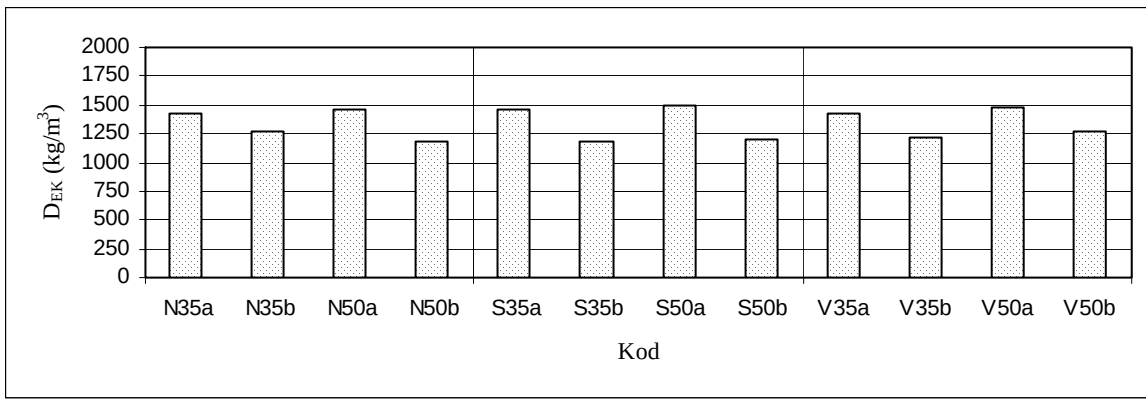
Şekil 4.21 Ortalama boşluk yarıçapı - yarma dayanımı ilişkisi (r_m-f_{ct})

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi betona hava sürükleyici katkı maddesi katılması daha büyük boyutlu boşluklar oluşturmuş, ortalama boşluk yarıçapı arttıkça hava sürükleyicisiz ve hava sürükleyicili betonlarda yarma dayanımı azalmıştır. Hava sürükleyicisiz betonlarda boşluk yarıçapı arttıkça yarma dayanımında ortalama %15 oranında azalma görülmüş, bu oran hava sürükleyicililerde ortalama %25 olmuştur. Şekil 4.11 ve 4.12 dikkate alındığında nanometre boyutundaki boşlukların yarma dayanımına etkisinin basınç dayanımından daha belirgin olduğu görülmektedir.

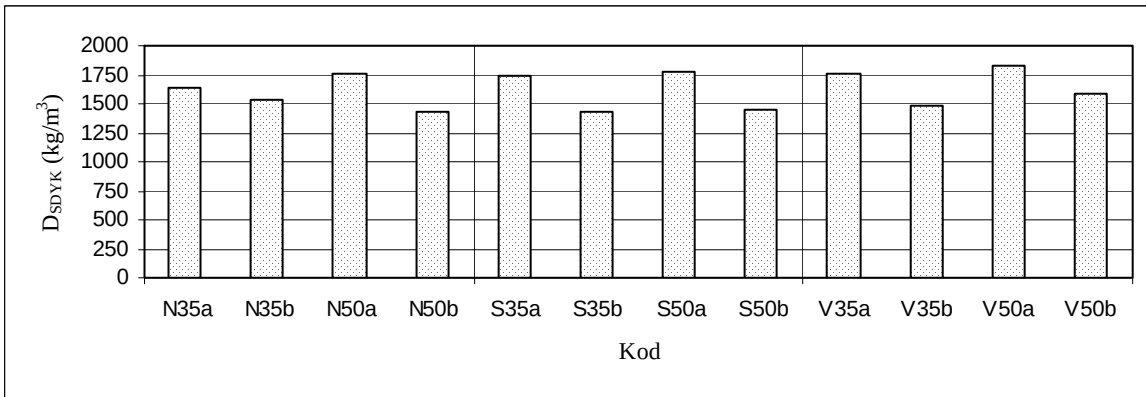
4.2.5 Yoğunluk

Sertleşmiş betonda TS 12390-7'ye uygun olarak suya doymun (D_{SDYK} , kg/m^3) ve etüv kuru su durumu (D_{EK} , kg/m^3) yoğunluk deneyi yapılmış, sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Etüv kuru su durumundaki beton yoğunluğu (Şekil 4.22) yaklaşık 1100 kg/m^3 ile 1500 kg/m^3 arasında, suya doymun yüzey kuru durumundaki beton yoğunluğu (Şekil 4.23) ise 1400 kg/m^3 ile 1850 kg/m^3 arasında değerler almıştır. Etüv kuru su yoğunluklar dikkate alındığında TS EN 206-1'de verilen sınıflamaya göre bu çalışmada üretilen betonlardan N50b ve S35b betonları D1.2 sınıfına; N35b, S50b, V35b ve V50b betonları D1.4 sınıfına; N35a, N50a, S35a, S50a, V35a ve V50a betonları ise D1.6 sınıfına girmektedir.



Şekil 4.22 Farklı doymunluktaki ponza agregalı betonların etüv kuru su yoğunluğu



Şekil 4.23 Farklı doymunluktaki ponza agregalı betonların suya doymun yoğunluğu

Ponza agregalarının doymunluğunun artması ile taze betonda olduğu gibi sertleşmiş betonda da yoğunluk artmıştır. 350 dozlu hava sürükleyicisiz suya doymun agregalı (S ve V) serilerde, etüv kuru su yoğunluktaki artış laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) serilere göre %5

ile %7 oranında, suya doygun yoğunluktaki artış ise %10 ile %11 oranında olmuştur. 500 dozlu hava sürükleyicisiz betonlarda etüv kurusu yoğunluktaki artış %1 ile %2, suya doygun yoğunluktaki artış ise %4 ile %6 oranında olmuştur.

Çimento dozajındaki artış Şahin vd. (2003) ve Gündüz ve Uğur'un da (2005) belirttiği gibi, hemen hemen bütün serilerde beton yoğunluğunu arttırmıştır. Hava sürükleyicisiz betonların (a) etüv kurusu yoğunlukları dikkate alındığında; laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlardaki (N) artış %5 oranında, vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerdeki (V) artışın %2 olduğu görülmüş, suya doygun ponza agregalı betonların (S) etüv kurusu yoğunluğunda belirgin bir artış gözlenmemiştir. Hava sürükleyicisiz betonların (a) suya doygun yoğunlukları dikkate alındığında; laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N) yoğunluktaki artış %8, suya doygun ponza agregalı serilerde (S) %2, vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V) %3 olmuştur.

Hava sürükleyici katılması taze betonda olduğu gibi sertleşmiş betonda da yoğunluğu azaltmıştır. Bu azalma, etüv kurusu yoğunluk dikkate alındığında; 350 dozlu, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N35) %11, suya doygun ponza agregalı serilerde (S35) %19, vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V35) %15 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlarda ise etüv kurusu yoğunluktaki azalma laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N50) %19, suya doygun ponza agregalı serilerde (S50) %19; vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V50) %15 oranında olmuştur. Suya doygun yoğunluk dikkate alındığında, bu azalma; 350 dozlu, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N35) %7, suya doygun ponza agregalı serilerde (S35) %18, vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V35) %15 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlarda ise suya doygun yoğunluktaki azalma laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N50) %19, suya doygun ponza agregalı serilerde (S50) %18; vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V50) %13 oranında olmuştur.

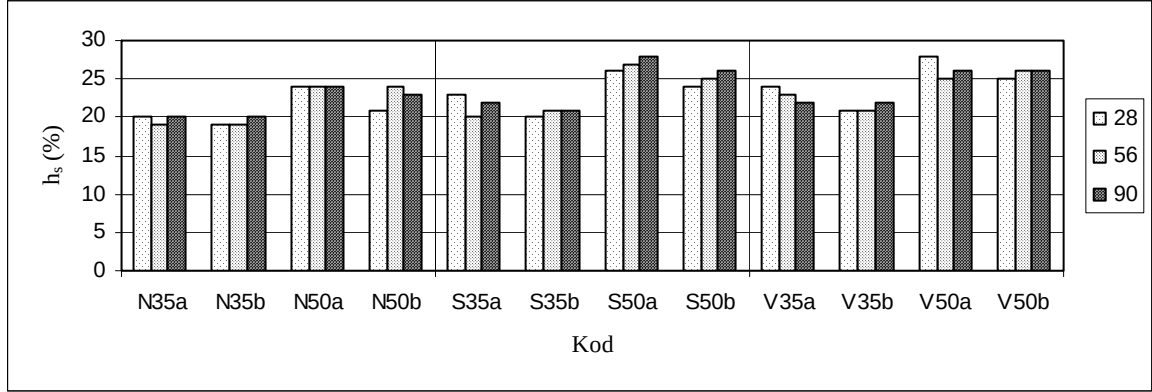
4.2.6 Hacimce su emme

Sertleşmiş beton numunelerde yapılan hacimce su emme deneyi sonuçlarına göre, Şekil 4.24'te görüldüğü gibi farklı üretim tekniklerine ve karışım özelliklerine sahip betonların hacimce su emme oranının %19 ile %28 arasında değiştiği gözlenmiştir.

Hacimce su emme oranının kür süresine bağlı olarak değişimi belirgin olmamakla birlikte Şekil Ek 7c'de görüldüğü gibi yalnızca vakumla suya doyurulan ponza agregalı, 350 ve 500 dozlu, hava sürükleyicisiz serilerde zamanla azalma gözlenmiş, diğer serilerde az da olsa bir

artış görülmüştür.

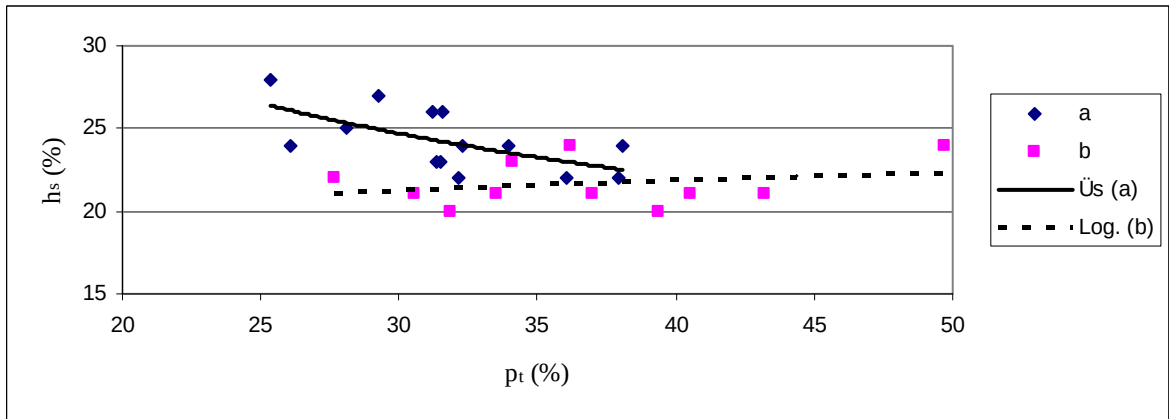
Şekil 4.24'te ve Şekil Ek 7'de görüldüğü gibi taze betona hava sürükleyici katkı ilavesinin hacimce su emme oranını azalttığı, çimento dozajının artması ile betonun hacimce su emmesinin arttığı görülmüştür. Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının nemliliği arttıkça hacimce su emme oranı da artmıştır.



Şekil 4.24 Hacimce su emmenin zamana bağlı değişimi

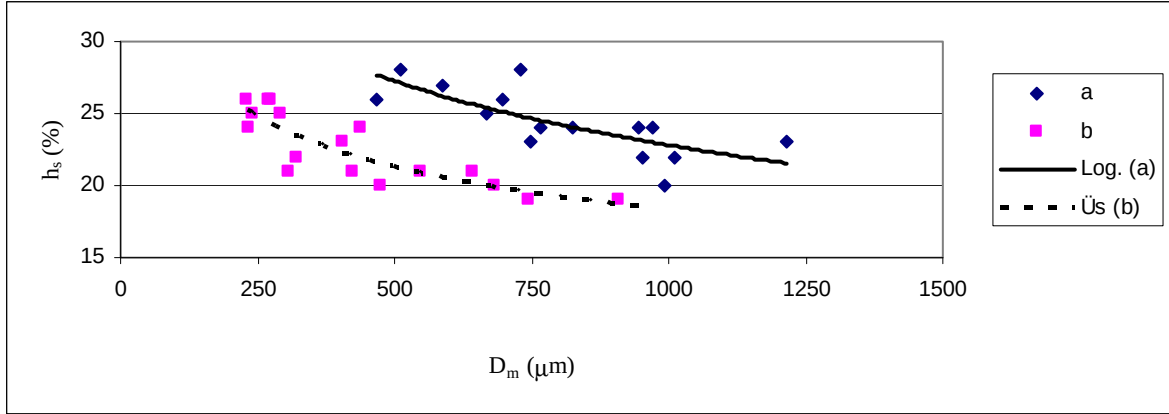
4.2.6.1 Hacimce su emme ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

Hacimce su emme oranının toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.25'te verilmiştir. Hacimce su emme oranının 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.26'da, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.27'de verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.



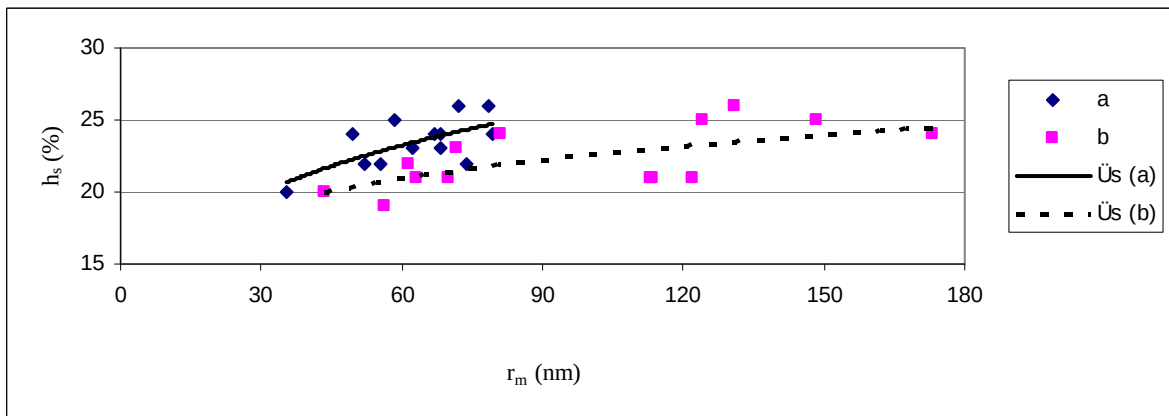
Şekil 4.25 Toplam porozite - hacimce su emme oranı ($\%p_t$ - h_s) ilişkisi

Toplam porozite (p_t , %) arttıkça, Şekil 4.25'te görüldüğü gibi hava sürükleyicisiz serilerde hacimce su emme oranı azalmıştır. Hava sürükleyici ilavesi, porozitenin %30 olduğu bölgede hacimce su emmeyi %16 azaltmıştır. Bu seride toplam porozite yüksek olmasına rağmen hacimce su emmenin düşük olması hava sürükleyici katkı maddelerinin kapalı boşluk oluşturduğu görüşünü doğrulamaktadır.



Şekil 4.26 Ortalama boşluk çapı - hacimce su emme oranı ilişkisi

Şekil 4.26'da görüldüğü gibi ortalama boşluk çapının artması ile hacimce su emme oranı her iki seride de azalmıştır. Hava sürükleyici katılan betonlarda hacimce su emme oranı, hava sürükleyici katılmamış betonlarınkinin yaklaşık %40'ı kadardır. Boyutu 250 ile 1250 µm arasında değişen boşlukların çoğunlukla kapalı olduğu ve su emmediği, hava sürükleyici katkının betonlardaki kapalı boşluk oranını arttırdığı anlaşılmaktadır.



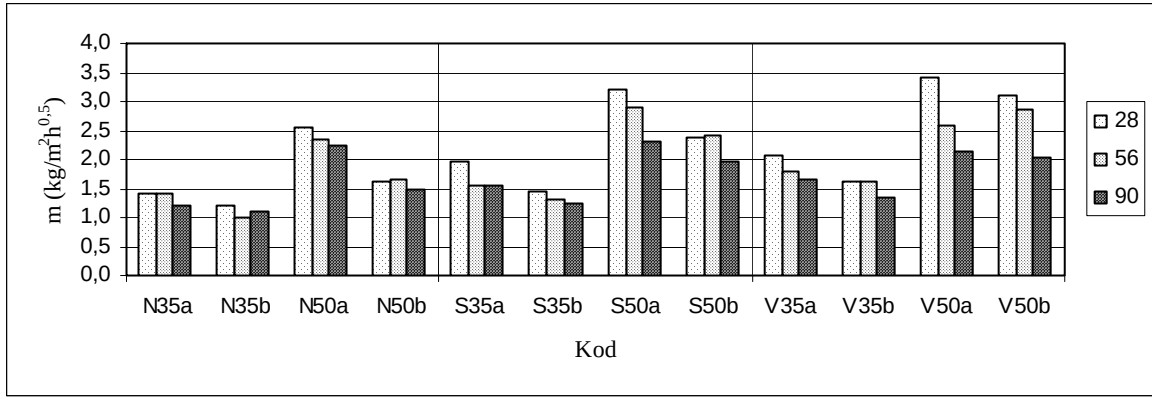
Şekil 4.27 Ortalama boşluk yarıçapı - hacimce su emme oranı ilişkisi (r_m - h_s)

Şekil 4.27'de görüldüğü gibi ortalama boşluk yarıçapının artması ile hava sürükleyicisiz ve hava sürükleyicili betonların hacimce su emmesi artmıştır. Her iki seride de hacimce su emme

oranının artmasından, yarıçapı 30 ile 180 nm arasında değişen boşlukların çoklukla dışa açık boşluklar olduğu söylenebilir.

4.2.7 Kapiler su emme

Sertleşmiş beton numunelerde yapılan kapiler su emme deneyi sonuçlarına göre, Şekil 4.28’de görüldüğü gibi farklı üretim tekniklerine ve karışım özelliklerine sahip betonların kapiler su emmesinin $1,00 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0,5}$ ile $3,41 \text{ kg/m}^2/\text{h}^{0,5}$ arasında değiştiği gözlenmiştir. Kür süresinin artması ile hidratasyon devam etmiş, jel miktarı artmış ve Erdoğan’ın da (2003) belirttiği gibi kapiler boşluklar arasındaki bağlantı azalmış, bununla birlikte kapiler su emme bütün serilerde azalmıştır. Çimento dozajının artması ile kapiler su emme artmıştır (Şekil Ek 8).



Şekil 4.28 Kapiler su emmenin zamana bağlı değişimi

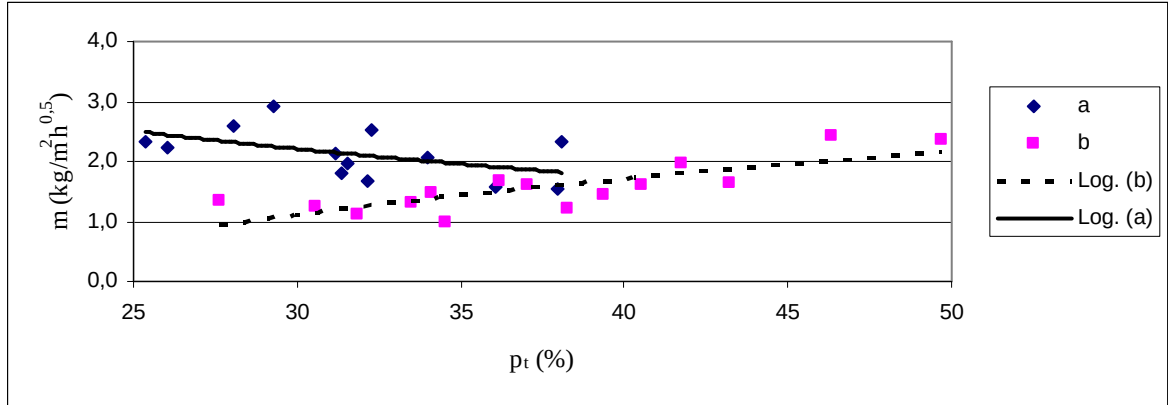
Hava sürükleyici katkı maddesi kapiler boşluklardaki sürekliliği bozmuş, kapiler boyuttaki boşluk çapını arttırmış, yüzey gerilimini azaltmış ve Şekil 4.28’de ve Şekil Ek 8’de görüldüğü gibi bütün serilerde kapiler su emmeyi azaltmıştır. Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının nemliliği arttıkça Elsharief vd. (2005)’nin de belirttiği gibi agrega-çimento arayüzey porozitesi artmış buna bağlı olarak kapiler su emme artmıştır.

4.2.7.1 Kapiler su emme ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

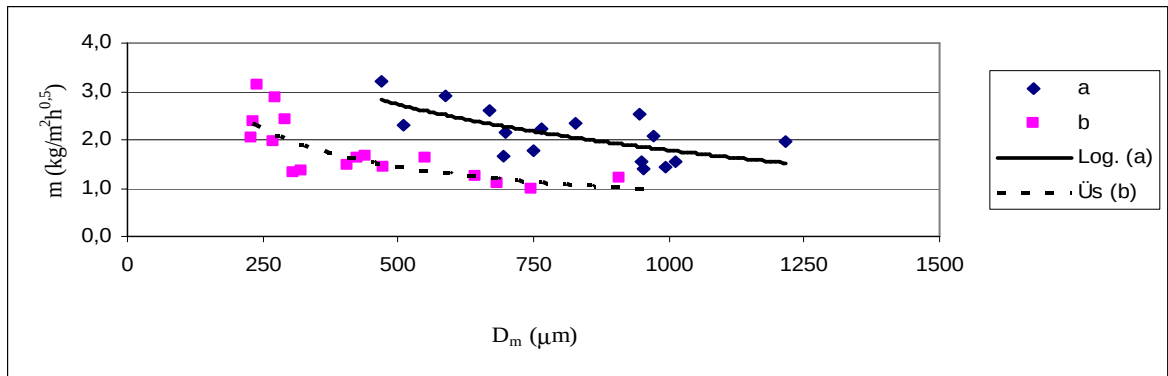
Kapiler su emmenin toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.29’da verilmiştir. Kapiler su emmenin 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.30’da, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.31’de verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.

Toplam porozite (p_t , %) arttıkça Şekil 4.29’da görüldüğü gibi hava sürükleyicisiz betonların

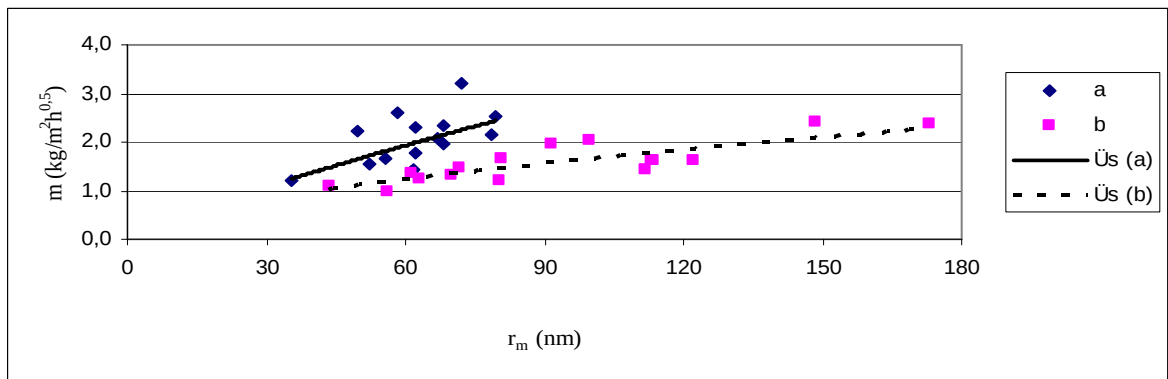
kapiler su emmesi azalmış, hava sürükleyici katılması durumunda beton serilerin toplam porozitesi %25'ten %50'ye çıkmıştır. Bu kadar yüksek porozite değerlerinde bile kapiler su emmedeki artış önemsiz sayılabilecek bir düzeyde olmuş, hava sürükleyici katkı maddesi kapiler boşlukların sürekliliğini bozarak kapiler su emmenin artış oranını azaltmıştır.



Şekil 4.29 Toplam porozite - kapiler su emme (% p_t - m) ilişkisi



Şekil 4.30 Ortalama boşluk çapı - kapiler su emme (D_m - m) ilişkisi



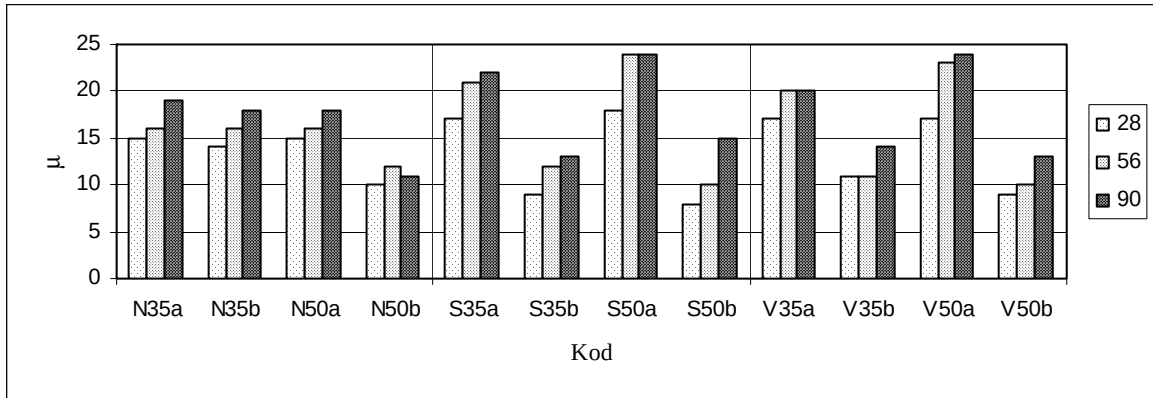
Şekil 4.31 Ortalama boşluk yarıçapı - kapiler su emme ilişkisi (r_m - m)

Şekil 4.30’da görüldüğü gibi ortalama boşluk çapının artması ile hacimce su emme kapiler su emme azalmıştır. Hava sürükleyicili betonlarda kapalı boşlukların oranının artması ile kapiler su emme hava sürükleyicisiz betonlara göre yaklaşık % 50 oranında azalmıştır.

Şekil 4.31’de görüldüğü gibi ortalama boşluk yarıçapı arttıkça her iki seride de kapiler su emme artmıştır. Hava sürükleyicili betonların kapiler su emmesi, hava sürükleyicisizlere göre yaklaşık %40 daha düşük çıkmıştır.

4.2.8 Su buharı difüzyon direnç faktörü

Sertleşmiş beton numunelerde TS EN 12086’ya uygun olarak belirlenen su buharı difüzyon direnç faktörü sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.



Şekil 4.32 Su buharı difüzyon direnç faktörünün zamana bağlı değişimi

Deney sonuçlarına göre farklı doygunlukta ponza agregası ve farklı karışım özelliklerine sahip betonların su buharı difüzyon direnç faktörü Şekil 4.32’de görüldüğü gibi 8 ile 24 arasında değişmiştir.

Su buharı difüzyon direnç faktörünün bütün serilerde zamanla artış gösterdiği, kür süresinin artması ile Şekil Ek 9’da görüldüğü gibi 350 dozlu betonların direnç faktörünün %18 ile %29, 500 dozlu betonların direnç faktörünün ise %20-%41 oranında arttığı görülmüştür.

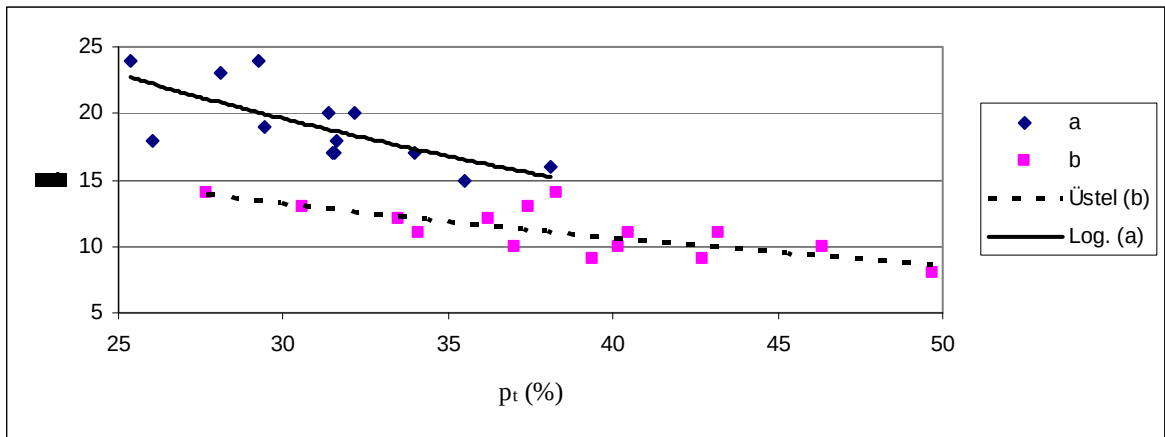
Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile beton yoğunluğu artmıştır. Kearsley ve Wainwright (2001) yoğunluğun artması ile betonun su buharı geçirimsizliğinin azaldığını dolayısı ile su buharı difüzyon direncinin arttığını ifade etmiş, aynı sonuç bu çalışmadaki betonlarda da görülmüştür. Ponza agregalarının doygunluğunun artması ile su buharı difüzyon direnç faktöründeki artış 350 dozlu betonlarda %12 ile %18, 500 dozlu betonlarda ise %31 ile %38 oranında olmuştur.

Çimento dozajındaki artış, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlar (N) hariç (Şekil Ek 9a) bütün serilerde betonun su buharı difüzyon direnç faktörünün artmasına neden olmuş, bu artış suya doymuş ponza agregalı serilerde %10, vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde %11 oranında olmuştur.

Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi sertleşmiş betonda ilave boşluklar oluşturduğundan Kearsley ve Wainwright'ın da (2001) belirttiği gibi su buharı difüzyon direnç faktörünü düşürmüştür. 350 dozlu betonlarda azalma, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda %6, suya doymuş ponza agregalı (S) betonlarda %45, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda %37 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlardaki azalma ise laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda %31, suya doymuş ponza agregalı (S) betonlarda %50, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda %48 oranında olmuştur.

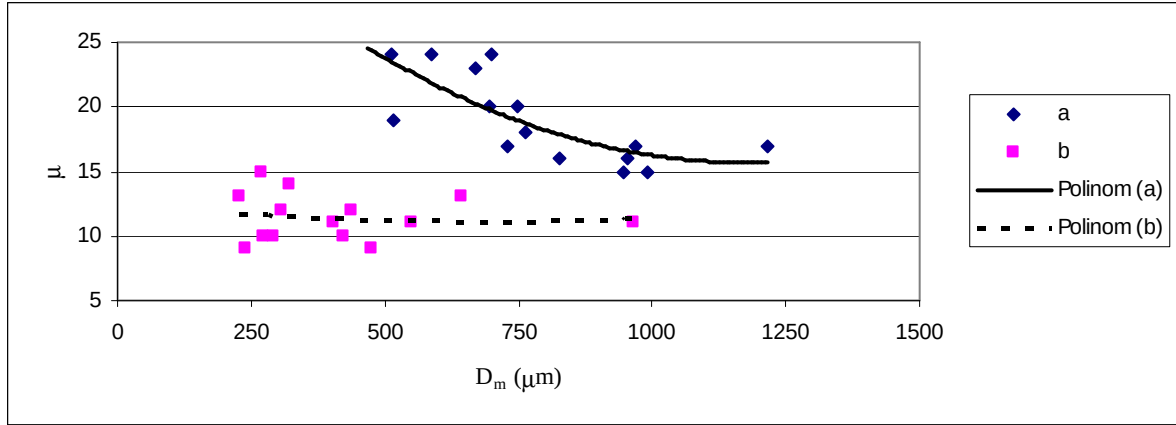
4.2.8.1 Su buharı difüzyon direnç faktörü ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

Su buharı difüzyon direnç faktörünün toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.33'te verilmiştir. Su buharı difüzyon direnç faktörünün 250-1250 μm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil 4.34'te, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.35'te verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.



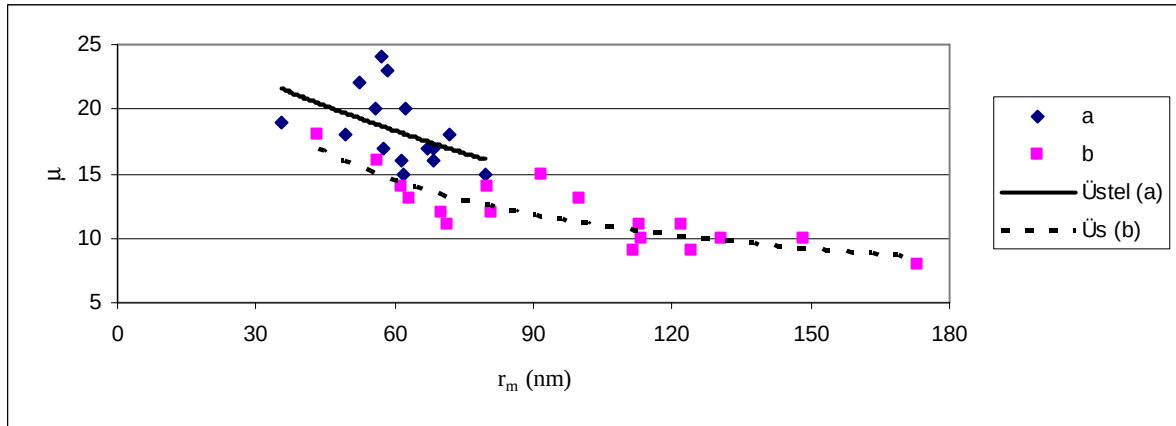
Şekil 4.33 Toplam porozite – su buharı difüzyon direnç faktörü ($\%p_t-\mu$) ilişkisi

Toplam porozite (p_t , %) arttıkça Şekil 4.33'te görüldüğü gibi su buharı difüzyon direnç faktörü azalmış, hava sürükleyici katılması durumunda su buharı difüzyon direnç faktörü hava sürükleyicisiz betonlara göre yaklaşık %30 oranında azalmıştır.



Şekil 4.34 Ortalama boşluk çapı – su buharı difüzyon direnç faktörü ($D_m-\mu$) ilişkisi

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi ortalama boşluk çapı arttıkça hava sürükleyicisiz betonlarda su buharı difüzyon direnç faktörü azalmıştır. Hava sürükleyicili betonların su buharı difüzyon direnç faktörü hava sürükleyicisizlere göre yaklaşık %40 daha düşük çıkmış, ortalama boşluk çapının bu betonlara belirgin bir etkisi gözlenmemiştir.

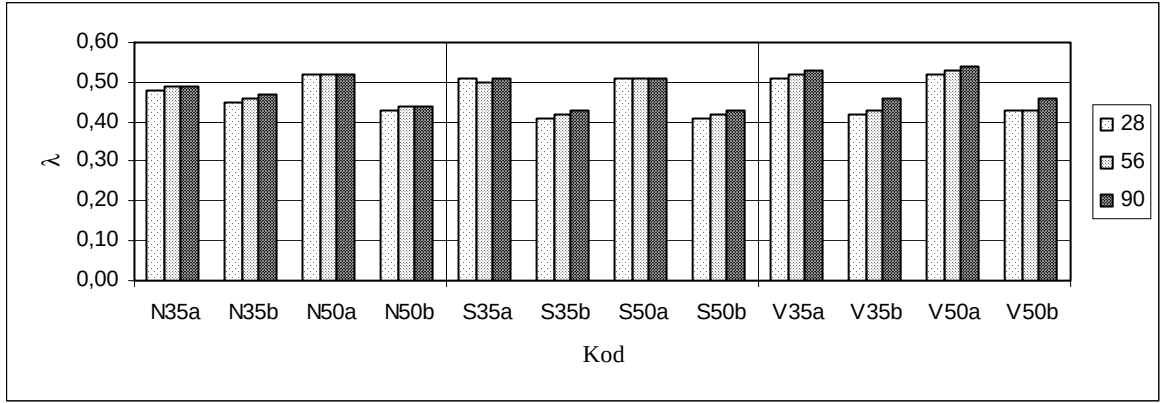


Şekil 4.35 Ortalama boşluk yarıçapı – su buharı difüzyon direnç faktörü ilişkisi ($r_m-\mu$)

Şekil 4.35'te görüldüğü gibi ortalama boşluk yarıçapı arttıkça su buharı difüzyon direnç faktörü azalmıştır.

4.2.9 Isı iletim katsayısı

Sertleşmiş beton numunelerde TS ISO 8302'ye göre belirlenen ısı iletim katsayısı sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre farklı doygunlukta ponza agregası ve farklı karışım özelliklerine sahip betonların ısı iletim katsayısı Şekil 4.36'da görüldüğü gibi 0,41 ile 0,54 W/m²K arasında değişmiştir.



Şekil 4.36 Isı iletim katsayısının zamana bağlı değişimi

Isı iletim katsayısının bütün serilerde zamanla çok az artış gösterdiği, Şekil Ek10'da görüldüğü gibi kür süresinin artması ile 350 ve 500 dozlu betonların ısı iletim katsayısının en çok %4 oranında arttığı gözlenmiştir.

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile yoğunluk artmış, yoğunluktaki artış Şahin vd.'nin de (2003) belirttiği gibi ısı iletim katsayısını arttırmıştır. Bu artış 350 dozlu betonlarda %6 olmuş, 500 dozlu betonlarda ise belirgin bir artış görülmemiştir.

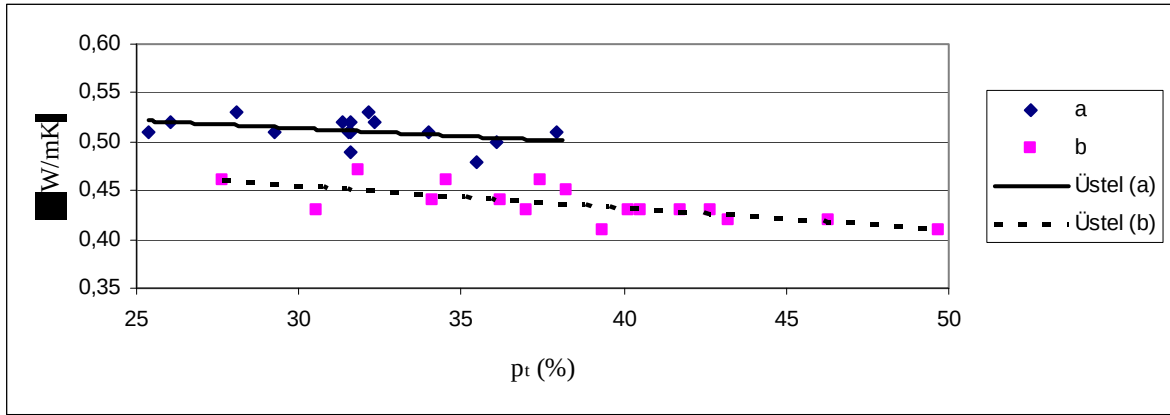
Çimento dozajındaki artış, betonun ısı iletim katsayısını arttırmış, bu artış laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N) %6, suya doygun ponza agregalı betonlarda (S) %1, vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V) %2 oranında olmuştur (Şekil Ek10).

Taze betona hava sürükleyici katılması betonda ilave boşluklar oluşturarak betonun ısı iletim katsayısını düşürmüştür. 350 dozlu betonlardaki azalma, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı serilerde (N35) %6, suya doygun ponza agregalı serilerde %20 (S35), vakumla suya doyurulan ponza agregalı serilerde (V35) %18 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlardaki azalma ise laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlarda (N50) %17, suya doygun ponza agregalı betonlarda (S50) %20; vakumla suya doyurulan ponza agregalı betonlarda (V50) %17 oranında olmuştur.

4.2.9.1 Isı iletim katsayısı ile boşluk parametreleri arasındaki ilişkiler

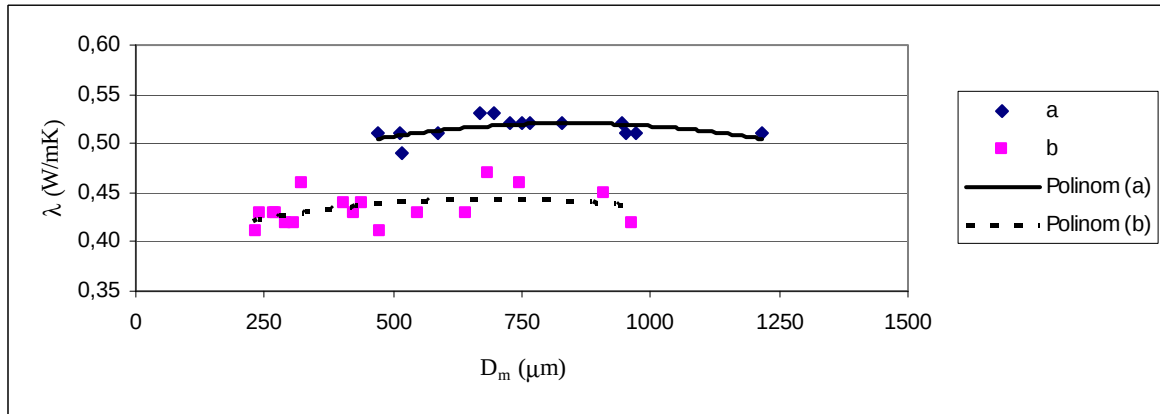
Isı iletim katsayısının toplam porozite ile ilişkisi Şekil 4.37'de verilmiştir. Isı iletim katsayısının 250-1250 µm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk çapına göre değişimi Şekil

4.38’de, 30-180 nm boyutlu boşluklar için ortalama boşluk yarıçapına göre ilişkisi de Şekil 4.39’da verilmiştir. Bu parametreler beton serilerinden bağımsız olarak hava sürükleyici katılıp (b) katılmadığına (a) göre ilişkilendirilmiştir.



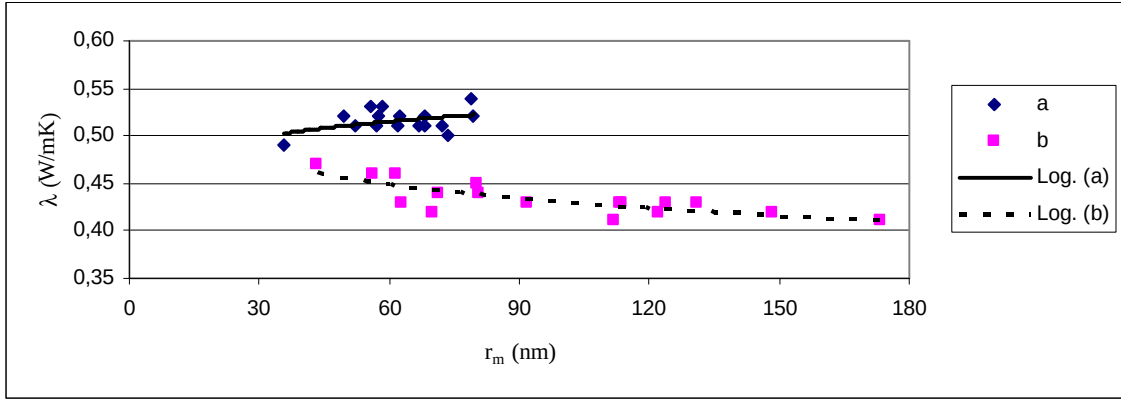
Şekil 4.37 Toplam porozite - ısı iletim katsayısı (% p_t - λ) ilişkisi

Toplam porozite (p_t , %) arttıkça Şekil 4.37’de görüldüğü gibi her iki seride de ısı iletim katsayısı azalmış, hava sürükleyici katılması ile ısı iletim katsayısında yaklaşık %15 oranında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.38 Ortalama boşluk çapı – ısı iletim katsayısı ilişkisi

Şekil 4.38’de görüldüğü gibi her iki seride de ortalama boşluk çapı arttıkça ısı iletim katsayısı artmış, hava sürükleyicili betonların ısı iletim katsayısı hava sürükleyicisizlere göre yaklaşık %13 daha düşük olmuştur. Ortalama boşluk yarıçapının ısı iletim katsayısına etkisi hava sürükleyicisiz ve hava sürükleyicili betonlar için farklı olmuş, yarıçap arttıkça hava sürükleyicisiz betonların ısı iletim katsayısı artmış, hava sürükleyicili betonların ısı iletim katsayısı ise azalmıştır. (Şekil 4.34).

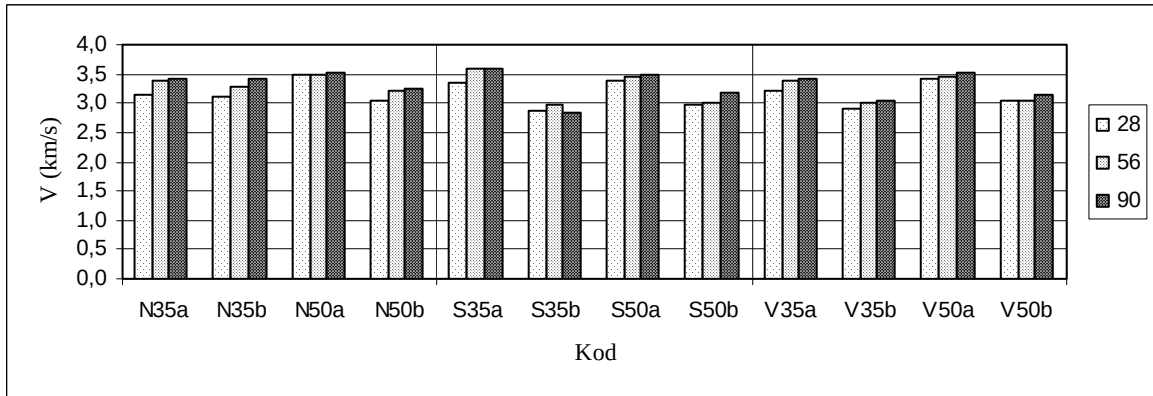


Şekil 4.39 Ortalama boşluk yarıçapı – ısı iletim katsayısı ilişkisi (r_m - λ)

4.2.9.2 Ultrases geçiş hızı

Farklı özellikteki beton serilerinin ultrases geçiş hızının belirlenmesi için frekansı 55 kHz olan BS 1881 Part 1'e uygun PUNDİT tipi ultrases aleti kullanılmış, ses geçiş hızı sonuçları aşağıda değerlendirilmiştir.

Deney sonuçlarına göre farklı doygunlukta ponza agregası ve farklı karışım özelliklerine sahip betonların ultrases geçiş hızının Şekil 4.40'ta görüldüğü gibi 2,839 ile 3,586 km/s arasında değiştiği görülmüştür. Neville (2000), betonların kalitesini ses geçiş hızına bağlı olarak sınıflandırmış, bu sınıflandırmaya göre bu çalışmadaki ultrases geçiş hızları dikkate alındığında betonların kalitesinin zayıf ile iyi arasında değiştiği görülmüştür.



Şekil 4.40 Ses geçiş hızının zamana bağlı değişimi

Ultrases geçiş hızının bütün serilerde zamanla artış gösterdiği, kür süresinin artması ile 350 dozlu betonların ses geçiş hızının %6 ile %9 oranında, 500 dozlu betonların ses geçiş hızının ise %2 ile %3 oranında arttığı görülmüştür (Şekil 4.40).

Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile 350 dozlu serilerde ultrases geçiş hızı %1 ile %6 oranında artmış, 500 dozlu serilerde ise ses geçiş hızları yakın değerler almış, belirgin bir artış gözlenmemiştir (Şekil Ek11).

Çimento dozajındaki artış, suya doygun ponza agregalı betonlar hariç diğer serilerde betonun ultrases geçiş hızını arttırmış, bu artış laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) betonlarda %5, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) betonlarda %4 oranında olmuştur.

Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi boşluk oranını artırdığı için beklendiği gibi betonun ultrases geçiş hızını düşürmüştür. 350 dozlu betonlardaki azalma, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N35) serilerde %2, suya doygun ponza agregalı (S35) serilerde %18, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V35) serilerde ise %10 oranında olmuştur. 500 dozlu betonlardaki azalma laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N50) betonlarda %9, suya doygun ponza agregalı (S50) betonlarda %11, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V50) betonlarda ise %11 oranında olmuştur.

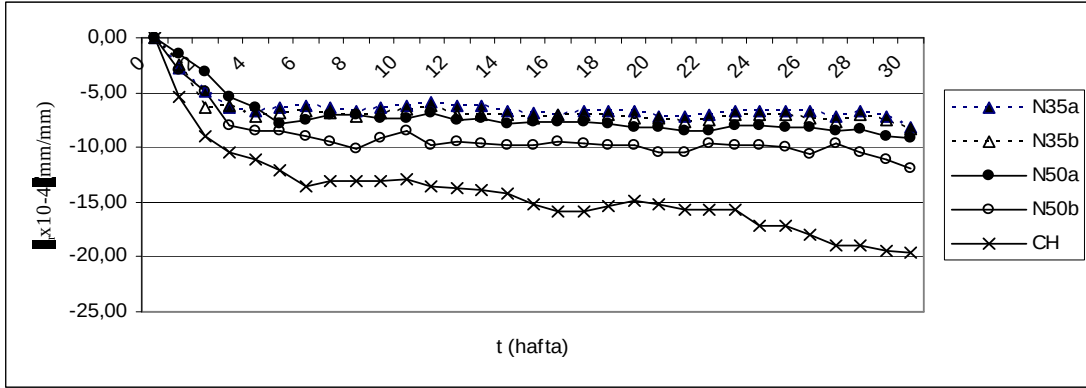
4.2.9.3 Rötire

Beton numunelerde birer hafta ara ile 30. haftaya kadar yapılan boy değişimi ölçümlerinden elde edilen rötrenin zamana bağlı değişimi Şekil 4.41’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre Şekil 4.41’de görüldüğü gibi bütün beton serilerin rötresi çimento hamurunun rötresinden daha düşük olmuş, ponza agregaları betonun rötresini azaltmıştır.

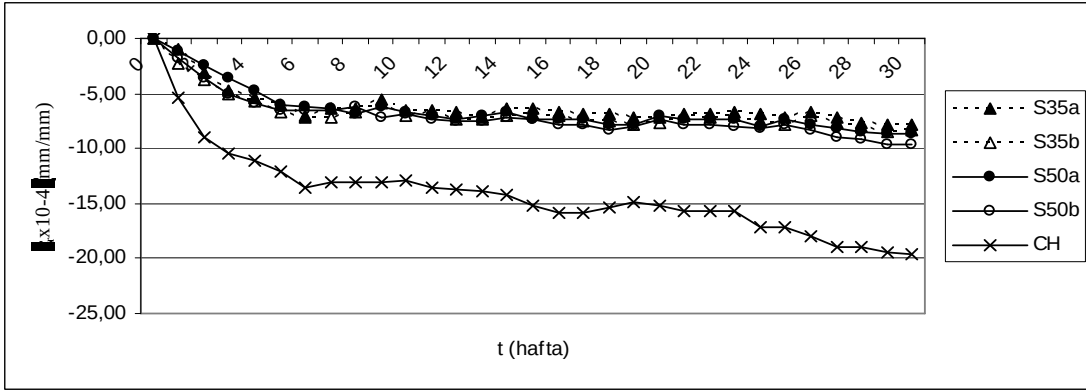
Rötrenin bütün serilerde zamanla arttığı, bu artışın özellikle 5. haftaya kadar daha hızlı olduğu, 5. haftadan sonra rötredeki artışın azalarak devam ettiği görülmüştür. Şekil Ek12’de de görüldüğü gibi beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının doygunluğunun artması ile rötire azalmış, 350 dozlu hava sürükleyicisiz betonlarda rötredeki azalma %4 ile %27 oranında, 500 dozlu hava sürükleyicisiz betonlarda ise rötredeki azalma %6 ile %14 oranında olmuştur.

Çimento dozajındaki artış beklendiği gibi bütün serilerde rötreyi arttırmış, bu artış laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N) serilerde %12, suya doygun ponza agregalı (S) serilerde %9, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V) serilerde ise %31 oranında olmuştur. Taze betona hava sürükleyici katkı ilavesi rötreyi arttırmıştır. Bu artış 350 dozlu serilerde; laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N35) %1, suya doygun ponza agregalı (S35) %5, vakumla suya doyurulan ponza agregalı (V35) %3 oranında olmuştur. 500 dozlu serilerde rötredeki artış; laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı (N50) %29, suya

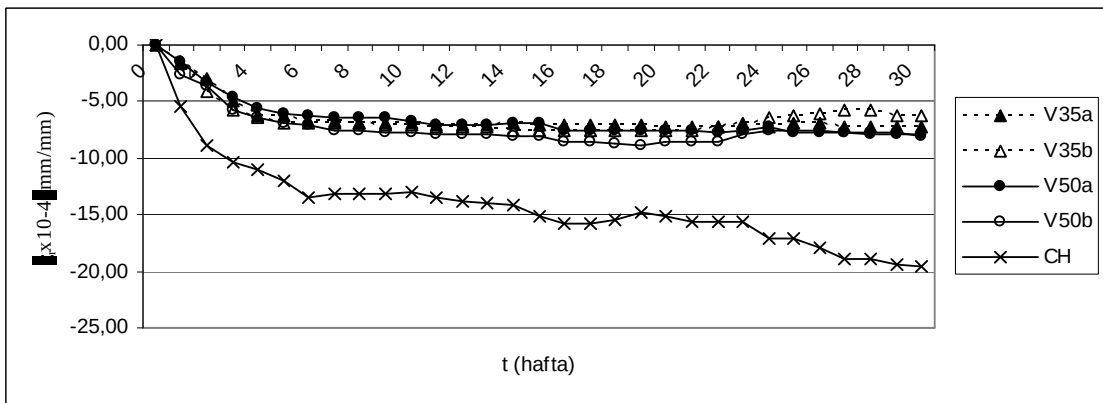
doymun ponza agregalılarda (S50) %12, vakumla suya doymurulan ponza agregalılarda (V50) %3 oranında olmuştur.



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin ϵ_r -t ilişkisi



b) Suya doymurulmuş ponza agregalı serilerin ϵ_r -t ilişkisi



c) Vakum ile suya doymurulmuş ponza agregalı serilerin ϵ_r -t ilişkisi

Şekil 4.41 Rötrenin zamanla değişimi (ϵ_r -t)

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Bu bölümde, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, literatür araştırmasından elde edilen dayanım-boşluk yapısı ile ilgili matematiksel modeller ile denenmiştir. Hafif agregalı beton ayrıca normal beton ile statik ve ısı yalıtımı bakımından karşılaştırılmış ve irdelenmiştir. Bu çalışmada üretilen beton serilerinin performansı, üretim yöntemi bakımından değer analizi ile karşılaştırılmıştır.

5.1 Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Boşluk Parametreleri ile İlişkilendirilmesi

Bölüm 3.5.9’da açıklandığı gibi sertleşmiş hafif betonda boşluk yapısı optik mikroskop ve cıva porozimetresi ile araştırılmış, optik mikroskop ölçümleri ile porozite (p_{om} , %) ve ortalama boşluk çapı (D_m , μm), cıva porozimetresi deneyi ile porozitesi (p_{Hg} , %) ve ortalama boşluk yarıçapı (r_m , nm) belirlenmiştir. Boşluklar, Zhang’ın (1998) çalışmasına benzer şekilde boşluk yarıçapına bağlı olarak 0-10nm, 10nm-3 μm ve 100 μm -625 μm şeklinde 3 farklı aralığa bölünmüş, bu aralıklardaki poroziteler (p , %) hesaplanmış, ortalama değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Tüm serilerde, en çok 10nm-3 μm arasında boyutlu boşlukların olduğu, 10nm’den küçük boşlukların en çok %2,9 değeri ile S35a serisinde, 100-625 μm arasındaki boşlukların da en çok %4,26 oranı ile S50b serisinde olduğu görülmüştür.

Elde edilen bu boşluk parametrelerine bağlı olarak basınç dayanımının matematiksel olarak ifade edilmesi amacı ile literatürde önerilen bazı modeller test edilmiş, ısı iletim katsayısı ve su buharı difüzyon direnç faktörü ile boşluk yapısı arasında matematiksel ilişki araştırılmış, elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

5.1.1 Basınç dayanımının boşluk parametreleri ile ilişkisi

Basınç dayanımı ile toplam porozitenin (p_t , %) Çizelge 5.1’de verilen değerleri, 5.1-5.4 bağıntılarındaki modeller için denenmiş, elde edilen sonuçlar Şekil 5.1-5.4’te verilmiştir.

$$f_c = f_{c0}(1-p)^m \text{ Bal'shin modeli} \quad (5.1)$$

$$f_c = f_{c0}e^{-m.p} \text{ Ryshkewitch modeli} \quad (5.2)$$

$$f_c = K \ln(p/p_0) \text{ Schiller modeli} \quad (5.3)$$

$$f_c = f_{c0} - m.p \text{ Hasselman modeli} \quad (5.4)$$

Bağıntılarda σ , boşluklu malzemenin basınç dayanımını, σ_{c0} , sıfır porozite için teorik basınç

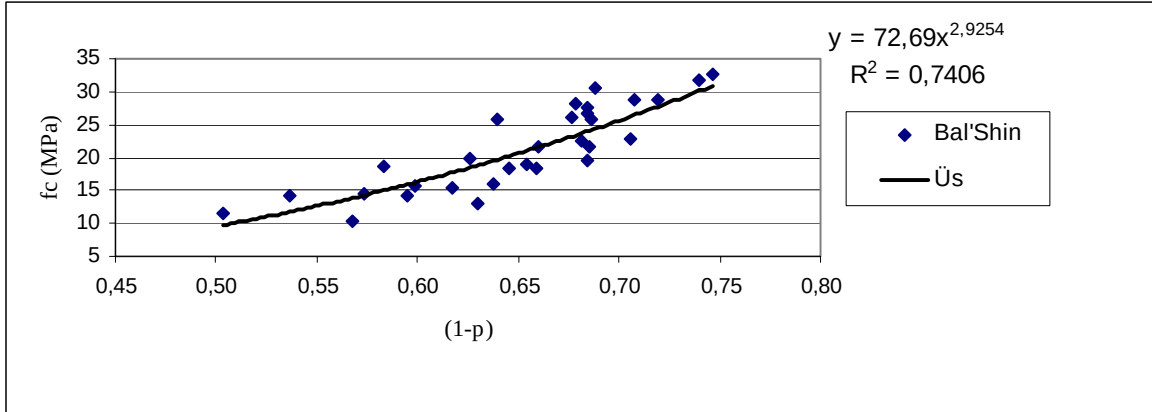
dayanımını, p , poroziteyi, p_o , sıfır dayanım için kritik poroziteyi (0,58), K ve m ise ampirik sabitleri ifade etmektedir.

Çizelge 5.1 Boşluk yarıçapı aralıklarına bağlı olarak porozitenin değişimi

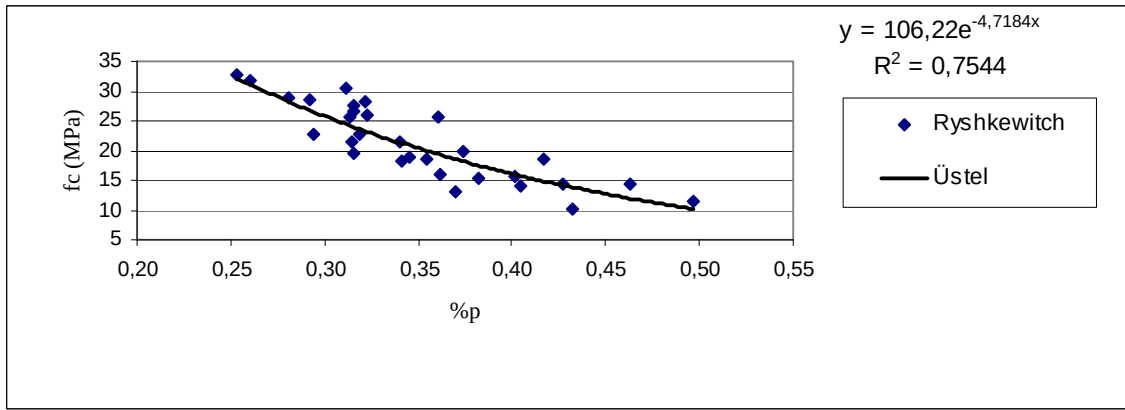
Kod	Yaş	Boşluk Dağılımı ve Porozite						
		% $p_{<10nm}$	Ort.	% $p_{10nm-3\mu m}$	Ort.	% $p_{100-625\mu m}$	Ort.	% p_t
N35a	28	1,44	0,8	32,86	30,3	1,21	1,1	32,2
	56	1,04		29,52		1,00		
	90	0		28,48		0,95		
N35b	28	0,89	0,8	34,5	32,1	2,87	2,1	35,0
	56	1,4		31,03		2,11		
	90	0		30,61		1,24		
N50a	28	1,14	0,7	29,75	30,1	1,41	1,3	32,1
	56	0,96		35,76		1,37		
	90	0		24,87		1,19		
N50b	28	1,44	1,4	33,91	32,9	1,67	1,4	35,7
	56	1,74		32,84		1,62		
	90	1,06		32,03		1,00		
S35a	28	2,9	2,0	27,18	31,5	1,43	1,7	35,2
	56	0,89		32,84		2,34		
	90	2,13		34,47		1,33		
S35b	28	2,02	1,2	35,12	31,4	2,22	1,9	34,5
	56	1,69		29,99		1,83		
	90	0		29,03		1,53		
S50a	28	1,11	0,7	29,99	27,6	0,50	0,4	28,7
	56	0,87		27,84		0,54		
	90	0		25,09		0,27		
S50b	28	1,91	1,6	43,53	41,9	4,26	2,4	45,9
	56	1,48		42,16		2,69		
	90	1,41		40,04		0,27		
V35a	28	2,16	1,5	28,42	29,4	1,45	1,0	31,9
	56	1,14		29,44		0,77		
	90	1,18		30,33		0,65		
V35b	28	1,1	1,4	40,11	34,3	1,99	1,4	37,1
	56	1,94		37,5		1,06		
	90	1,23		25,36		1,05		
V50a	28	0,99	1,5	29,95	28,4	0,62	0,4	30,3
	56	1,62		26,13		0,33		
	90	1,73		29,15		0,31		
V50b	28	2,33	1,5	37,64	37,4	2,72	1,3	40,2
	56	0,61		38,72		0,83		
	90	1,4		35,83		0,19		

Basınç dayanımının tahmini için (5.5) bağıntısı ile verilen bir diğer model Atzeni tarafından önerilmiş, bu bağıntıda basınç dayanımı, toplam porozite (p , %) ve ortalama boşluk yarıçapı (r_m , nm) ile ilişkilendirilmiştir. Bu modelin bu çalışmadaki deney sonuçlarına uyarlanması ile elde edilen sonuçlar Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Bağıntıdaki K sabit bir katsayıdır.

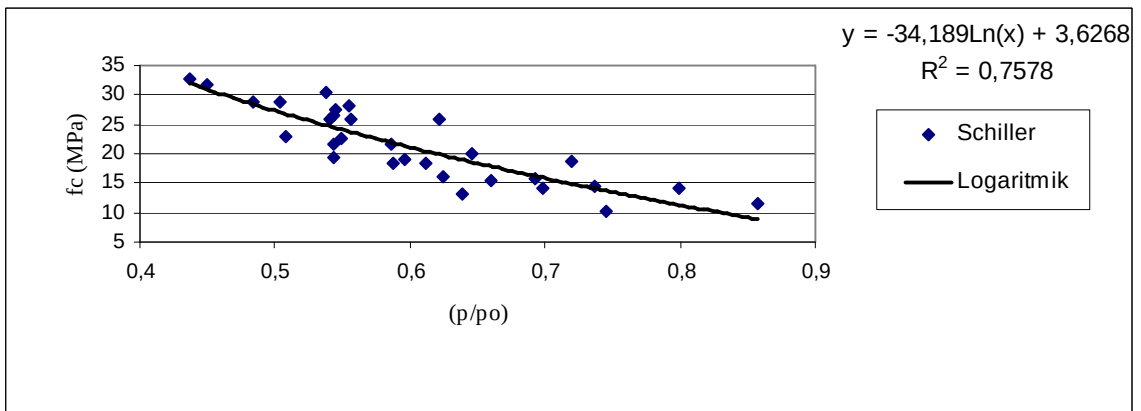
$$f_c = K \frac{(1-p)}{\sqrt{r_m}} \quad (5.5)$$



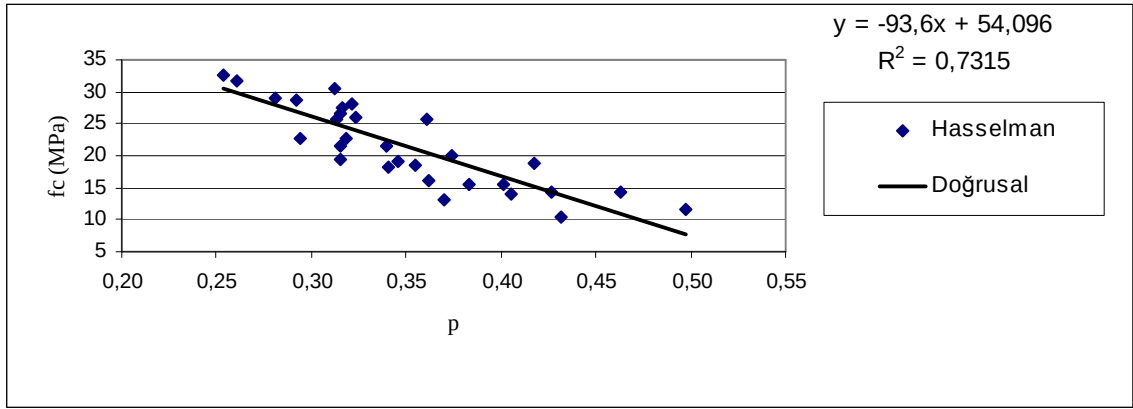
Şekil 5.1 Bal'shin modeli



Şekil 5.2 Ryshkewitch modeli

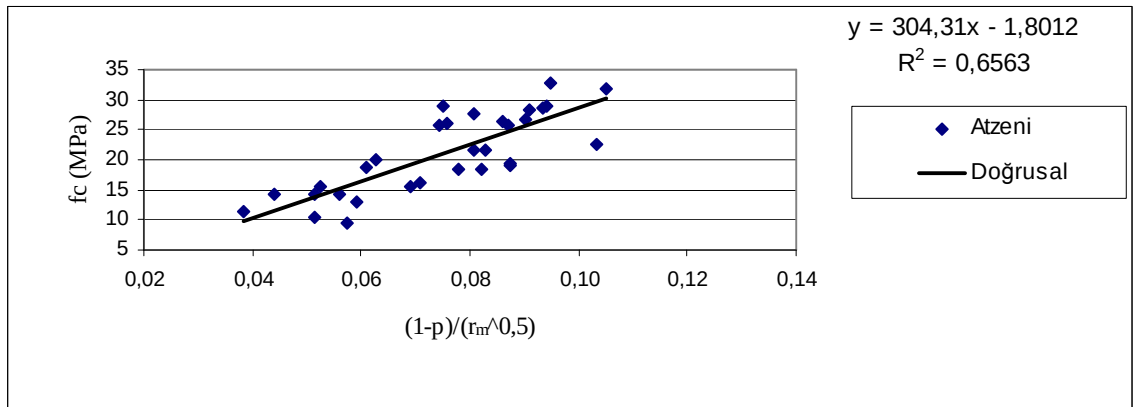


Şekil 5.3 Schiller modeli



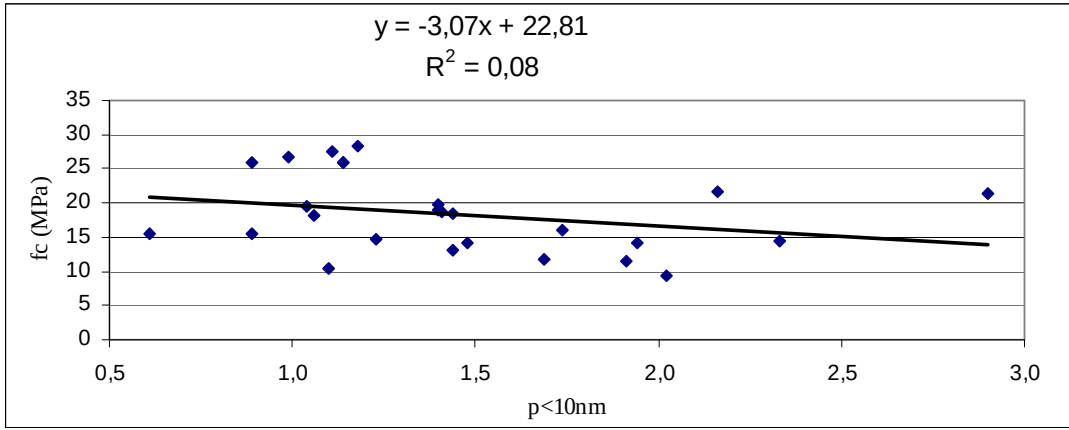
Şekil 5.4 Hasselman modeli

Şekil 5.1-5.4'te görüldüğü gibi basınç dayanımının hafif betonların porozitesi ile ilişkisi dikkate alındığında korelasyon katsayıları (r) 0,85 ile 0,87 arasında değişmiştir. Normal betonlar için önerilen bu modellerin, hafif betonların basınç dayanımının tahmininde kullanılabilmesi için güvenilirlik düzeylerinin araştırılması uygun olacaktır.



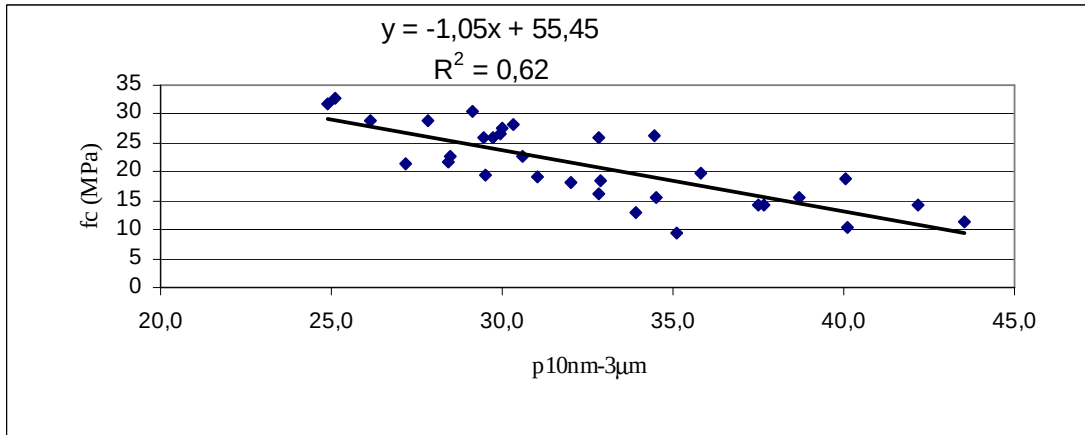
Şekil 5.5 Atzeni modeli

Şekil 5.5'te bu çalışma için sonuçları gösterilen Atzeni tarafından önerilen modelin ise basınç dayanımının tahmininde diğer modellere göre daha düşük korelasyon gösterdiği görülmüş, Kumar vd.'nin de (2003) belirttiği gibi bu modelin farklı parametrelerin birlikte kullanılması ile daha uygun sonuçlar verebileceği kanaatine varılmıştır. Basınç dayanımı ile boşluk dağılımı arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için Odler ve Röfler (1985) tarafından önerilen ve (2.9) bağıntısı ile verilen modeldeki yöntem kullanılmıştır. Betonlardaki boşluk yarıçapları 0-10nm, 10nm-3µm ve 100µm-625µm olmak üzere üç farklı aralığa bölünmüş, bu boşluk aralıklarındaki poroziteler hesaplanmış, basınç dayanımı ile arasında matematiksel ilişki araştırılmış, sonuçlar Şekil 5.6-5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.6 Basınç dayanımı - $\%p < 10\text{nm}$ arasındaki ilişki

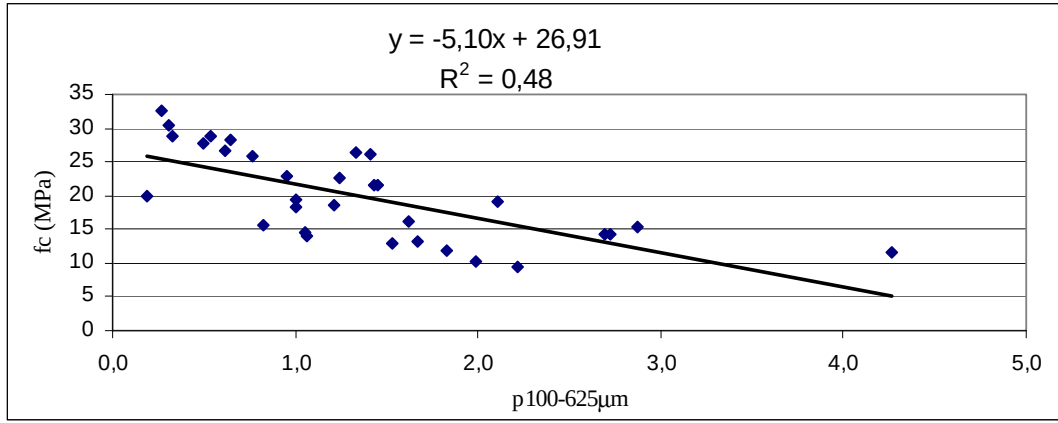
Şekil 5.6’da görüldüğü gibi 10 nm’nin altındaki boşluk yarıçaplarını kapsayan porozite %0,5 ile %3 arasında değişmiştir. Porozitenin artması ile basınç dayanımında meydana gelen azalma yaklaşık %25 olmuştur.



Şekil 5.7 Basınç dayanımı - $\%p_{10\text{nm}-3\mu\text{m}}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.7’de görüldüğü gibi 10 nm ile 3 μm arasındaki boşlukları kapsayan porozite %25 ile %45 arasında değişmiştir. Porozitenin artması ile basınç dayanımında meydana gelen azalma yaklaşık %67 olmuştur.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi 100 μm ile 625 μm arasındaki boşlukları kapsayan porozite yaklaşık %0,2 ile %4 arasında değişmiştir. Porozitenin artması ile basınç dayanımında meydana gelen azalma ise yaklaşık %80 olmuş, dayanım üzerinde etkin porozitenin bu boşluk aralığındaki porozite olduğu görülmüştür.

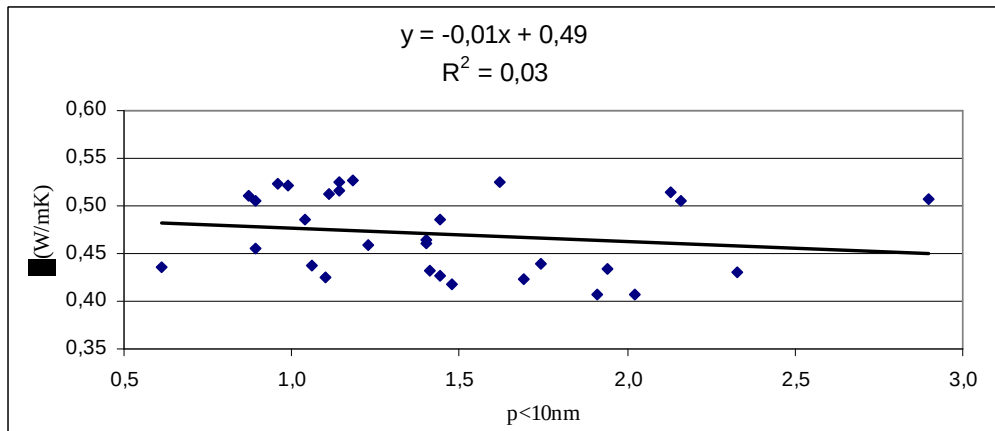


Şekil 5.8 Basınç dayanımı - $\%p_{100-625\mu\text{m}}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.6-5.8’de de görüldüğü gibi basınç dayanımını en çok 100-625 μm yarıçaplı boşluklara ait porozite etki etmiş, 10 nm’nin altındaki boşlukların dayanıma etkisi diğerlerinin yanında çok düşük kalmış, basınç dayanımına etki eden esas faktörün kapiler ve çapı 200 μm ’nin üstünde olan boşluklar olduğu görülmüştür. Bu durum Kumar vd. (2003) tarafından da ifade edilen, jel boşluklarının betonun basınç dayanımına etkisinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu görüşünü doğrulamaktadır.

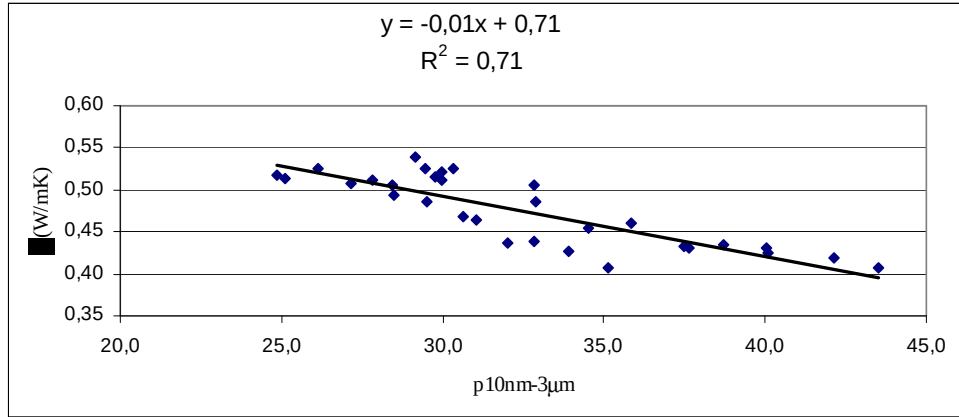
5.1.2 Isı iletim katsayısının boşluk parametreleri ile ilişkisi

Isı iletim katsayısı ile boşluk dağılımı arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için betonlardaki boşluklar basınç dayanımında olduğu gibi üç farklı aralığa bölünmüş, bu aralıklar için elde edilen porozite değerleri ile ısı iletim katsayısı arasında matematiksel ilişki araştırılmış, sonuçlar Şekil 5.9-5.11’de verilmiştir.



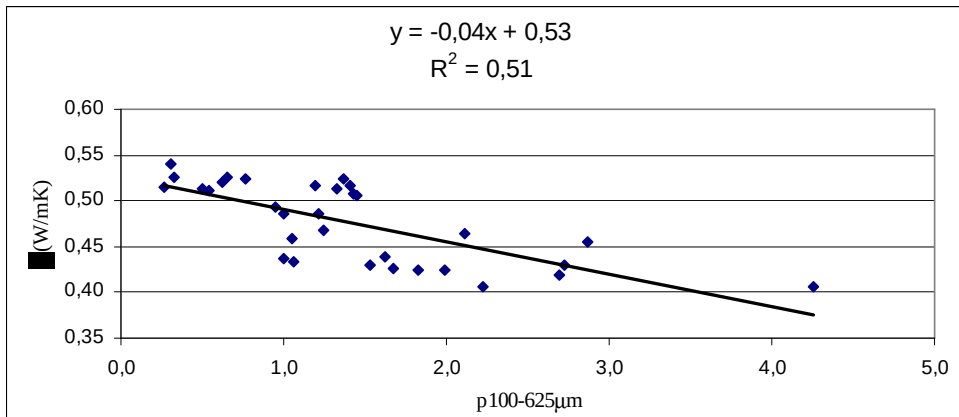
Şekil 5.9 Isı iletim katsayısı - $\%p_{<10\text{nm}}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.9’da görüldüğü gibi 10 nm’nin altındaki boşluk yarıçaplarını kapsayan porozitenin artması ile ısı iletim katsayısında meydana gelen azalma yaklaşık %6 olmuştur.



Şekil 5.10 Isı iletim katsayısı - $\%p_{10nm-3\mu m}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.10’da görüldüğü gibi 10 nm ile 3 µm arasındaki boşlukları kapsayan porozitenin artması ile ısı iletim katsayısında yaklaşık %25’lik azalma olmuştur.



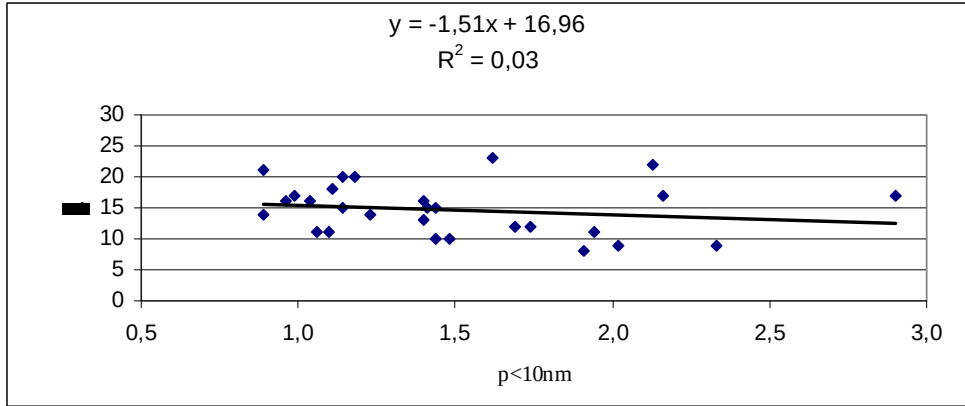
Şekil 5.11 Isı iletim katsayısı - $\%p_{100-625\mu m}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.11’de görüldüğü gibi 100 µm ile 625 µm arasındaki boşlukları kapsayan porozitenin artması ile ısı iletim katsayısında meydana gelen azalma yaklaşık %25 olmuştur. Şekil 5.9-5.11’de görüldüğü gibi 10 nm’nin altındaki boşlukların ısı iletim katsayısına belirgin bir etkisi olmamış, ısı iletiminde etkin olan boşlukların kapiler boşluklar ve hava boşlukları olduğu görülmüştür.

5.1.3 Su buharı difüzyon direnç faktörünün boşluk parametreleri ile ilişkisi

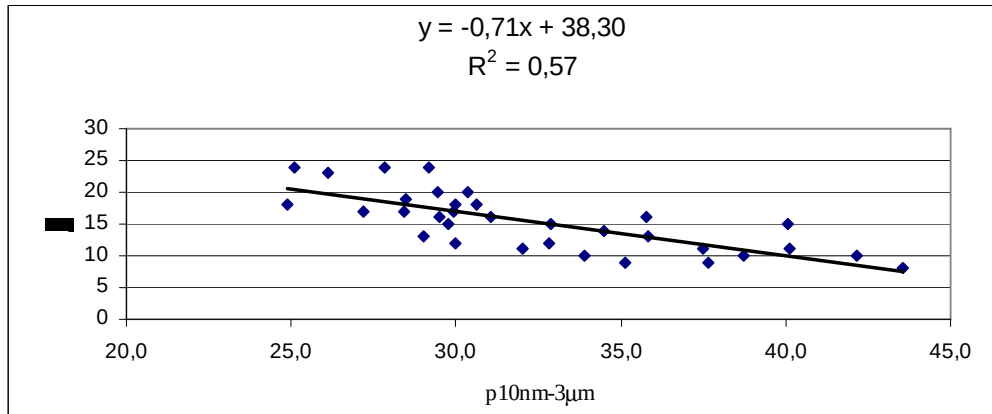
Su buharı difüzyon direnç faktörü ile boşluk dağılımı arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için

betonlardaki boşluklar aynı şekilde üç farklı aralığa bölünmüş, bu boşluk aralıklarındaki poroziteler hesaplanmış, porozite değerleri ile su buharı difüzyon direnç faktörü arasında matematiksel ilişki araştırılmış, sonuçlar Şekil 5.12-5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.12 Su buharı difüzyon direnç faktörü - %p<10nm arasındaki ilişki

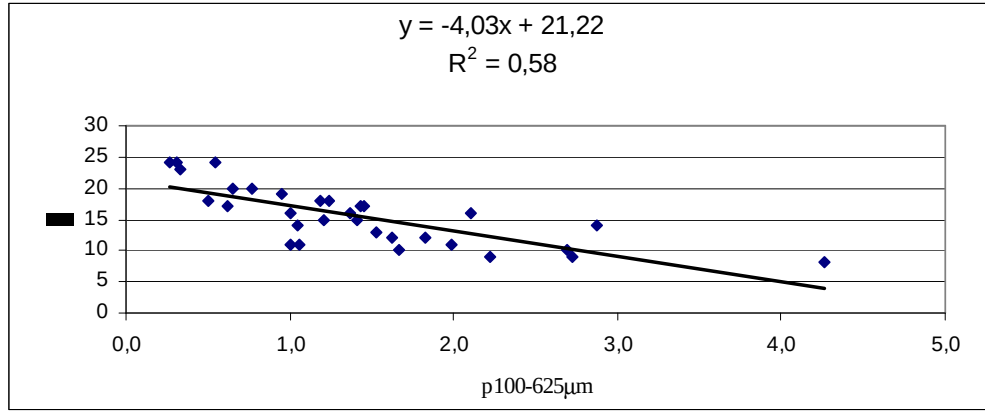
Şekil 5.12’de görüldüğü gibi 10 nm’nin altındaki boşluk yarıçaplarını kapsayan porozitenin artması ile su buharı difüzyon direnç faktöründe meydana gelen azalma yaklaşık %13 olmuştur.



Şekil 5.13 Su buharı difüzyon direnç faktörü - %p10nm-3μm arasındaki ilişki

Şekil 5.13’te görüldüğü gibi 10 nm ile 3 μm arasındaki boşlukları kapsayan porozitenin artması ile su buharı difüzyon direnç faktörü azalmış, bu azalma yaklaşık %60 oranında olmuştur.

Şekil 5.14’te görüldüğü gibi 100 μm ile 625 μm arasındaki boşlukları kapsayan porozitenin artması ile su buharı difüzyon direnç faktörü azalmış, meydana gelen azalma yaklaşık %80 olmuştur.



Şekil 5.14 Su buharı difüzyon direnç faktörü - $\%p_{100-625\mu m}$ arasındaki ilişki

Şekil 5.12-5.14 incelendiğinde su buharı difüzyon direnç faktörünün jel boşluklarından çok kapiler boşluklardan ve hava boşluklarından etkilendiği görülmüş, hava boşluklarının etkisinin diğer iki boşluğa göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

5.2 Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin İrdelenmesi

Fiziksel ve mekanik deneylerden elde edilen sonuçlara göre, hafif beton serileri Çizelge 2.2’de verilen sınıflandırmaya uygun olarak taşıyıcı ve taşıyıcı/yalıtım hafif betonları şeklinde Çizelge 5.2’de sınıflandırılmıştır. Bu betonların dengeli yoğunlukları (D_{eq}), ACI213R’de belirtildiği şekilde etüv kurusu yoğunluklarının 50 kg/m^3 artırılması ile elde edilmiştir.

Çizelge 5.2 Beton serilerinin sınıflandırılması

Beton Özelliği	Beton Serisi	$f_{c,küp}$ (MPa)	Beton Sınıfı	D_{eq} (kg/m^3)	λ (W/mK)	μ
Taşıyıcı	N35a	21,0	LC12/13	1476	0,48	15
	N35b	17,4	LC12/13	1313	0,45	14
	N50a	27,6	LC20/22	1518	0,52	15
	S35a	25,6	LC16/18	1518	0,51	17
	S50a	28,6	LC20/22	1545	0,51	18
	V35a	24,7	LC16/18	1476	0,51	17
	V50a	29,4	LC20/22	1530	0,52	17
	V50b	17,2	LC12/13	1314	0,43	9
Sınır Değerler (ACI 213R)		>17,0	--	1120–1920	--	--
Taşıyıcı/Yalıtım	N50b	15,9	LC8/9	1239	0,43	10
	S35b	12,4	--	1241	0,41	9
	S50b	11,7	--	1255	0,41	8
	V35b	10,5	--	1262	0,42	11
Sınır Değerler (Holm ve Ries, 2006)		3,4–17,0	--	800–1440	0,22–0,43	--

5.2.1 Beton serilerinin statik açıdan irdelenmesi

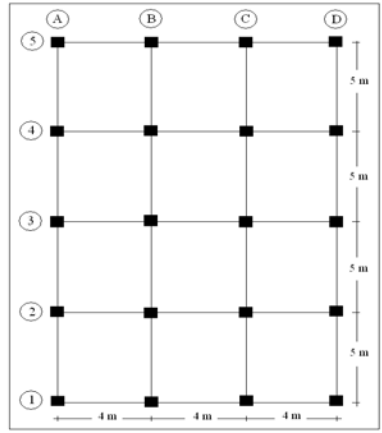
Yapının statik açıdan irdelenmesinde; C20/25 normal betonun standart değerleri, hafif betonun ise bu çalışmada üretilen ve LC20/22 beton sınıfını sağlayan serilerin mekanik ve fiziksel özellik değerleri esas alınmıştır. Planı Çizelge 5.4'te verilen X-X yönündeki aks açıklığı 4m, Y-Y yönündeki aks açıklığı 5m olan kolon çerçeveli 4 katlı ortogonal yapı, ETABS 3 boyutlu yapı analiz programından yararlanılarak modellenmiş, spektral analiz hesap yöntemi ile statik çözümler elde edilmiş, modellemede kullanılan malzeme bilgileri Çizelge 5.3'te, proje ile ilgili bilgiler ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 Modellemede kullanılan malzeme bilgileri

Malzeme Bilgileri	C 20/25	LC 20/22
f_{ck} (MPa)	20	20
E (MPa)	28500	11500
ν_{beton}	0,2	0,2
$\nu_{çelik}$	0,3	0,3
D (kg/m^3)	2400	1500

Kat yüksekliği 3 m alınan betonarme karkas binanın modellenmesinde, kiriş boyutları (b/h) 25/50 cm alınmış, kolon kesitleri kare olarak tasarlanmış ve minimum kolon boyutları 30x30 cm alınarak statik hesaba başlanmıştır. Kolon kesitleri, tüm çerçeve sistem için 5'er cm artırılarak en müsait kolon boyutu elde edilinceye kadar statik hesaba devam edilmiş, sonuçlar Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4 Proje bilgileri

Hesap yöntemi	Spektral Analiz	Yapının kat kalıp planı
Döşeme kalınlığı (cm)	12	
Kat yüksekliği (m)	3	
X yönündeki aks açıklığı (m)	4	
Y yönündeki aks açıklığı (m)	5	
Kolon geometrisi	Kare	
Kiriş boyutları (cm)	25x50	
q (Hareketli yük)	5 kN/m^2	
Zemin sınıfı	Z-C3	
A_0 (Etkin yer ivmesi katsayısı)	0,4	
I (Yapı önem katsayısı)	1	
R (Yapı davranış katsayısı)	8	

Bu sonuçlara göre C20/25 beton sınıfına sahip normal betonda kolon kesitleri 50x50 cm, LC20/22 beton sınıfına sahip normal betonlarda ise 40x40 cm olarak belirlenmiştir. Kolon

donatılarındaki değişim 2. katta iki doğrultudaki C ve 3 aksları için irdelenmiş, hafif beton kullanımı ile kolon kesitinde ve donatıdaki değişim oranları Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.5 Statik hesap sonuçları ve değişim oranları

Yapı Elemanı	C20/25		LC20/22		Değişim (%)	
	Kesit (cm ²)	Donatı Alanı (cm ²)	Kesit (cm ²)	Donatı Alanı (cm ²)	Kesitte	Donatıda
Kolon	2500	97,55	1600	57,16	-36	-41
Kiriş	1250	3,69	1250	2,65	*	-28

*: Statik çözümde giriş boyutları her iki beton sınıfı için sabit alınmıştır.

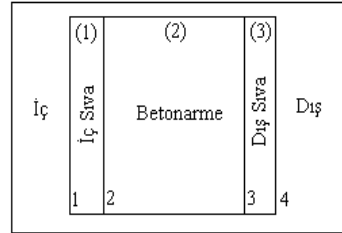
Elde edilen sonuçlara göre bu yapıda hafif beton kullanılması durumunda zati yükün azalması nedeni ile kolon kesitlerinde % 36'lık bir azalma meydana gelmiştir. Donatılardaki azalma ise kolonlarda %41, kirişlerde %28 olarak belirlenmiştir.

5.2.2 Beton serilerinin ısı yalıtımı açısından irdelenmesi

Seçilen duvar kesitinde betonarme perdenin C20/25 normal betonu veya LC20/22 taşıyıcı hafif betonundan yapılması durumu için TS 825'e uygun olarak yoğuşma kontrolü yapılmıştır. Hesaplamalarda esas alınan malzeme özellikleri Çizelge 5.6'da, ortam şartları ile ilgili bilgiler Çizelge 5.7'de, sonuçlar Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.6 Duvar kesiti ve malzeme bilgileri

Malzeme		Kalınlık d (m)	Isı iletim katsayısı λ (W/mK)	Su buharı dif.direnç faktörü μ	Yoğuşma kontrolü yapılan duvarın kesiti
İç Sıva		0,04	1,4	25	
Betonarme	Normal Beton	0,20	2,50	130	
	Hafif Beton		0,75	18	
Dış Sıva		0,04	0,2	15	



Yoğuşma hesabında TS 825'teki örneklerden yararlanılarak hafif beton ile hazırlanan betonarme elemanın ısı iletim katsayısı, hafif betonun ısı iletim katsayısının %50, su buharı difüzyon direnç faktörü ise %10 artırılması ile hesaplanmıştır.

Yoğuşma kontrolü, 2. derece gün bölgesi için İstanbul İli dikkate alınarak yapılmış, hesaplar aşağıda gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 İstanbul ili için iklim şartları (TS 825)

Ortam Şartları	İç Ortam	Dış Ortam	
Hava sıcaklığı (°C)	20	Aralık	3,8
		Ocak	2,9
		Şubat	4,4
Bağıl nem (%)	65	Aralık	80
		Ocak	79
		Şubat	76
Yüzey ısı iletim direnci ($R_{i,e}$, m ² K/W)	0,25	0,04	

Isıl geçirgenlik direnci (R), tek tek yapı elemanı kalınlıkları ($d_1, d_2, \dots, d_n$) ve bu yapı elemanlarının ısı iletkenlik katsayısı değerleri ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$) kullanılarak 5.1 bağıntısı ile hesaplanmıştır.

$$R = \sum \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (5.1)$$

Toplam ısı geçirgenlik direnci ($1/U$), yapı bileşenlerinin ısı geçirgenlik dirençlerine (R), yüzey ısı iletim direnç değerleri (R_i, R_e) eklenerek 5.2 bağıntısı ile hesaplanmış, toplam ısı geçirgenlik katsayısı (U , W/m².K) belirlenmiştir.

$$\frac{1}{U} = R_i + R + R_e \quad (5.2)$$

Isı akış yoğunluğu ($\dot{q}$), (5.3) bağıntısında görüldüğü gibi yapı bileşeninin toplam ısı geçirgenlik katsayısının (U , W/m².K) yapı bileşenine etkiyen iç ve dış ortam sıcaklık farkı ile çarpımından hesaplanmıştır.

$$\dot{q} = U \cdot (T_i - T_e) \quad (5.3)$$

Yapı bileşeninin iç yüzey sıcaklığı (T_{yi}) ve dış yüzey sıcaklığı 5.4 ve 5.5 bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_{yi} = T_i - R_i \cdot \dot{q} \quad (5.4)$$

$$T_{yd} = T_e + R_e \cdot \dot{q} \quad (5.5)$$

Malzemeler arasındaki her bir ara yüzey için sıcaklıklar aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanmıştır. Yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak suyun doymuş buhar basıncı 5.7 ve 5.8 bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_n = T_{n-1} - R_n \cdot q \quad (5.6)$$

$$P_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot T}{237,3+T}} \quad T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C için} \quad (5.7)$$

$$P_s = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot T}{265,5+T}} \quad T < 0 \text{ } ^\circ\text{C için} \quad (5.8)$$

Su buharı difüzyonu eş değer hava tabakası kalınlığı, S_d (m), her bir tabakanın su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) ile kalınlığının (d , m) çarpımından hesaplanmıştır. Her bir katmanın buhar difüzyonu eş değer hava tabakası kalınlığına (S_d) göre yapı elemanının kesiti çizilmiş, katmanlar arasında herbir ara yüzeydeki doymuş buhar basınçlarının lineer olduğu kabul edilmiş, iç ve dış buhar basıncı (P_i ve P_d) arası düz bir çizgi ile birleştirilerek buhar basınç profili çizilmiştir. Bu çizginin herhangi bir ara yüzeyde doyma basıncını aşıp aşmadığı araştırılmış, sonuçlar Çizelge 5.8 ve 5.9’da verilmiştir. Su buharı kısmi basıncının, doymuş su buharı basıncını aştığı yerler yoğuşma bölgesi olarak belirlenmiş ve Şekil 5.15-5.17 üzerinde işaretlenmiştir.

Çizelge 5.8 Normal betonlu kesitte yoğuşma kontrolü sonuçları

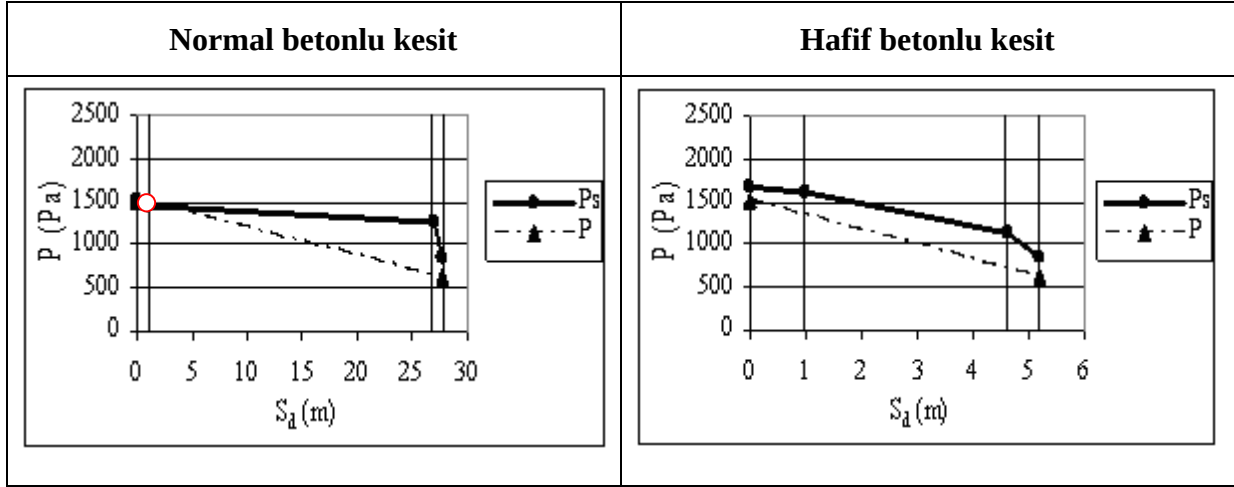
Yüzey No	Yüzey Sıcaklığı T (°C)			Doymuş Su Buharı Basıncı (P_s , Pa)			Su Buharı Kısmi Basıncı (P, Pa)		
	Aralık	Ocak	Şubat	Aralık	Ocak	Şubat	Aralık	Ocak	Şubat
İç	20	20	20	2337	2337	2337	1519	1519	1519
1	13,2	12,9	13,5	1520	1483	1545	1519	1519	1519
2	12,5	12,0	12,7	1445	1406	1472	1487	1486	1487
3	10,3	9,8	10,7	1252	1207	1282	660	614	655
4	4,9	4,0	5,4	865	815	899	641	594	635
Dış	3,8	2,9	4,4	801	752	836	641	594	635

Çizelge 5.9 Hafif betonlu kesitte yoğuşma kontrolü sonuçları

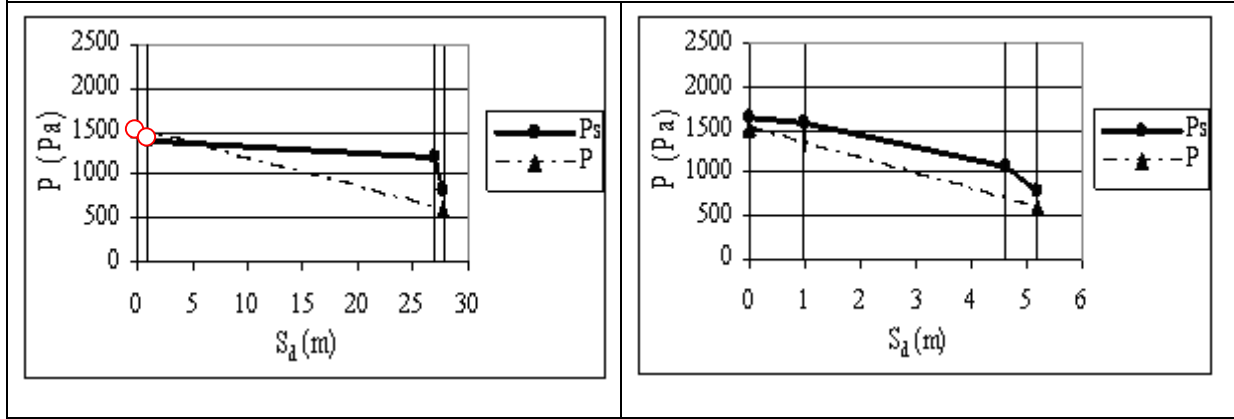
Yüzey No	Yüzey Sıcaklığı (T, °C)			Doymuş Su Buharı Basıncı (P_s , Pa)			Su Buharı Kısmi Basıncı (P, Pa)		
	Aralık	Ocak	Şubat	Aralık	Ocak	Şubat	Aralık	Ocak	Şubat
İç	20	20	20	2337	2337	2337	1519	1519	1519
1	14,8	14,6	15,0	1687	1656	1708	1519	1519	1519
2	14,3	13,9	14,5	1624	1591	1647	1350	1341	1349
3	8,8	8,1	9,2	1128	1081	1161	742	701	737
4	4,6	3,8	5,2	849	800	884	641	594	635
Dış	3,8	2,9	4,4	801	752	836	641	594	635

TS 825’e uygun olarak Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7’de verilen şartlara göre yapılan yoğuşma kontrolü sonuçlarına göre betonarme perde elemanda normal beton kullanılması durumunda

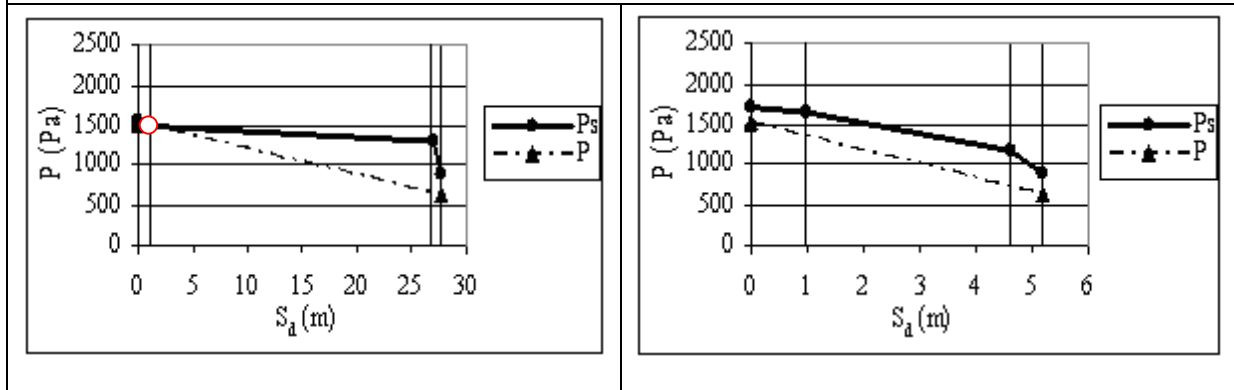
Aralık, Ocak ve Şubat aylarında yoğuşma meydana gelmiş, bu elemanın hafif beton seçilmesi durumunda ise yoğuşmaya rastlanmamıştır.



Şekil 5.15 Aralık ayı için buhar basınç grafiği



Şekil 5.16 Ocak ayı buhar basınç grafiği



Şekil 5.17 Şubat ayı buhar basınç grafiği

Bu çalışmada üretilen LC20/22 sınıf dayanımlı hafif beton ile C20/25 sınıf dayanımlı normal betonun statik ve ısı yalıtımı açısından karşılaştırılmasından elde edilen sonuçlar ve hafif beton kullanılması durumundaki kazanç (%) Çizelge 5.10’da özetlenmiştir.

Çizelge 5.10 Hafif beton ile normal betonun statik ve ısı yalıtımı açısından değerlendirilmesi

Beton Cinsi	Kolon Kesiti (cm ²)	Donatı Alanı (cm ²)		Isıl geçirgenlik direnci (1/U, m ² K/W)	Yoğuşma
		Kolon	Kiriş		
C20/25 Betonu	2500	97,55	3,69	0,599	VAR (-)
LC20/22 Betonu	1600	57,16	2,65	0,785	YOK (+)
Kazanç (%)	36	41	28	31	VAR (+)

5.3 Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada agregaların farklı doyurma yöntemine, çimento dozuna, hava sürükleyici kullanılmasına göre üretilen 12 farklı beton serisinin birbiri ile karşılaştırılması ve birbirlerine göre üstünlüğünün araştırılması amacı ile taze ve sertleşmiş betonlarda yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar boyutsuz sayılar ile karşılaştırılmıştır. Bunun için beton serilerin 28. gündeki mekanik ve fiziksel deney sonuçları N35a (laboratuvar nemliliğinde ponza agregalı, 350 dozlu, hava sürükleyicisiz beton) betonunun 28. gündeki değerlerine oranlanarak bağlı değerler belirlenmiş, özelliklerdeki olumlu değişimler (+), olumsuz değişimler (-), değişim olmamış ise (0) ile ifade edilmiştir.

Bu irdeleme taze ve sertleşmiş beton için ayrı ayrı yapılmış, taze betonda slump’ın artması olumlu (+), Ve-Be süresinin artması ise olumsuz (-) olarak dikkate alınmıştır. Sertleşmiş betonda basınç dayanımının (f_c), elastisite modülünün (E), dayanım/yoğunluk oranının artması olumlu (+), hacimce su emmenin (h_s), ısı iletim katsayısının (λ), etüv kurusu yoğunluğun (D_{EK}) ve rötreinin (ϵ_r) artması ise olumsuz (-) olarak dikkate alınmıştır. Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ) ise incelenen yapı elemanının kesiti dikkate alınarak (+) veya (-) olarak değerlendirilebilir. Bu çalışmadaki kesitte su buharı difüzyon direnç faktörünün artması olumlu (+) olarak dikkate alınmıştır.

Belirlenen bu değerlerin tam sayı ile ifade edilebilmesi ve beton serilerin birbiri ile karşılaştırılabilmesi için yapılan değer analizinde her bir özellikte maksimum ve minimum arasındaki mutlak değer eşit adımlara bölünmüş, her bir aralık tam sayı ile ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlar taze ve sertleşmiş beton için Çizelge 5.11-5.15’te verilmiştir.

5.3.1 Taze beton özelliklerinin karşılaştırılması

Taze betonda çökme (H , cm), Ve-Be süresi (t_v , sn), süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı (SA , kg) ve agregaların suya doyurulması için geçen süre (t_{sd} , dak) dikkate alınarak değer analizi yapılmış, sonuçlar Çizelge 5.11’de verilmiştir.

Çizelge 5.11 Taze beton özelliklerinin karşılaştırılması

Kod	Deney Sonuçları				Bağıl Değerler (%)				Tam Sayı ile İfadesi				Sonuç	
	H	t_v	SA	Puan	Puan	t_v	SA	t_{sd}	Çökme	VeBe	SA	t_{sd}	Puan	Toplam Puan
N35a	5	4	7,7	0,5	Referans				0	0	0	0	0	50
N35b	13	3	7,7	0,5	100	100	100	100	5	2	1	0	8	
N50a	17	2	5	0,5	160	-25	0	0	8	5	3	0	16	
N50b	25	0	5	0,5	240	-50	-35	0	13	10	3	0	26	
S35a	10	4	5,6	24	400	-100	-35	0	3	1	2	-5	1	70
S35b	24	0	5,6	24	100	0	-27	4700	12	10	2	-5	19	
S50a	21	1	0	24	380	-100	-27	4700	10	7	10	-5	22	
S50b	25	0	0	24	320	-75	-100	4700	13	10	10	-5	28	
V35a	13	3	5,6	0,2	400	-100	-100	4700	5	2	2	1	10	97
V35b	23	0	5,6	0,2	160	-25	-27	-60	12	10	2	1	25	
V50a	21	1	0	0,2	360	-100	-27	-60	10	7	10	1	28	
V50b	25	0	0	0,2	320	-75	-100	-60	13	10	10	1	34	

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek değeri 97 puan ile vakum yöntemi ile suya doyurulan ponza agregalı beton seriler (V) almıştır. Suya doymuş ponza agregalı beton serilerinin (S) toplam değeri 70, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı beton serilerinin toplam değeri ise 50 olmuştur.

5.3.2 Sertleşmiş beton özelliklerinin karşılaştırılması

Sertleşmiş betonda değer analizi mekanik ve fiziksel özellikler için ayrı ayrı yapılmış, mekanik özelliklerden basınç dayanımı (f_c , MPa), elastisite modülü (E , MPa) ve dayanım/yoğunluk oranı (f_c/D), fiziksel özelliklerden hacimce su emme oranı (h_s , %), su buharı difüzyon direnç faktörü (μ), ısı iletim katsayısı (λ , W/mK), etüv kurusu yoğunluk (D_{EK} , kg/m³) ve rötre (ϵ_r , $\times 10^{-4}$ mm/mm) dikkate alınmış, elde edilen sonuçlar Çizelge 5.12 ve Çizelge 5.13’te verilmiştir. Mekanik özellikler için yapılan değer analizi sonuçlarına göre N serisi -4 toplam değeri ile en iyi performansı göstermiştir. V serisinin toplam değeri -11, S serisinin toplam değeri ise -17 olmuştur.

Çizelge 5.12 Mekanik özelliklerin karşılaştırılması

Kod	Deney Sonuçları			Bağıl Değerler (%)			Tam Sayı ile İfadesi			Sonuç	
	f_c	E	f_c/D	f_c	E	f_c/D	f_c	E	f_c/D	Puan	Toplam Puan
N35a	18,5	9082	13,0	Referans			0	0	0	0	-4
N35b	15,4	7318	12,2	-16,8	-19,4	-6,2	-2	-3	-1	-6	
N50a	26,0	11928	17,7	40,5	31,3	36,2	4	3	4	11	
N50b	13,1	6009	11,0	-29,2	-33,8	-15,2	-3	-4	-2	-9	
S35a	21,5	8229	14,6	16,2	-9,4	12,7	1	-2	1	0	-17
S35b	9,4	4924	7,9	-49,2	-45,8	-39,3	-5	-6	-5	-16	
S50a	27,6	12508	18,5	49,2	37,7	42,0	4	4	5	13	
S50b	11,5	4296	9,5	-37,8	-52,7	-26,6	-4	-6	-4	-14	
V35a	21,6	9785	15,1	16,8	7,7	16,5	1	0	2	3	-11
V35b	10,3	5418	8,5	-44,3	-40,3	-34,6	-5	-5	-5	-15	
V50a	26,6	9966	18,0	43,8	9,7	38,3	4	1	4	9	
V50b	14,4	7305	11,4	-22,2	-19,6	-12,4	-3	-3	-2	-8	

N serisinin mekanik özellik açısından değer analizinde en yüksek puanı almasının sebebi N35b betonunun mekanik özelliklerinin doygun ponza agregalı serilere göre oldukça yüksek olmasıdır. Suyu doygun ponza agregalı serilere (S, V) hava sürükleyici ilavesi mekanik özelliklerde büyük azalmalara yol açarken N serisindeki azalma çok daha düşük olmuştur. Fiziksel özellikler için yapılan değer analizi sonuçlarına göre N serisi betonları -9 değeri ile yine en iyi performansı göstermiş, V serisi betonları -10, S serisi betonları ise -14 toplam değerini almıştır.

Çizelge 5.13 Fiziksel özelliklerin karşılaştırılması

Kod	Deney Sonuçları					Bağıl Değerler (%)					Değer Analizi					Sonuç	
	h_s	μ	λ	Puan	Puan	h_s	μ	λ	D	ϵ_r	h_s	μ	λ	D	ϵ_r	Puan	Toplam Puan
N35a	20	15	0,48	1426	8,23	Referans					0	0	0	0	0	0	-9
N35b	19	14	0,45	1263	8,35	-5	-6,7	-6,3	-11,4	1,5	1	-1	2	5	-1	6	
N50a	24	15	0,52	1468	9,19	20	0,0	8,3	2,9	11,7	-5	1	-4	-2	-2	-12	
N50b	21	10	0,43	1189	11,88	5	-33,3	-10,4	-16,6	44,3	-2	-5	4	7	-7	-3	
S35a	23	17	0,51	1468	7,9	15	13,3	6,3	2,9	-4,0	-4	1	-3	-2	1	-7	-14
S35b	20	9	0,41	1191	8,27	0	-40,0	-14,6	-16,5	0,5	1	-6	6	7	-1	7	
S50a	26	18	0,51	1495	8,65	30	20,0	6,3	4,8	5,1	-7	2	-3	-3	-1	-12	
S50b	24	8	0,41	1205	9,65	20	-46,7	-14,6	-15,5	17,3	-5	-7	6	7	-3	-2	
V35a	24	17	0,51	1426	6,04	20	13,3	6,3	0,0	-26,6	-5	1	-3	1	3	-3	-10
V35b	21	11	0,42	1212	6,25	5	-26,7	-12,5	-15,0	-24,1	-2	-4	5	6	3	8	
V50a	28	17	0,52	1480	7,92	40	13,3	8,3	3,8	-3,8	-9	1	-4	-2	1	-13	
V50b	25	9	0,43	1264	8,13	25	-40,0	-10,4	-11,4	-1,2	-6	-6	4	5	1	-2	

Bu çalışmada üretilen betonların performansı değer analizi yöntemi kullanılarak taze beton ve sertleşmiş beton için yukarıda ayrı ayrı irdelenmiş, sonuçlar Çizelge 5.14 ve Çizelge 5.15'te özetlenmiştir.

Çizelge 5.14 Beton serilerinin karşılaştırılması

Kod	Taze Beton	Sertleşmiş Beton		Toplam Puan
		Mekanik	Fiziksel	
N35a	0	0	0	0
S35a	1	0	-7	-6
V35a	10	3	-3	10
N35b	8	-6	6	8
S35b	19	-16	7	10
V35b	25	-15	8	18
N50a	16	11	-12	15
S50a	22	13	-12	23
V50a	28	9	-13	24
N50b	26	-9	-3	14
S50b	28	-14	-2	12
V50b	34	-8	-2	24

Çizelge 5.14'te görüldüğü gibi taze ve sertleşmiş deney sonuçları beraber dikkate alındığında en iyi performansı V50a, V50b ve S50a beton serileri göstermiştir.

Çizelge 5.15 Beton özelliklerinin agrega doygunluğuna göre karşılaştırılması

Kod	Taze Beton	Sertleşmiş Beton		Toplam Puan
		Mekanik	Fiziksel	
N	50	-4	-9	37
S	70	-17	-14	39
V	97	-11	-10	76

Bu sonuçlara göre taze ve sertleşmiş beton özellikleri birlikte değerlendirildiğinde Çizelge 5.15'te görüldüğü gibi vakum ile suya doyurulan ponza agregalı betonlar (V) toplam 76 değeri ile en iyi performansı göstermiştir. Suyu doymuş ponza agregalı betonlar (S) 39 puan almış, laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonlar (N) ise toplam 37 değeri ile en kötü performansı göstermiştir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, üretim yöntemleri ve karışım özellikleri farklı 12 seri beton üretilmiş, bu betonların taze ve sertleşmiş özellikleri belirlenmiştir. Beton üretiminde, sadece ponza hafif agregası ve CEMI 42.5R çimentosu kullanılmış, kohezyonun artırılması amacı ile betona herhangi bir mineral katkı maddesi ilave edilmemiştir. İki farklı çimento dozajı ve sabit su/çimento oranı dikkate alınarak planlanan çalışmada hafif agregalı betonun durabilite özellikleri kapsam dışı bırakılmıştır. Bundan dolayı farklı oranlarda mineral ve kimyasal katkıların hafif beton özelliklerine etkileri araştırılmalı, durabilite özellikleri belirlenmelidir.

Deneysel çalışmada betonun boşluk yapısı genel olarak dikkate alınmış, harç fazı ve agrega fazı ayrı ayrı değerlendirilmemiştir. Betondaki boşluk yapısının harç fazı ve agrega fazı için ayrı ayrı incelenip değerlendirilerek mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak kompozit modeller oluşturulması, boşluk yapısının bu özelliklere etkisini daha belirgin olarak ortaya koyacaktır.

Deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara, yapılan analiz ve irdellemelere göre hafif betonun normal betona göre daha iyi ısı yalıtımı sağladığı ve seçilen bir kesitte yapılan statik analiz sonuçlarına göre yapı elemanlarının kesitlerinde ve donatı miktarında önemli miktarda azalma sağladığı görülmüştür. Hafif betonun bu avantajlarının daha iyi irdelenebilmesi için üretim yöntemine ve malzeme miktarlarına bağlı olarak maliyet analizinin yapılarak bu açıdan da normal betonla kıyaslanması yararlı olacaktır.

Bu çalışmadaki taze ve sertleşmiş beton deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve irdelenmesinden elde edilen sonuçlara göre;

- Hafif betonda boşluk boyutu, dağılımı ve oranı ile mekanik ve fiziksel özellikler arasında tutarlı ilişki olduğu görülmüştür.
- Beton üretiminde kullanılan ponza agregalarının suya doyurulması ile taze betonun işlenebilirliği artmış, kalıbına kolaylıkla yerleştirilebilen kohezyonu yüksek hafif betonlar elde edilmiştir.
- Taze betonda işlenebilme açısından vakum ile suya doyurulan ponza agregalı betonların (V) diğer iki seriden daha üstün olduğu, en kötü performansı laboratuvar nemliliğindeki ponza agregalı betonların (N) gösterdiği belirlenmiştir. Taze ve sertleşmiş beton özellikleri birlikte dikkate alındığında vakum ile suya doyurulan ponza agregalı betonların (V) en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür.

- Agregaların suya doyurulması, mekanik özelliklere olumlu etki yapmış, ponza agregası ile sınıf dayanımı LC 20/22 olan taşıyıcı hafif betonlar üretilmiştir. Basınç dayanımına etki eden esas faktörün kapiler boşluklar ve çapı 200 μm 'nin üzerinde olan boşluklar olduğu görülmüştür.
- Deneysel çalışma kapsamında uygulanan üretim teknikleri ile normal betonun ısı iletim katsayısının yaklaşık 1/3'ü, etüv kurusu yoğunluğunun yaklaşık 1/2'si olan taşıyıcı ve taşıyıcı/yalıtım özellikli betonlar üretilmiştir.
- Isı iletim katsayısına 10 nm'nin altındaki boşlukların belirgin bir etkisinin olmadığı, ısı iletiminde kapiler boşluklar ve hava boşluklarının etkin olduğu belirlenmiştir.
- Su buharı difüzyon direnç faktörünün jel boşluklarından çok kapiler boşluklardan ve hava boşluklarından etkilendiği görülmüş, hava boşluklarının etkisinin diğer iki boşluğa göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.
- Hafif beton kullanımı ile yapıların ısı geçirgenliğinin azaldığı ve seçilen kesit için yapılan tahkikte yoğunlaşma oluşmadığı görülmüştür.
- Agregaların vakum yöntemi ile suya doyurulduğu betonların rötresinin diğerler iki serininkinden daha düşük olduğu görülmüştür.
- Hafif beton kullanımı ile yapılarda taşıyıcı eleman kesitlerinin küçüldüğü, kolon ve kiriş donatılarının önemli oranda azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak hafif beton üretiminde yeterli işlenebilmenin sağlanması en önemli sorunlardan biridir. Bu sorun, hafif agregaların vakum yöntemi ile suya doyurulması ile en iyi şekilde giderilmiştir. Hafif agregaların bu çalışmada geliştirilen vakum yöntemi ile suya doyurulması üretim sürecini kısaltmış, taze beton özelliklerini iyileştirmiş, sertleşmiş beton özelliklerine olumlu etki yapmıştır. Bu yöntemin hafif beton üretim tesisine entegre edilmesi, hafif beton üretimine kalite ve zaman açısından katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Abell, A.B., Willis, K.L., Lange, D.A., (1999), “Mercury Intrusion Porosimetry and Image Analysis Of Cement-Based Materials”, *Journal of Colloid and Interface Science*, 211:39-44.
- ACI 213R-03, (2003), “Guide For Structural Lightweight-Aggregate Concrete”.
- Akman, S., (2007), “Betonun Plastik Rötresi”, 7-12, *Teknik Bülten – Makaleler*, Sika, Akkaya, Y., (Der.), İstanbul.
- Akçay, B. ve Taşdemir, M.A., (2008), “Optimisation of Using Lightweight Aggregates in Mitigating Autogenous Deformation of Concrete”, *Construction and Building Materials* (baskıda).
- Akman, S., (2000), *Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, İstanbul.
- Aköz, F., Üstün, B. ve Çakır, Ö., (2001), “Binalarda Isı Yalıtımının Enerji Tasarrufuna ve Çevre Kirliliğine Etkileri”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yalıtım Kongresi, 23-24-25 Mart 2001, Eskişehir, Türkiye.
- Alduaij, J., Alshaleh, K., Haque, N. ve Ellaithy, K., (1999), “Lightweight Concrete in Hot Coastal Areas”, *Cement and Concrete Research*, 21:453-458.
- Atzeni, C., Massidda, L. ve Sana, U., (1987), “Effect of Pore Size Distribution on Strength of Hardened Cement Pastes”, *Proceedings of the First International RILEM Congress on Pore Structure and Material Properties*, 1987, Paris.
- Babu, K., G. ve Babu, D., S., (2003), “Behaviour of Lightweight Expanded Polystyrene Concrete Containing Silica Fume”, *Cement and Concrete Research*, 33:755-762.
- Bagel, L. ve Zivica, V., (1997), “Relationship Between Pore Structure and Permeability of Hardened Cement Mortars: on the Choice of Effective Pore Structure Parameter”, *Cement and Concrete Research*, 27:1225-1235.
- Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., (2002), *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.
- Bargel, H., J. ve Schulze, G., (1993), *Malzeme Bilgisi*, (Çev., Ş. Güleç ve A. Aran), Cilt I, İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- Bhattacharjee, B. ve Krishnamoorthy, S., (2004), “Permeable Porosity and Thermal Conductivity of Construction Materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(4):322-330.
- Bouguerra, A., Ledhem, A., Barquin, F., Dheilily, R.M. ve Queneudec, M., (1998), “Effect of Microstructure on the Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Concrete Prepared from Clay, Cement, and Wood Aggregates”, *Cement and Concrete Research*, 28(8):1179-1190.
- Bremner, T., W., Holm, T., A. ve Stepanova, V., F., (1994), “Lightweight Concrete – A Proven Material For Two Millennia”, *Proceedings of Advances in Cement and Concrete*, 24-29 July 1994, New Hampshire.
- Bremner, T., W. ve Holm, T., A., (1995), “High Performance Concrete – A Review”, *Second*

CANMET/ACI International Symposium, 1995, Las Vegas, Nevada.

Bremner, T., W., (1996), "Durability of Lightweight Concrete", Symposium on Lightweight Concrete Bridges, 10 September 1996, California.

Bremner, T., W., (1998), "Lightweight Concrete an Environmentally-Friendly Material", International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry, 21-23 October 1998, Ottawa, Canada.

Bremner, T. ve Holm, T., A., (1999), "Lightweight Aggregate Concrete for High Performance", International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development in the Twenty-First Century, 9-11 February 1999, Hyderabad, India.

Chandra, S. ve Berntsson, L., (2003), Lightweight Aggregate Concrete Science, Technology, and Applications, Noyes Publications, William Andrew Publishing, New York.

Chen, B. ve Liu, J., (2005), "Contribution of Hybrid Fibers on the Properties of the High-strength Lightweight Concrete Having Good Workability", Cement and Concrete Research, 35:913-917.

Chi, J., M., Huang, R., Yang, C., ve Chang, J., J., (2003), "Effect of Aggregate Properties on the Strength and Stiffness of Lightweight Concrete", Cement and Concrete Composites, 25:197-205.

Chia, K., S. ve Zhang, M., (2002), "Water Permeability and Chloride Penetrability of High-strength Lightweight Aggregate Concrete", Cement and Concrete Research, 32:639-645.

Clarke, J., L., (1993), Structural Lightweight Aggregate Concrete, Chapman&Hall, Great Britain.

Colaco, J., P., (2004), "One Shell Plaza, Houston", Practice Periodical on Structural Design and Construction, 9(2):79-82.

Cook, R., A.ve Hover, K., C., (1999), "Mercury Porosimetry Of Hardened Cement Pastes", Cement and Concrete Research, 29:933-943.

Dağsöz, A., K., (1995), Isı Geçiş İsi Transferi, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Demirboğa, R., Örüng, İ. ve Gül, R., (2001), "Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on the Compressive Strength of Low-density Concretes", Cement and Concrete Research, 31:1627-1632.

Demirboğa, R. ve Gül, R., (2003), "The Effects of Expanded Perlite Aggregate, Silica Fume and Fly Ash on the Thermal Conductivity of Lightweight Concrete", Cement and Concrete Research, 33:723-727.

Düzgün, O., A., Gül, R. ve Aydın, A., C., (2005), "Effect of Steel Fibers on the Mechanical Properties of Natural Lightweight Aggregate Concrete", Materials Letters, 59:3357-3363.

Elsharief, A., Cohen, M., D. ve Olek, J., (2005), "Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar", Cement and Concrete Research, 35:1368-1376.

Erdoğan, T., Y., (2003), Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Ankara.

Gao, X.,F., Lo, Y.T., Tam, C.M., (2002), "Investigation of Micro-cracks and Microstructure of High Performance Lightweight Aggregate Concrete", Building and Environment, 37:485-

489.

Gündüz, L., (1998), Pomza Teknolojisi, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi - ISBAŞ Bims yapı elemanları A.Ş., Cilt I, Isparta.

Gündüz, L. ve Uğur, İ., (2005), “The Effects of Different Fine and Coarse Pumice Aggregate/cement Ratios on the Structural Concrete Properties Without Using any Admixtures”, Cement and Concrete Research, 35:1859-1864.

Gündüz, L., (2008), “The Effects of Pumice Aggregate/cement Ratios on the Low/strength Concrete Properties”, Construction and Building Materials, 22:721-728.

Haque, M., N., Al-Khaiat, H. ve Kayali, O., (2004), “Strength and Durability of Lightweight Concrete”, Cement and Concrete Composites, 26:307-314.

Holm, T.A., Bremner, T.W. ve Newman, J.B., (1984), “Lightweight Aggregate Concrete Subject to Severe Weathering”, ACI - Concrete International, 6(6):49-54.

Hossain, K., M., A., (2004a), “Properties of Volcanic Pumice Based Cement and Lightweight Concrete”, Cement and Concrete Research, 34:283-291.

Hossain, K., M., A., (2004b), “Potential Use of Volcanic Pumice as a Construction Material”, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(6):573-577.

Hossain, K., M., A., (2006), “Macro- and Microstructural Investigations on Strength and Durability of Pumice Concrete at High Temperature”, Journal of Materials in Civil Engineering, 18(4):527-536.

Igarashi, S., Watanabe, A. ve Kawamura, (2005), “Evaluation of Capillary Pore Size Characteristics in High-Strength Concrete at Early Ages”, Cement and Concrete Research, 35:513-519.

Kanca, A.C., (1980), Yapılarda Isı Yalıtımı, Ankara.

Kayalı, O. ve Zhu, B., (2005), “Chloride Induced Reinforcement Corrosion in Lightweight Aggregate High-strength Fly Ash Concrete”, Construction and Building Materials, 19:327-336.

Kayalı, O., Haque, M., N. ve Zhu, B., (1999), “Drying Shrinkage of Fibre-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Containing Fly Ash”, Cement and Concrete Research, 29:1835-1840.

Kearsley, E.,P. ve Wainwright, P.,J., (2001), “Porosity and Permeability of Foamed Concrete”, Cement and concrete Research, 31:805-812.

Kendall, K., Howard, A.J. ve Birchall, J.D., (1983), “The Relation between Porosity, Microstructure and Strength, and the Approach to Advanced Cement-Based Materials”, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 310(1511):139-151.

Khan, M.I., (2002), “Factors Affecting the Thermal Properties of Concrete and Applicability of its Prediction Models”, Building and Environment, 37:607-614.

Kılıç, A., Atiş, C., D., Yaşar, E. ve Özcan, F., (2003), “High-Strength Lightweight Concrete Made with Scoria Aggregate Containing Mineral Admixtures”, Cement and Concrete

Research, 33:1595-1599.

Kim, K., H., Jeon, S., E., Kim, J., K. ve Yang, S., (2003), "An Experimental Study on Thermal Conductivity of Concrete", *Cement and Concrete Research*, 33:363-371.

Kovler, K., Souslikov, A. ve Bentur, A., (2004), "Pre-Soaked Lightweight Aggregates as Additives for Internal Curing of High-Strength Concretes", *Cement, Concrete, and Aggregates*, 26(2):1-8.

Kumar, R. ve Bhattacharjee, B., (2003), "Porosity, Pore Size Distribution and In Situ Strength of Concrete", *Cement and Concrete Research*, 33:155-164.

Lamond, J., F. ve Pielert, J., (2006), *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*, ASTM Publication.

Lange, D.A., Jennings, H.M., ve Shah, S.P., (1994), "Image Analysis Techniques For Characterization Of Pore Structure Of Cement-Based Materials", *Cement and Concrete Research*, 24(5):841-853.

Lo, T., Y., Cui, H., Z., Tang, W., C. ve Leung, W., M., (2008), "The Effect of Aggregate Absorption on Pore Area at Interfacial Zone of Lightweight Concrete", 22:623-628.

Lo, T., Y., Tang, W., C. ve Nadeem, A., (2007), "Comparison of Carbonation of Lightweight Concrete with Normal Weight Concrete at Similar Strength Levels", *Construction and Building Materials*, in press.

Lo, T., Y., Cui, H., Z., Nadeem, A. ve Li, Z., G., (2006), "The Effects of Air Content on Permeability of Lightweight Concrete", *Cement and Concrete Research*, 36:1874-1878.

Lo, T.Y. ve Cui, H.Z., (2004), "Effect of Porous Lightweight Aggregate on Strength of Concrete", *Materials Letters*, 58:916-919.

Lo, T., Y., Cui, H., Z. ve Li, Z., G., (2004), "Influence of Aggregate Pre-wetting and Fly Ash on Mechanical Properties of Lightweight Concrete", *Waste Management*, 24:333-338.

Lo, Y. Gao, X.,F. ve Jeary, A.,P., (1999), "Microstructure of Pre-wetted Aggregate on Lightweight Concrete", *Building and Environment*, 34:759-764.

Lura, P., Bentz, D., P., Lange, D., A., Kovler, K., Bentur, A. ve Breugel, K., V., (2003), "Measurement of Water Transport from Saturated Pumice Aggregates to Hardening Cement Paste", *Engineering Conferences International*, 10-14 Aug. 2003.

Lura, P., Bentz, D., P., Lange, D., A., Kovler, K. ve Bentur, A., (2004), "Pumice Aggregates for Internal Water Curing", *International RILEM Symposium*, 22-24 March 2004.

Mao, J. ve Ayuta, K., (2008), "Freze-Thaw Resistance of Lightweight Concrete and Aggregate at Different Freezing Rates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20:78-84.

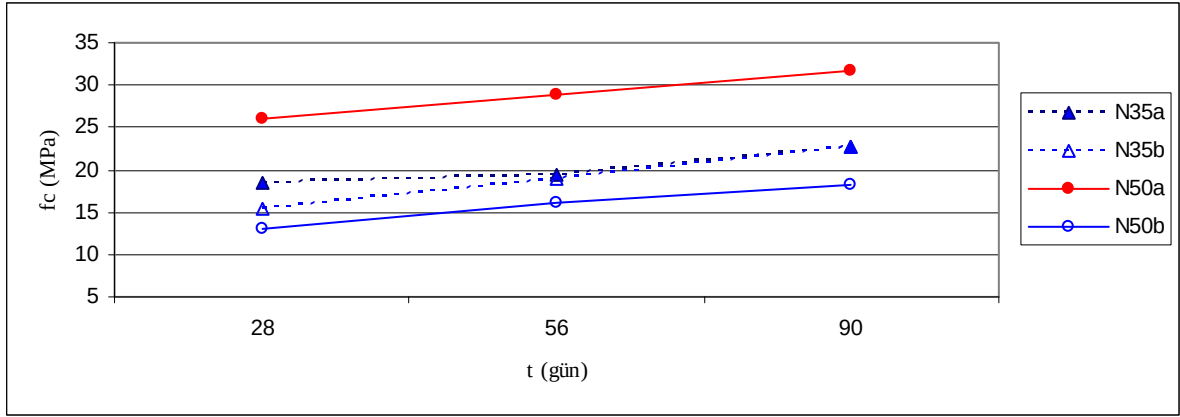
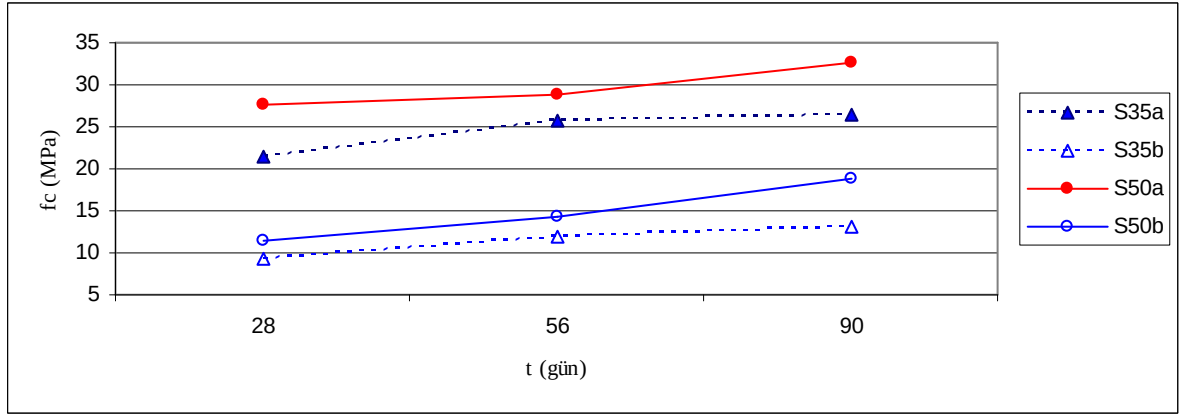
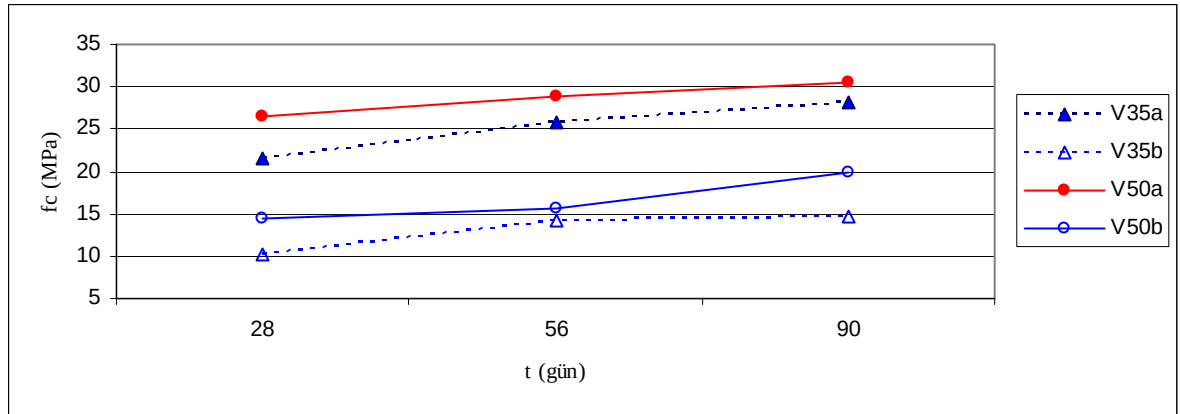
Megri, A. C., Achard, G., Haghighat, F., (1998), "Using Plastic Waste as Thermal Insulation for the Slab-on-grade Floor and Basement of a Building", *Building and Environment*, 33(2-3): 97-104.

Miled, K., Roy, R., L., Sab, K. ve Boulay, C., (2004), "Compressive Behavior of an Idealised EPS Lightweight Concrete: Size Effects and Failure Mode", *Mechanics of Materials*, 36:1031-1046.

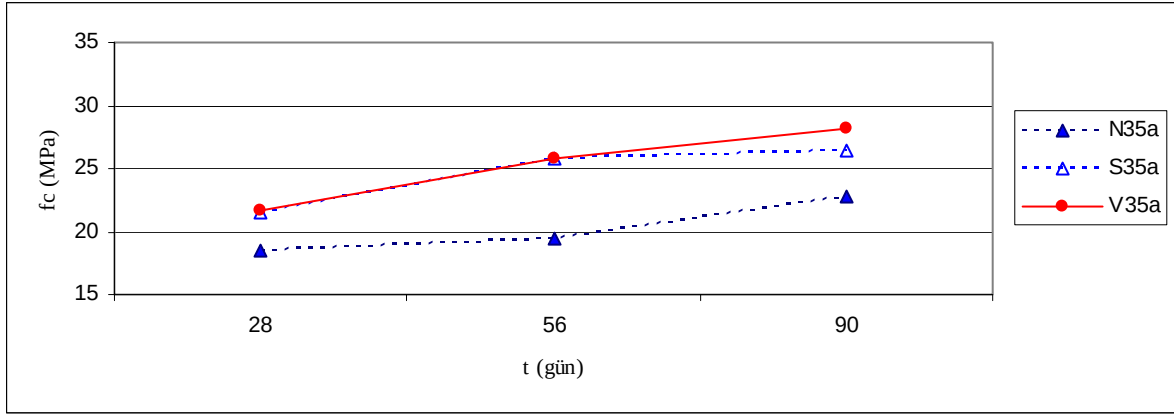
- Mladenovic, A., Suput, J., S., Ducman, V. ve Skapin, A., S., (2004), "Alkali-Silica Reactivity of Some Frequently Used Lightweight Aggregates", *Cement and Concrete Research*, 34:1809-1816.
- Moon, H., Y., Kim, H., S. ve Choi, D., S., (2006), "Relationship Between Average Pore Diameter and Chloride Diffusivity in Various Concretes", *Construction and Building Materials*, 20:725-732.
- Moro, F. ve Böhni, H., (2002), "Ink-Bottle Effect in Mercury Intrusion Porosimetry of Cement-Based Materials", *Journal of Colloid and Interface Science*, 246:135-149.
- Narayanan, N. ve Ramamurthy, K., (2000), "Structure and Properties of Aerated Concrete: a review", *Cement&Concrete Composites*, 22:321-329.
- Neville, A.M., (2000), *Properties of Concrete*, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York.
- Odler, I. ve Rößler, M., (1985), "Investigations on the Relationship Between Porosity, Structure and Strength of Hydrated Portland Cement Pastes: ii. Effect of Pore Structure and of Degree of Hydration", *Cement and Concrete Research*, 15(3):401-410.
- Onaran, K., (2000), *Malzeme Bilimi*, 8. Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Özer, M., (1982), *Yapılarda Isı-Su Yalıtımları*, Özer Yayınları, İstanbul.
- Postacıoğlu, B., (1987), *Agregalar, Beton*, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- Ramakrishnan, V., Bremner, T., W. ve Malhotra, V., M., (1992), "Fatigue Strength and Endurance Limit of Lightweight Concrete", *Proceedings of the American Concrete Institute Symposium on Performance of Lightweight Concrete*, 14 November 1992, Dallas.
- Sarı, D. ve Paşamehmetoğlu, A.G., (2005), "The Effects of Gradation and Admixture on the Pumice Lightweight Aggregate Concrete", *Cement and Concrete Research*, 35:936-942.
- Şahin, R., Taşdemir, M.A., Gül, R. ve Çelik, C., (2003), "Betonun Don Hasarının Mekanik Deneylerle Analizi", 5. Ulusal Beton Kongresi, 1-3 Ekim 2003, İstanbul, 333-343.
- Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H. ve Gül, R., (2003), "The Effects of Different Cement Dosages, Slumps and Pumice Aggregate Ratios on the Compressive Strength and Densities of Concrete", *Cement and Concrete Research*, 33:1245-1249.
- Short, A. ve Kinniburgh, W., (1963), *Lightweight Concrete*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Taşdemir, M., A., (1982), *Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Matbaası.
- Toydemir, N., Gürdal, E. ve Tanaçan, L., (2000), *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme*, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- TS 825, (2008), "Binalarda Isı Yalıtım Kuralları".
- TS 1114, (1986), "Hafif Agregalar-Beton İçin".
- TS 2511, (1977), "Taşıyıcı Hafif Betonların Karışım Hesap Esasları".

- TS 3234, (1978), “Bimsbeton Yapım Kuralları, Karışım Hesabı ve Deney Metotları”.
- TS 3526, (1980), “Beton Agregalarında Özgöl Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini”.
- TS 4045, (1984), “Yapı Malzemelerinde Kapiler Su Emme Tayini”.
- TS EN 206-1, (2002), “Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk”.
- TS EN 480-11, (2008), “Kimyasal Katkılar – Beton, Harç ve Şerbet için – Deney Metotları – Bölüm 11: Sertleşmiş Betonda Hava Boşluğu Özelliklerinin Tayini”.
- TS EN 12086, (2002), “Isı Yalıtım Malzemeleri – Binalar İçin – Su Buharı Geçirgenlik Özelliklerinin Tayini”.
- TS EN 12350-2, (2002), “Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slamp) Deneyi”.
- TS EN 12350-3, (2002), “Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 3: Vebe Deneyi”.
- TS EN 12350-6, (2002), “Beton- Taze Beton Deneyleri- Bölüm 6: Yoğunluk”.
- TS EN 12390-3, (2003), “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini”.
- TS EN 12390-6, (2002), “Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini”.
- TS EN 12390-7, (2002), “Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 7: Sertleşmiş Betonun Yoğunluğunun Tayini”.
- TS ISO 8302, (2002), “Isı Yalıtımı - Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini - Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı”.
- Zhang, B., (1998), “Relationship Between Pore Structure and Mechanical Properties of Ordinary Concrete Under Bending Fatigue”, Cement and Concrete Research, 28(5):699-711.

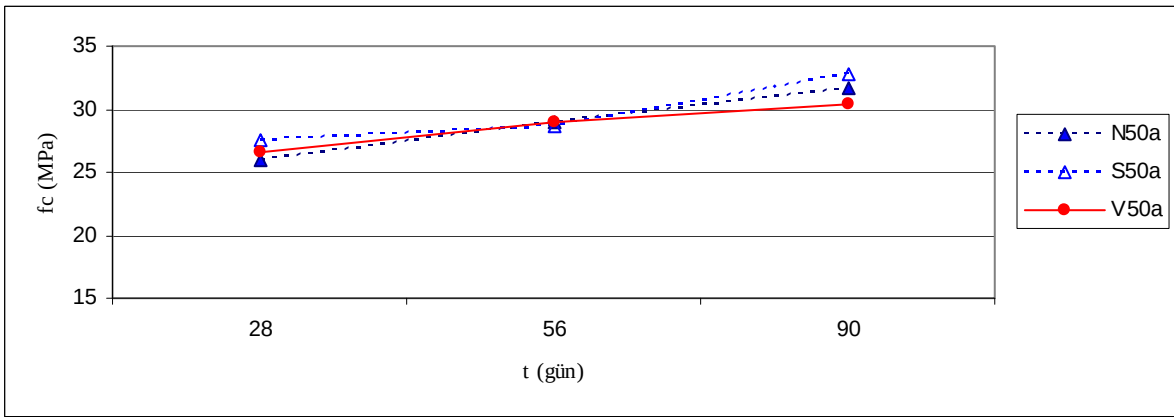
EKLER

a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin f_c -t ilişkisib) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin f_c -t ilişkisic) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin f_c -t ilişkisi

Şekil Ek1 Farklı seri betonlarda basınç dayanımının zamanla değişimi (f_c -t)

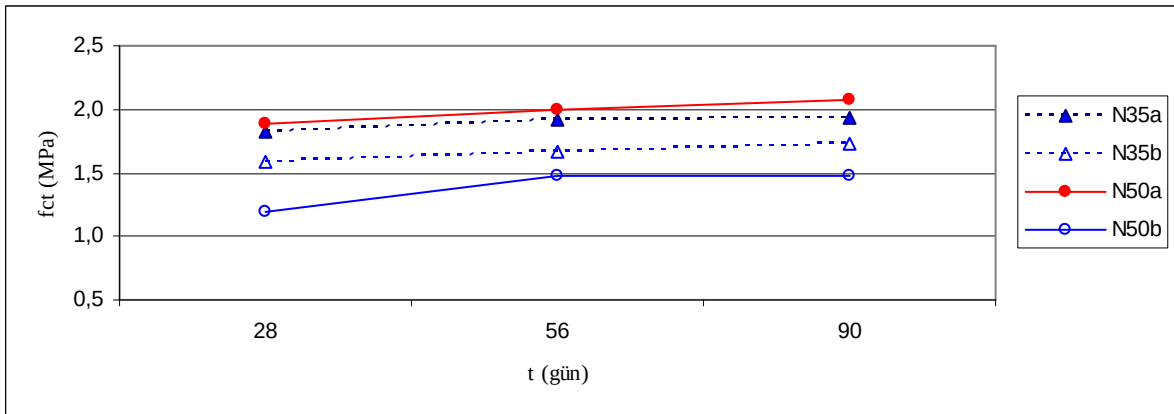


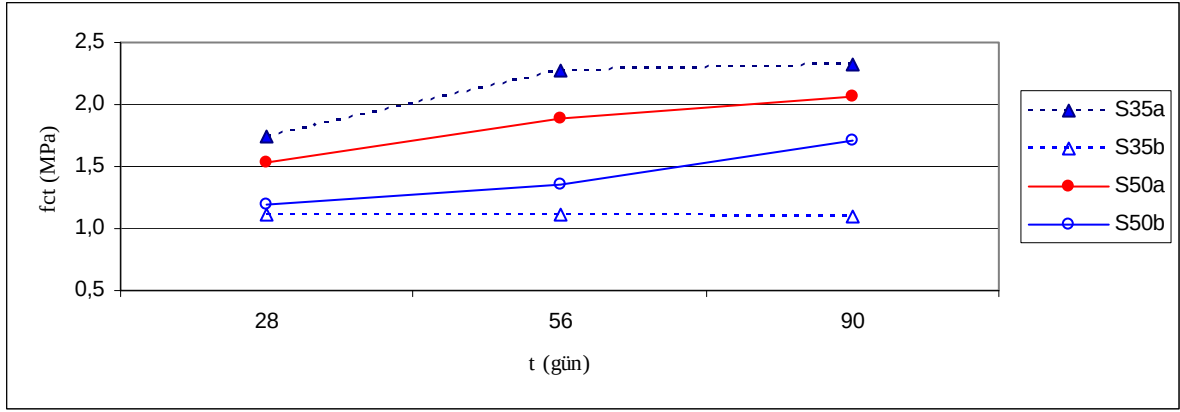
a) 350 dozlu, hava sürükleyicisiz



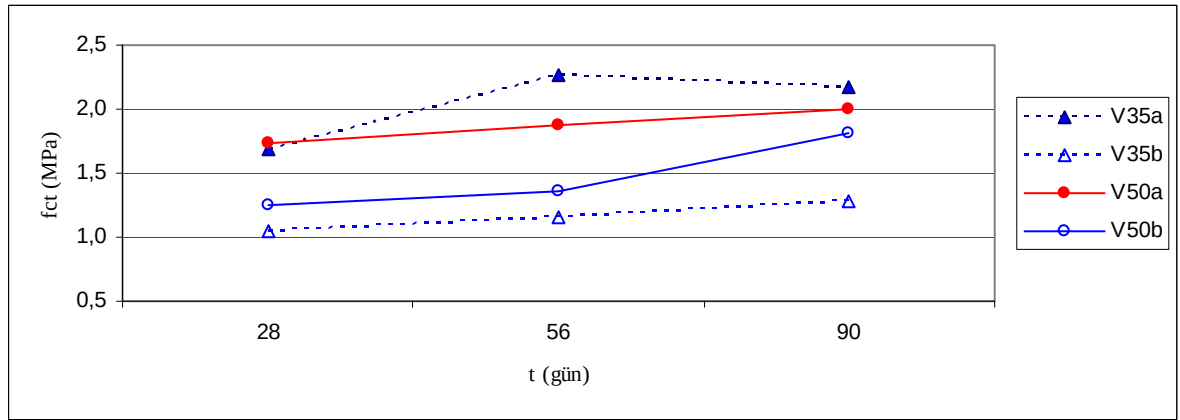
b) 500 dozlu, hava sürükleyicisiz

Şekil Ek2 Agrega nemliliğinin basınç dayanımına etkisi

a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin f_{ct} -t ilişkisi

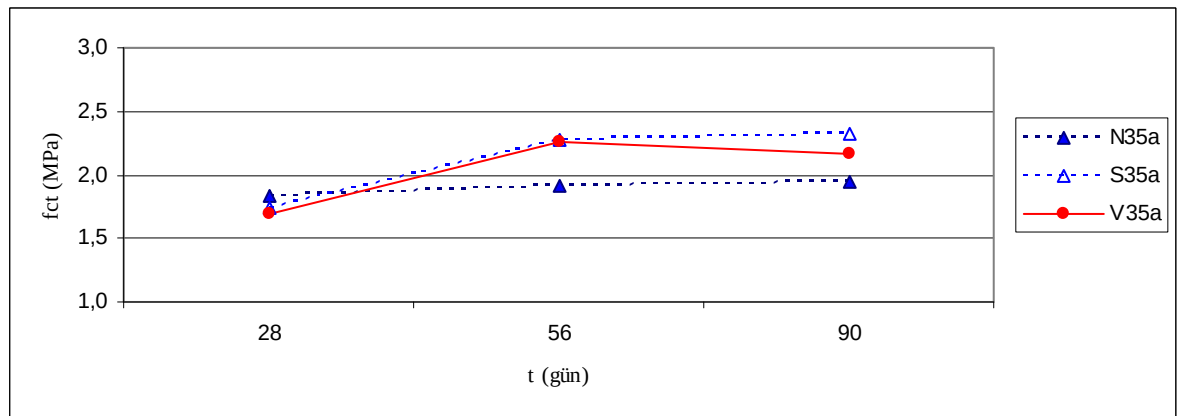


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin f_{ct} -t ilişkisi

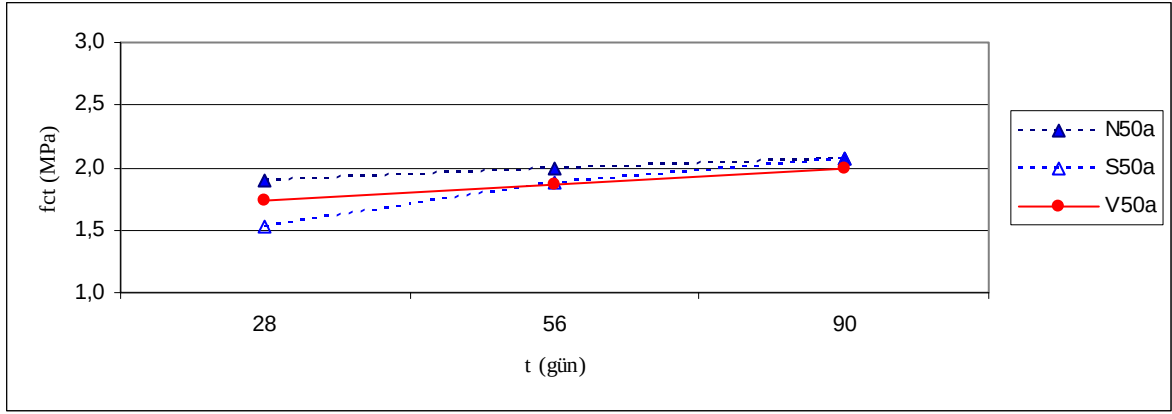


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin f_{ct} -t ilişkisi

Şekil Ek3 Yarma dayanımının zamanla değişimi (f_{ct} -t)

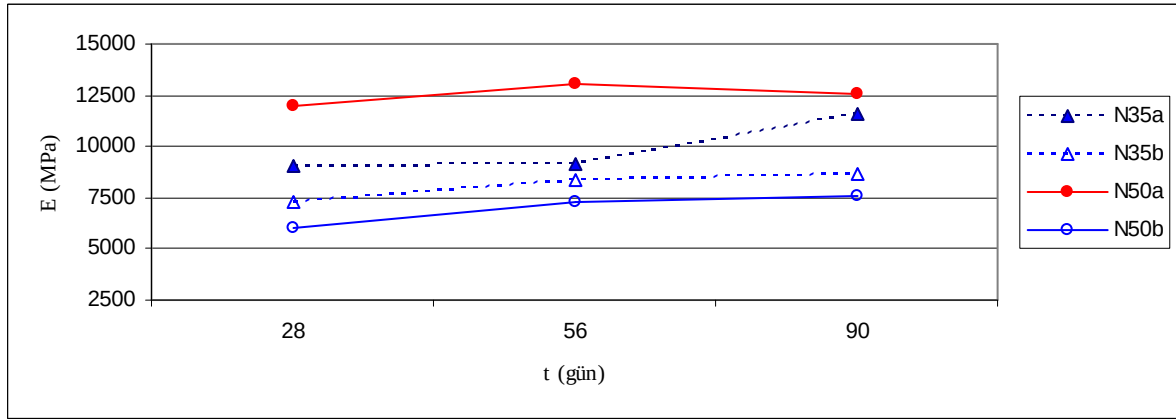


a) 350 dozlu, hava sürükleyicisiz

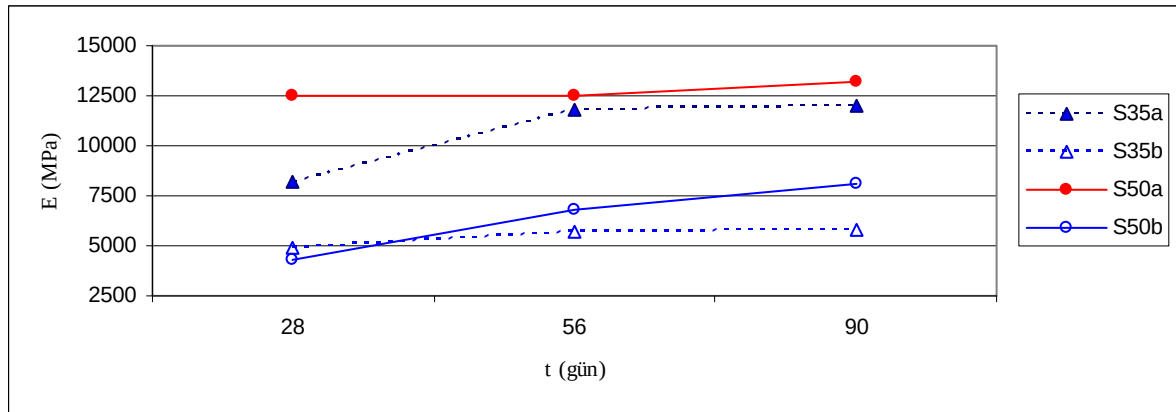


b) 500 dozlu hava sürükleyicisiz

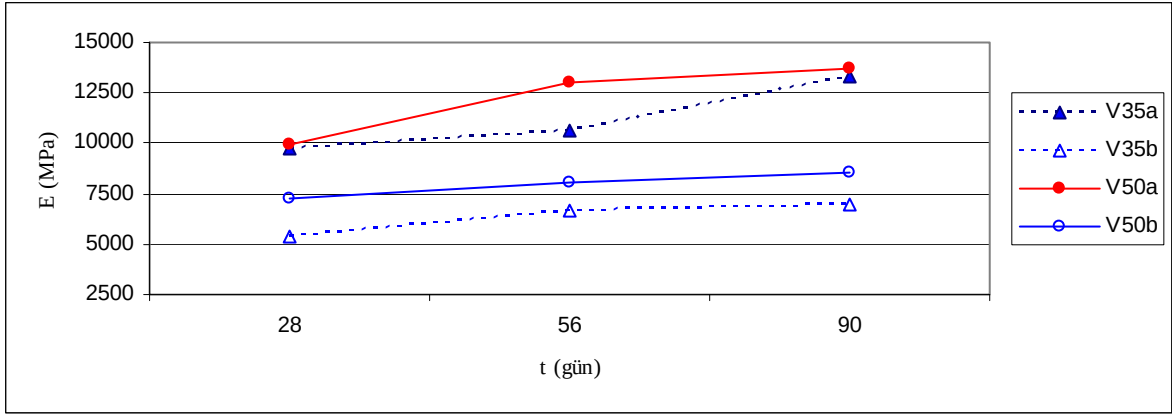
Şekil Ek4 Agrega nemliliğinin yarma dayanımına etkisi



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin E-t ilişkisi

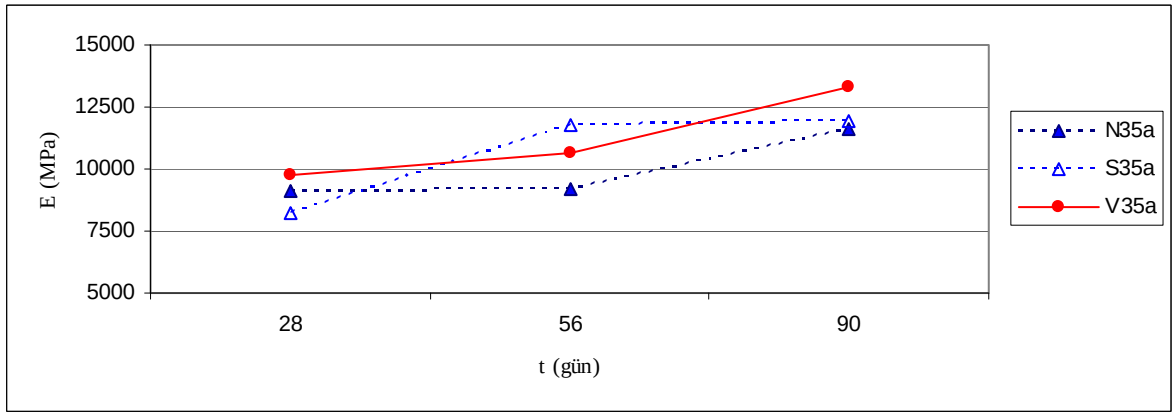


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin E-t ilişkisi

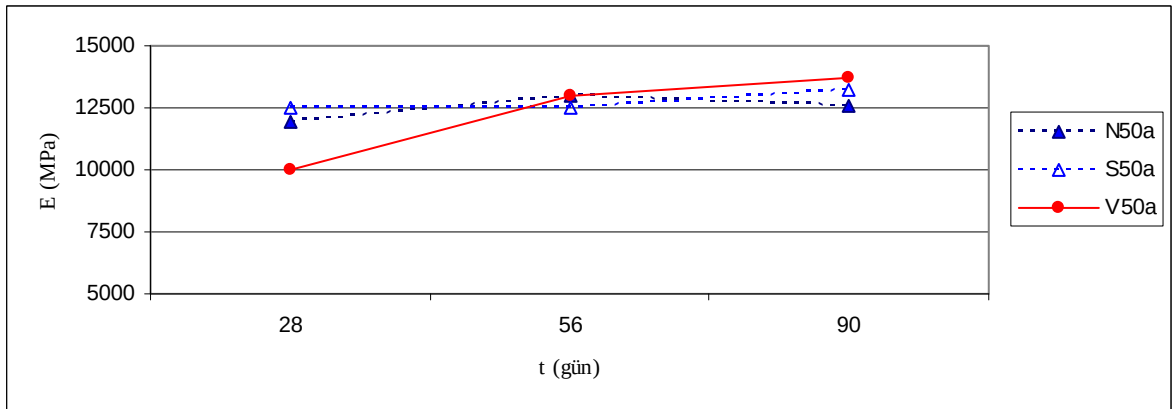


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin E-t ilişkisi

Şekil Ek5 Elastisite modülünün zamanla değişimi (E-t)

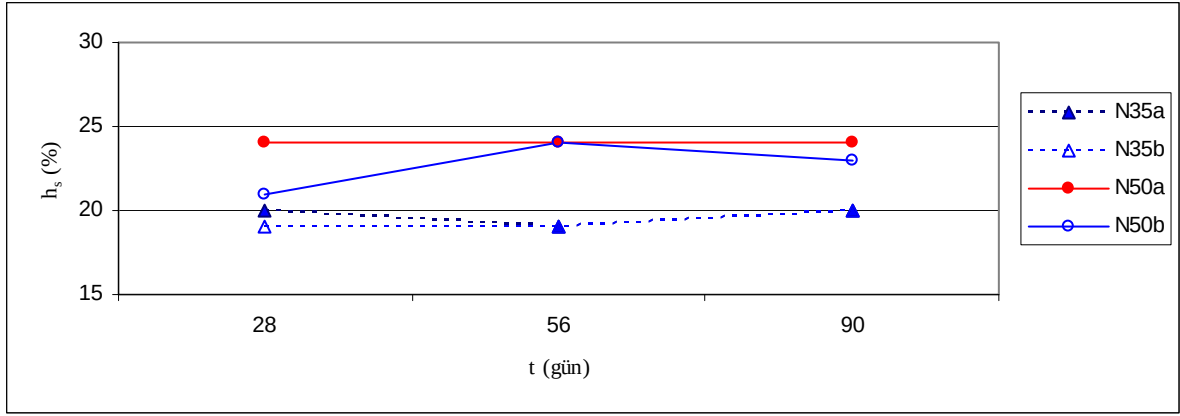


a) 350 dozlu, hava sürükleyicisiz

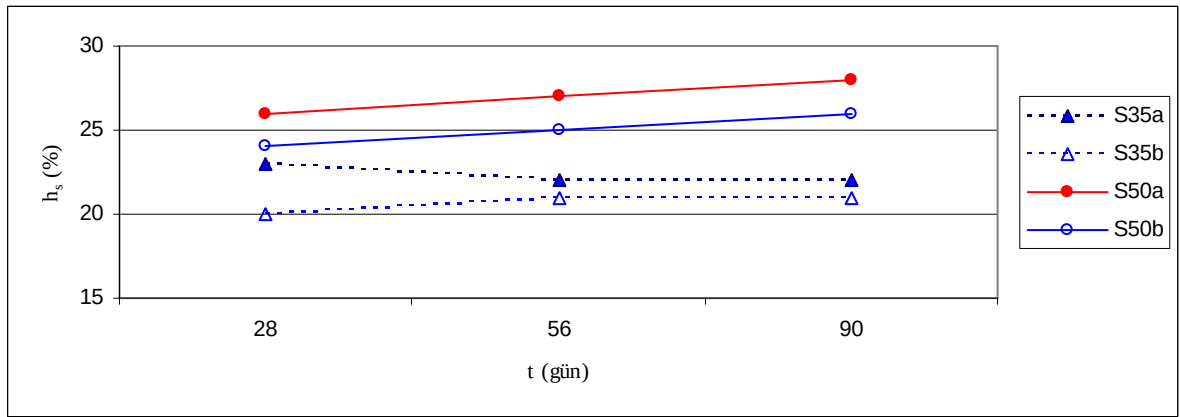


b) 500 dozlu hava sürükleyicisiz

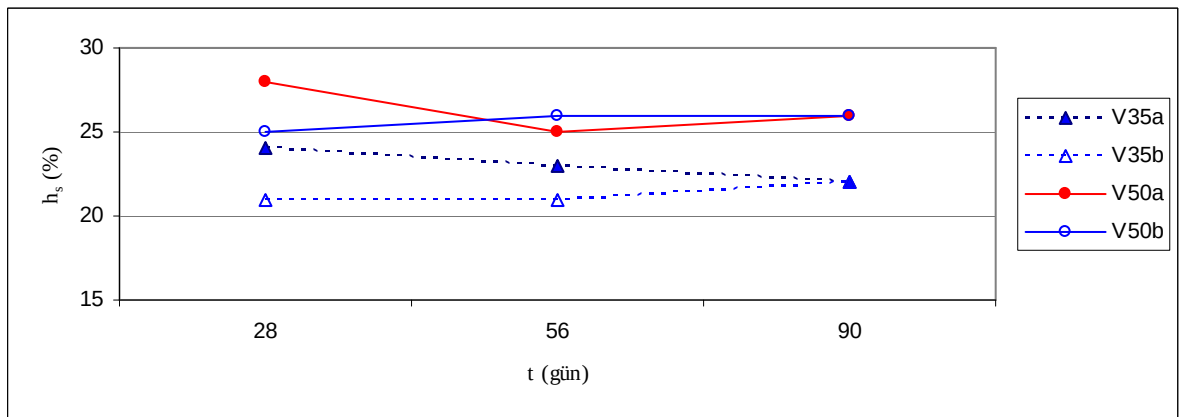
Şekil Ek6 Agreg a nemliliğinin elastisite modülüne etkisi



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin % h_s -t ilişkisi

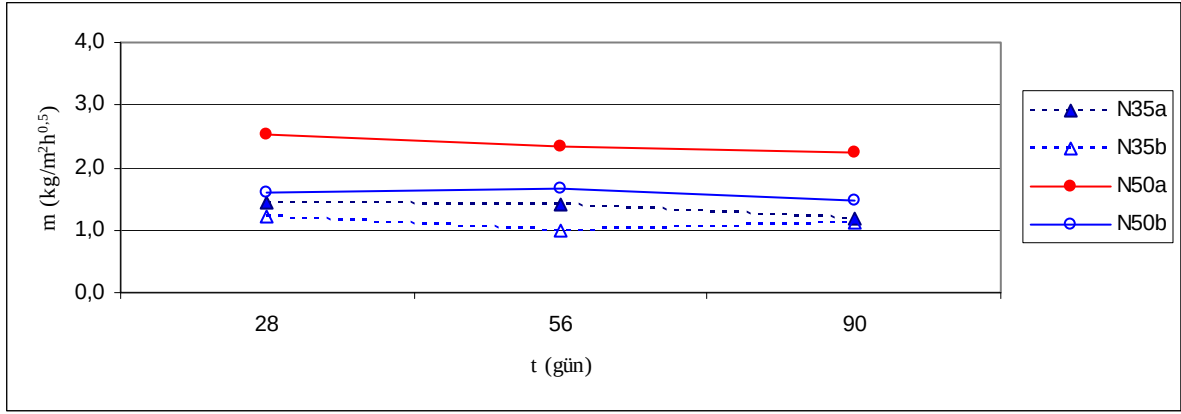


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin % h_s -t ilişkisi

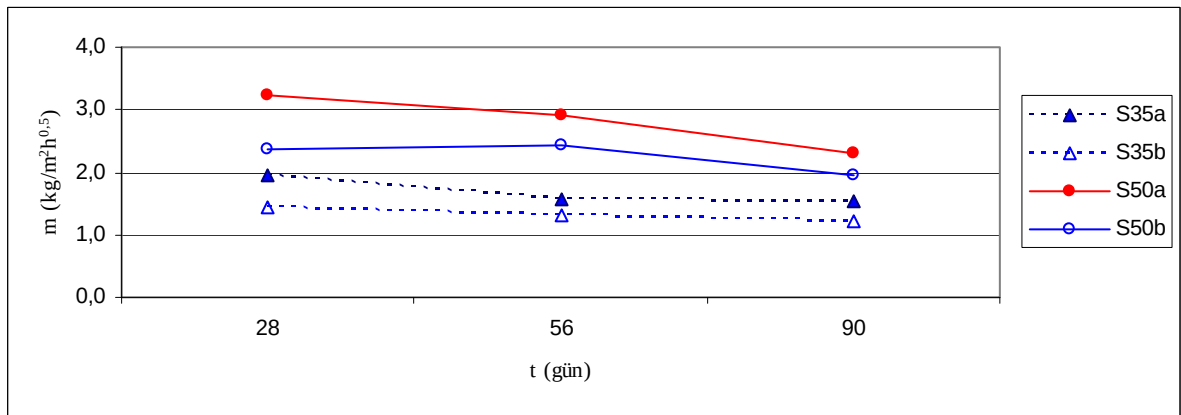


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin % h_s -t ilişkisi

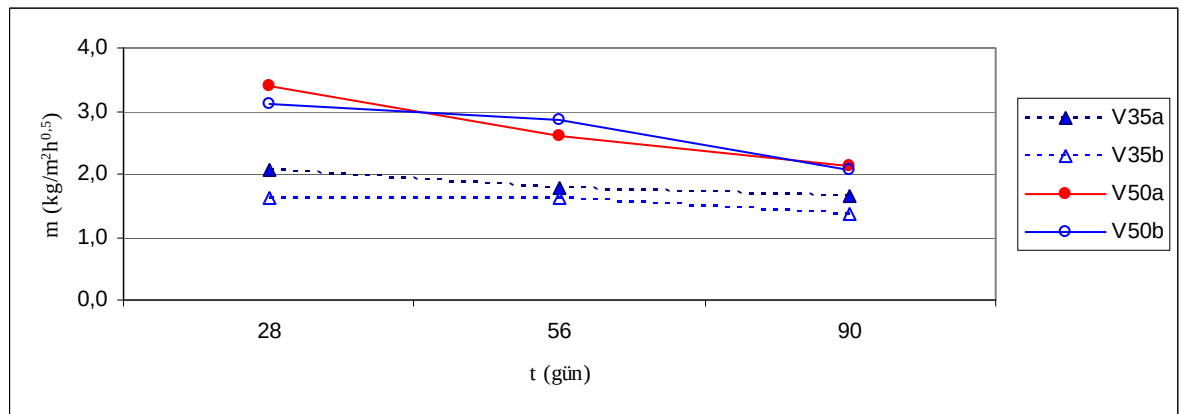
Şekil Ek7 Hacimce su emmenin zamanla değişimi (% h_s -t)



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin m-t ilişkisi

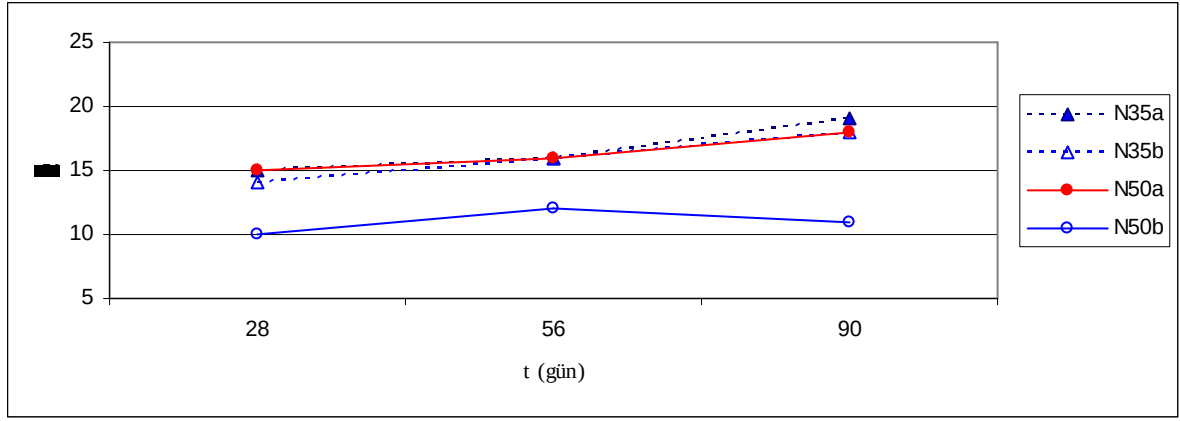
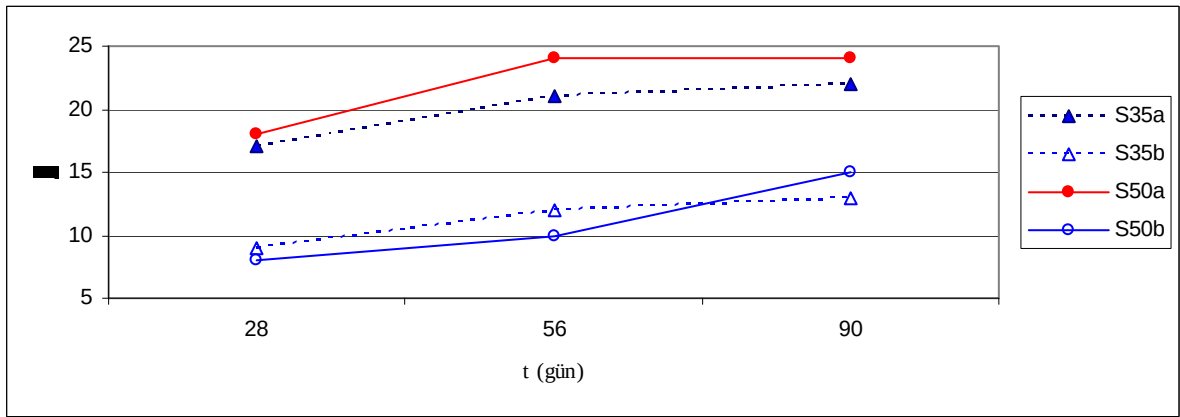
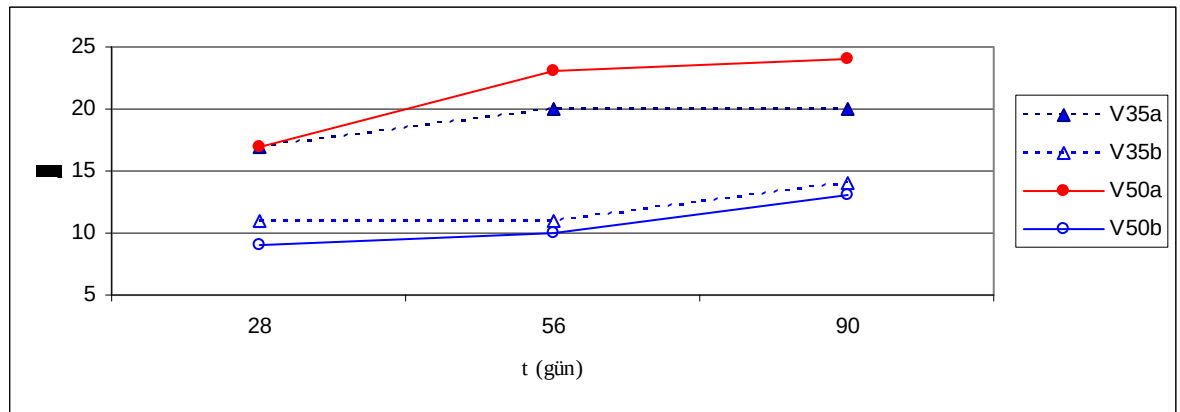


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin m-t ilişkisi

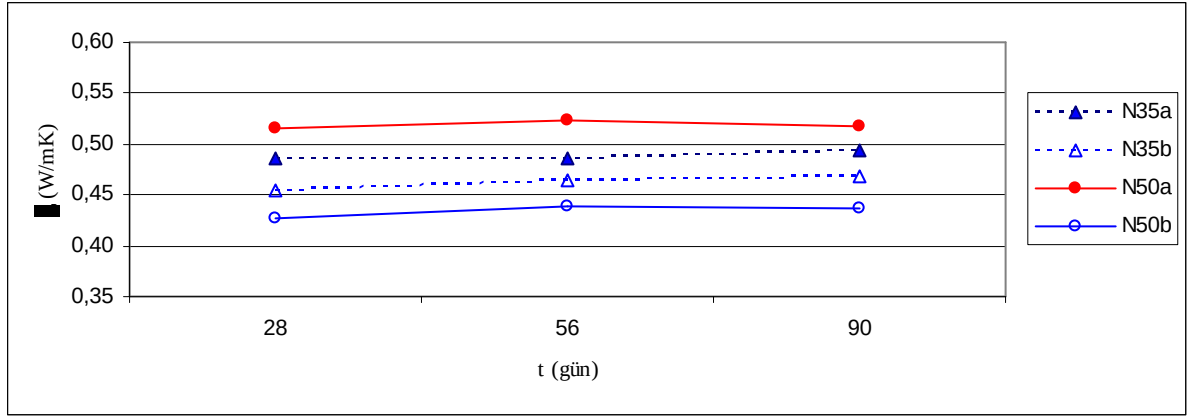
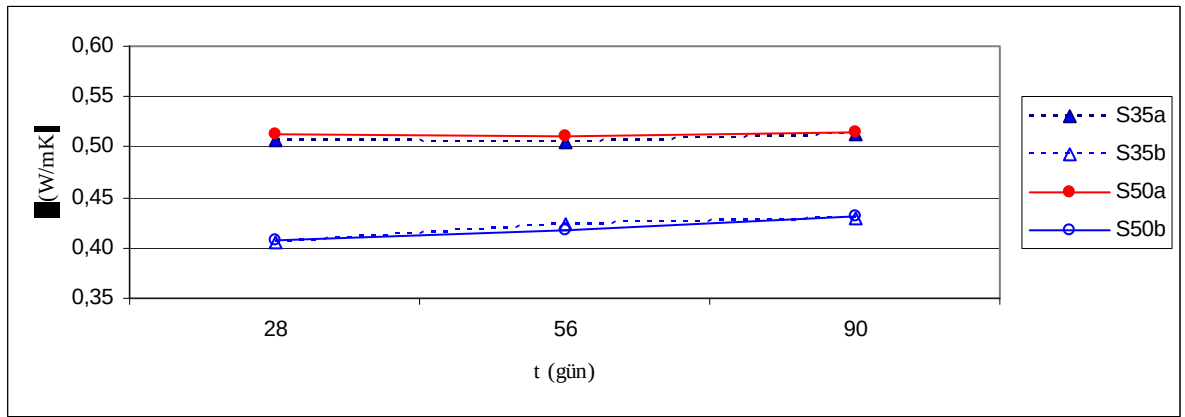
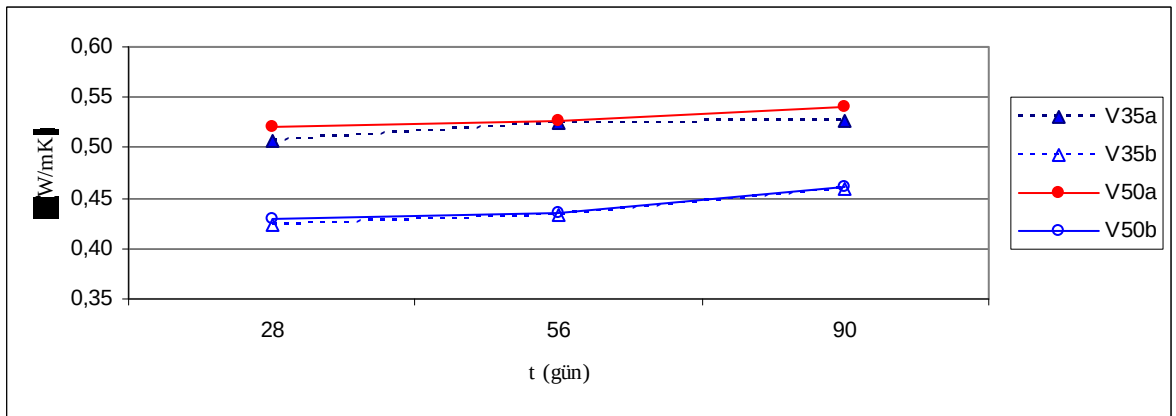


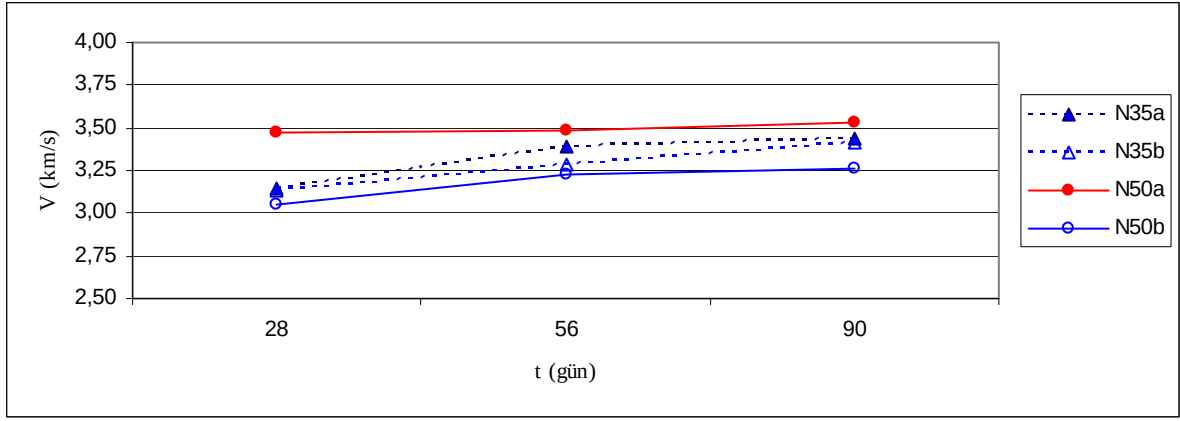
c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin m-t ilişkisi

Şekil Ek8 Kapiler su emmenin zamanla değişimi (m-t)

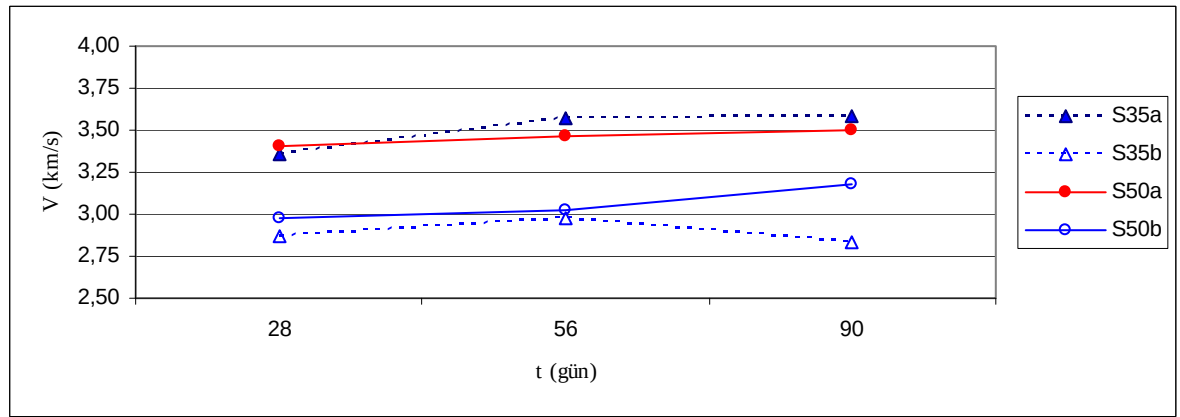
a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin μ -t ilişkisib) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin μ -t ilişkisic) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin μ -t ilişkisi

Şekil Ek9 Su buharı difüzyon direnç faktörünün zamanla değişimi (μ -t)

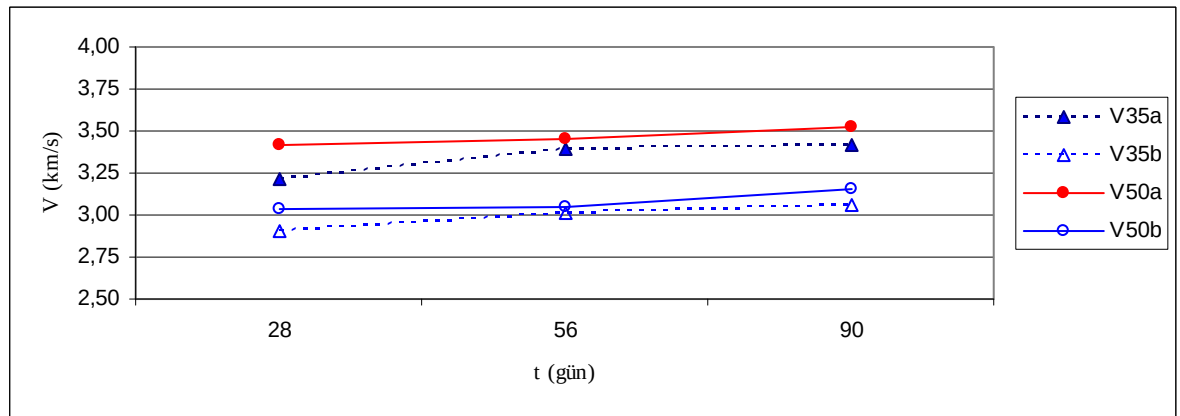
a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin λ -t ilişkisib) Suyla doyorulmuş ponza agregalı serilerin λ -t ilişkisic) Vakum ile suyla doyorulmuş ponza agregalı serilerin λ -t ilişkisiŞekil Ek10 Isı iletim katsayısının zamanla değişimi (λ -t)



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin V-t ilişkisi

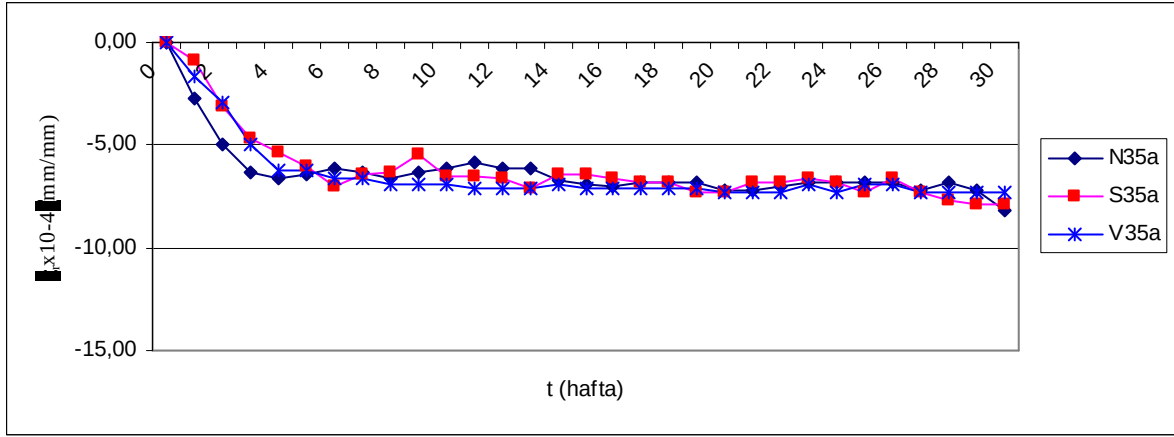


b) Suyla doyurulmuş ponza agregalı serilerin V-t ilişkisi

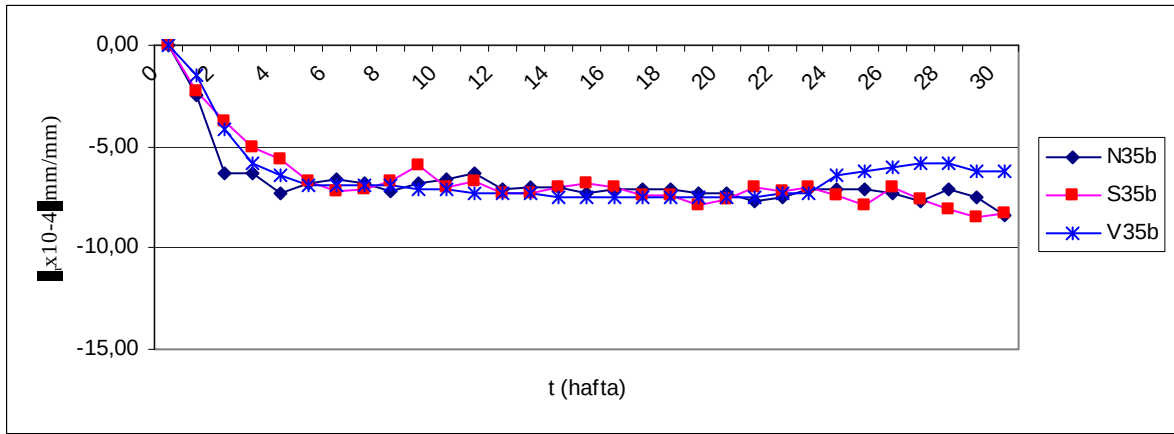


c) Vakum ile suyla doyurulmuş ponza agregalı serilerin V-t ilişkisi

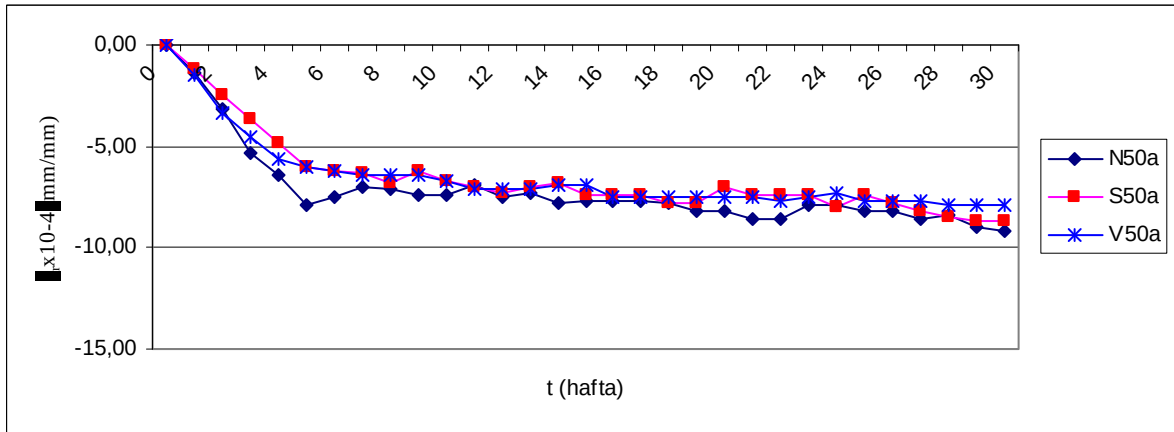
Şekil Ek11 Ses geçiş hızının zamanla değişimi (V-t)



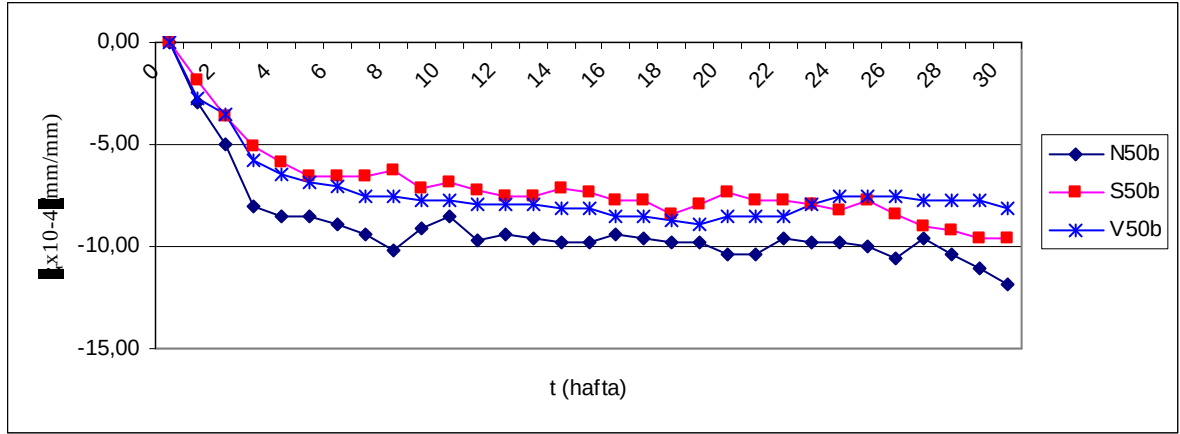
a) 350 dozlu, hava sürükleyicisiz



b) 350 dozlu, hava sürükleyicili

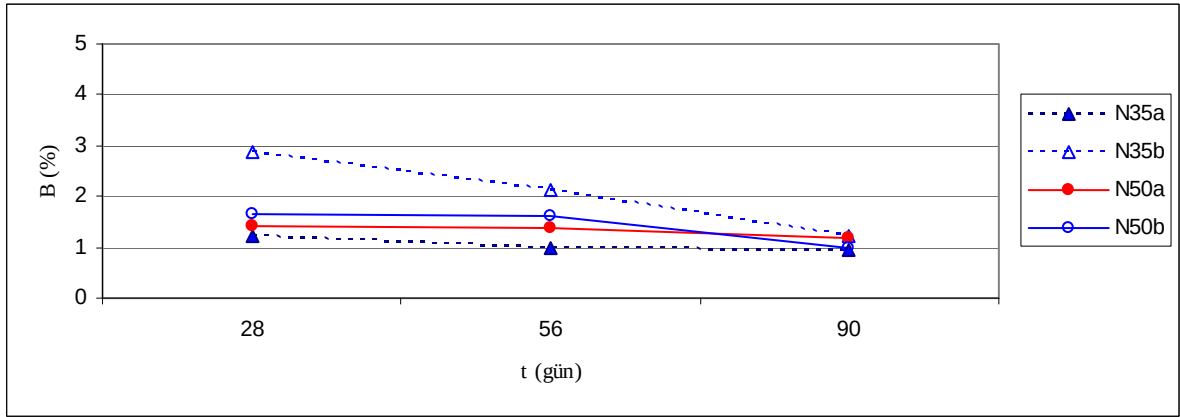


c) 500 dozlu, hava sürükleyicisiz

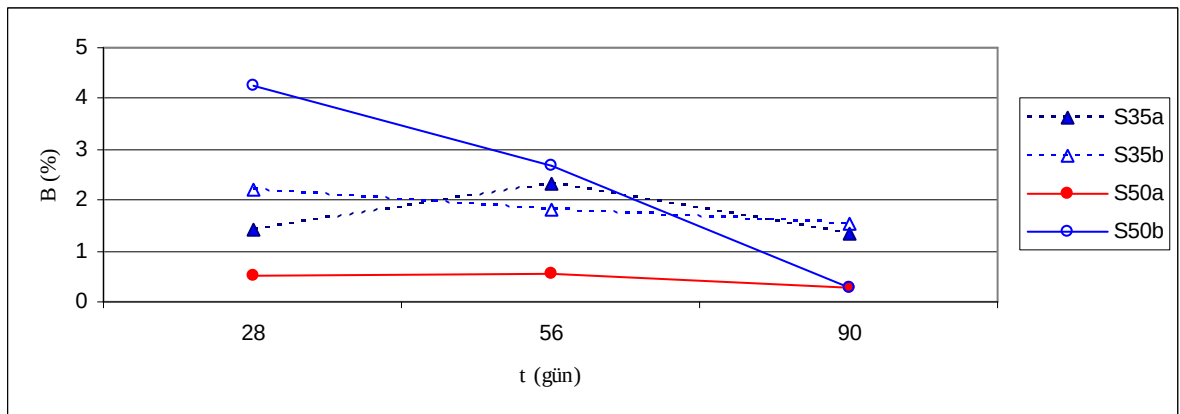


d) 500 dozlu, hava sürükleyicili

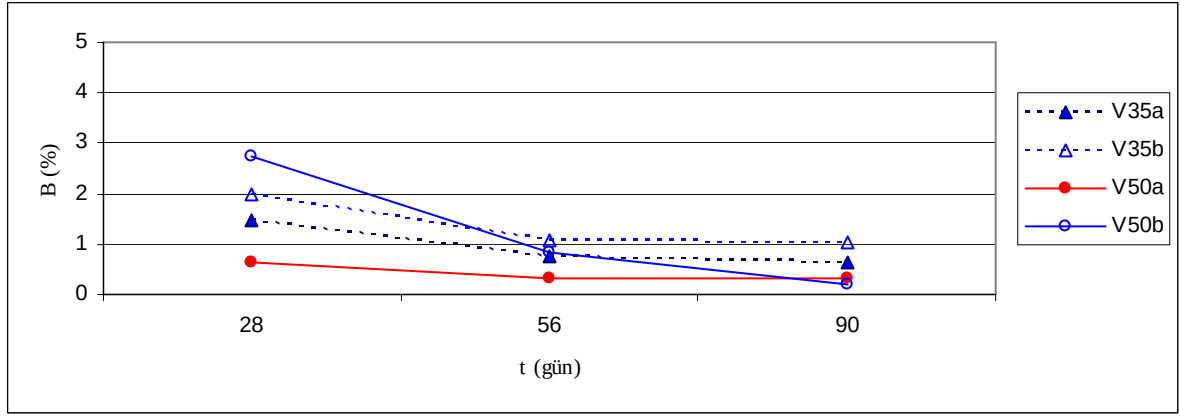
Şekil Ek12 Agregal nemliliğinin rötreye etkisi



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin %p_{om}-t ilişkisi

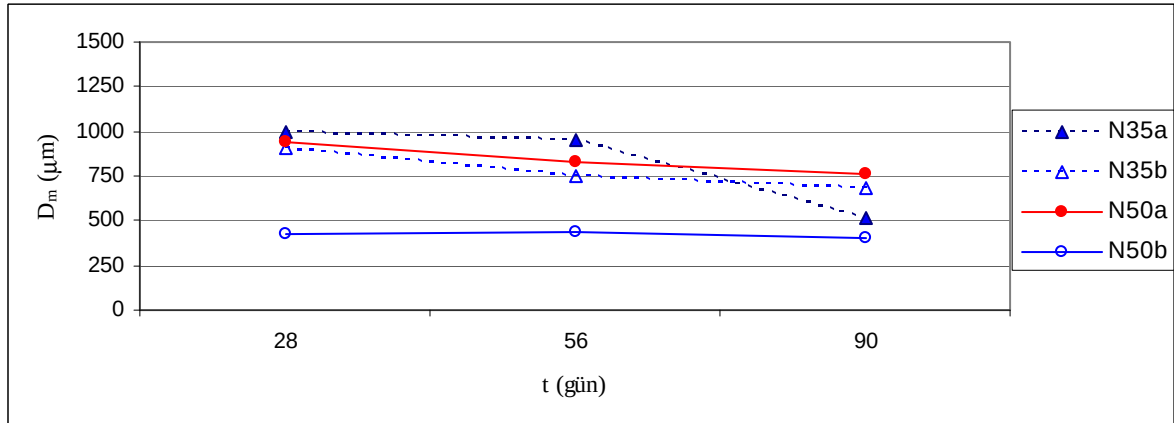


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin %p_{om}-t ilişkisi

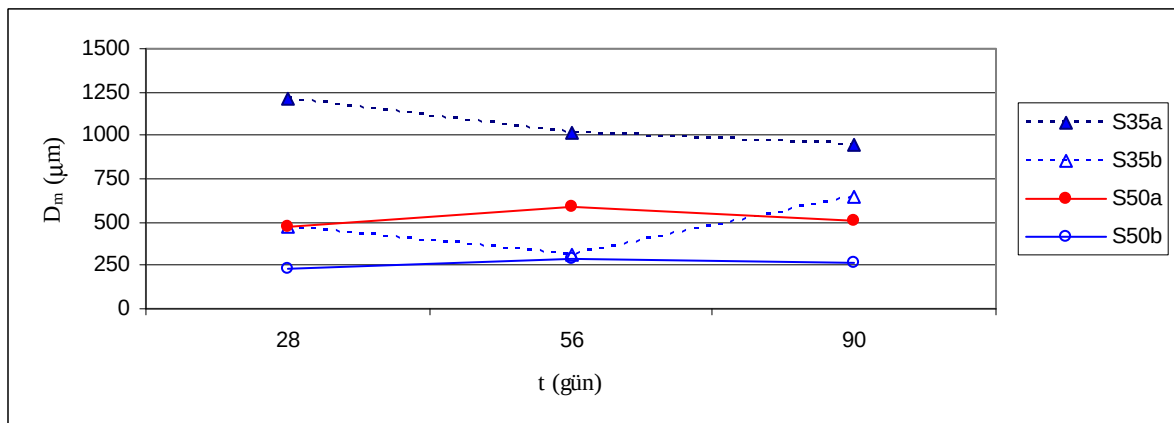


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin $\%p_{om}$ -t ilişkisi

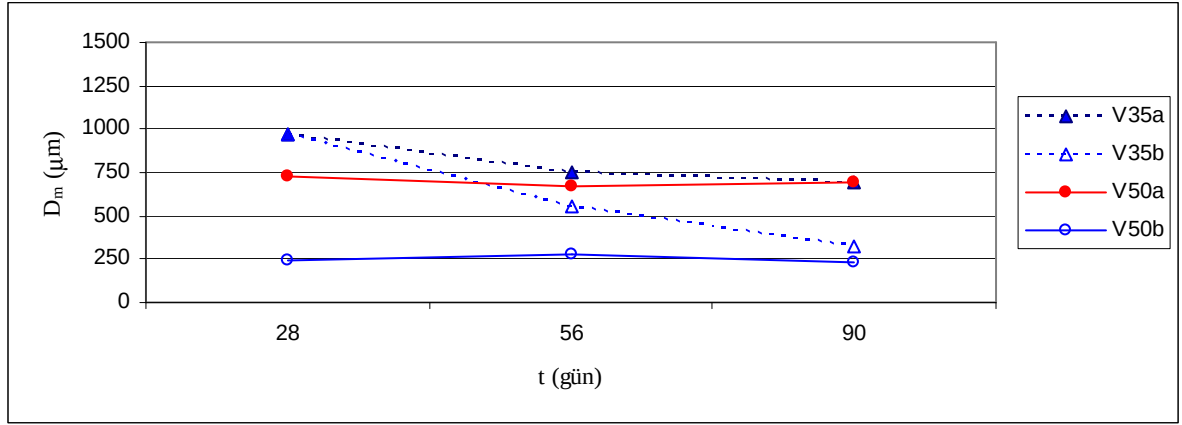
Şekil Ek13 Optik mikroskop ile belirlenen porozitenin zamanla değişimi ($\%p_{om}$ -t)



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin D_m -t ilişkisi

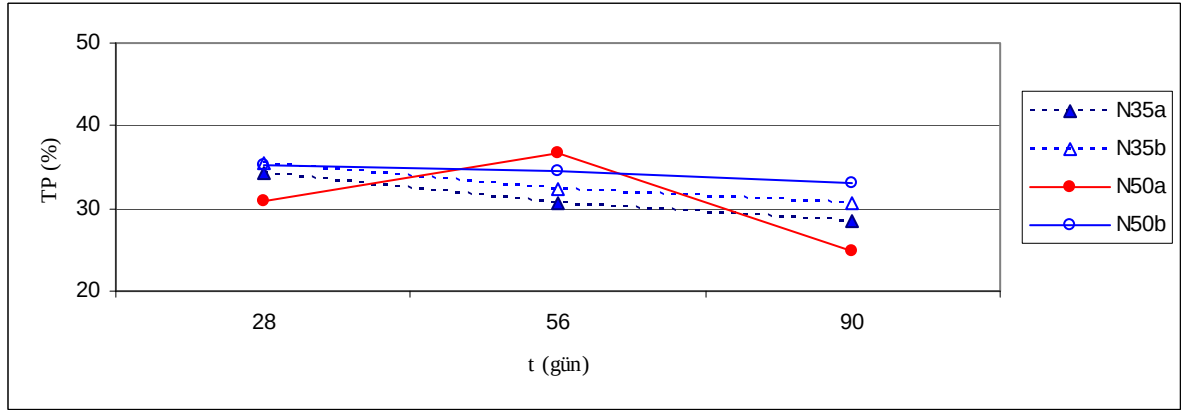


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin D_m -t ilişkisi

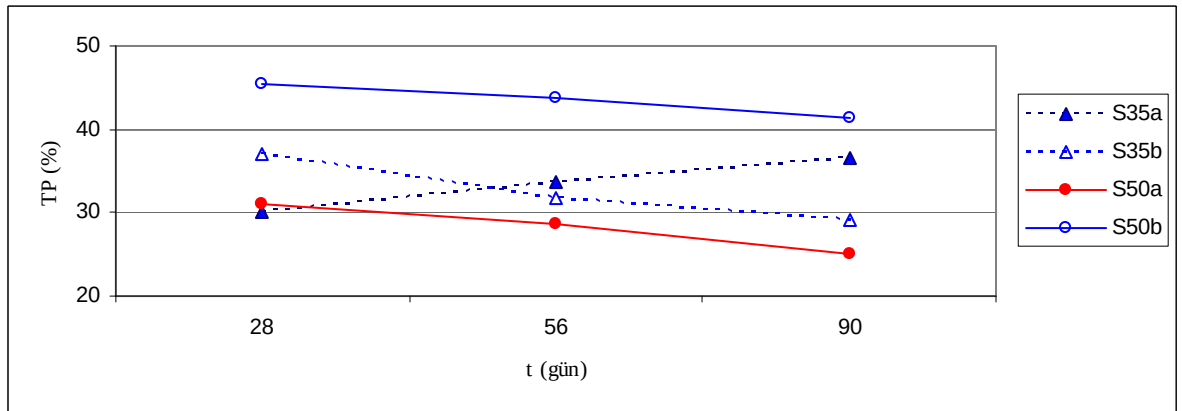


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin D_m -t ilişkisi

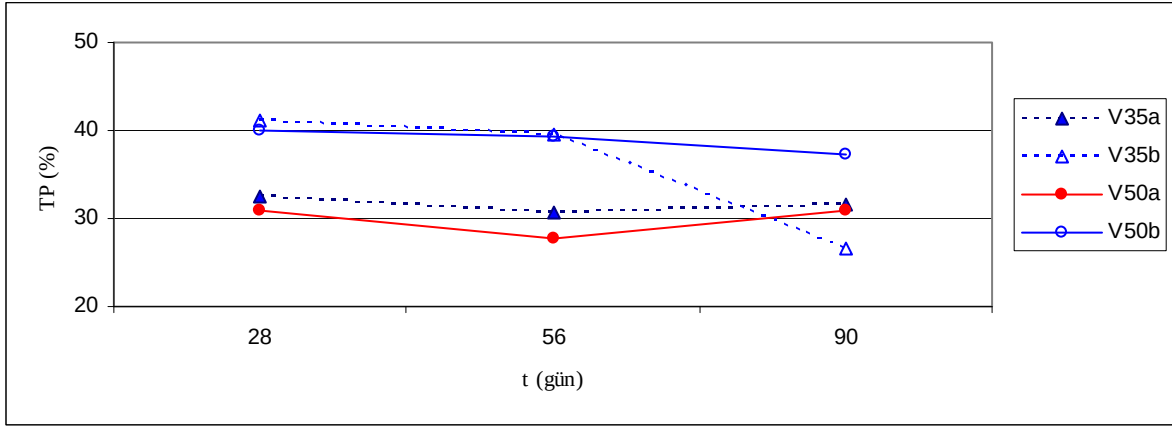
Şekil Ek14 Ortalama boşluk çapının zamanla değişimi (D_m -t)



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin $\%p_{Hg}$ -t ilişkisi

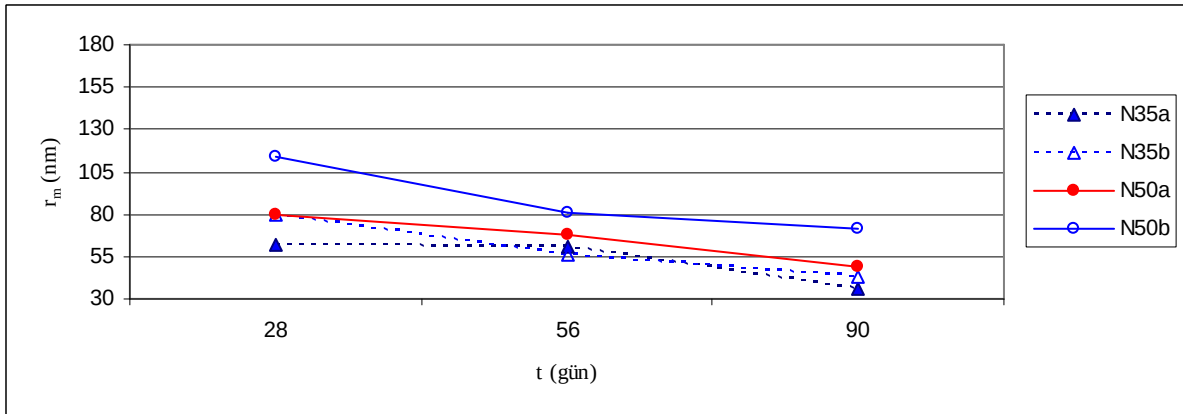


b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin $\%p_{Hg}$ -t ilişkisi

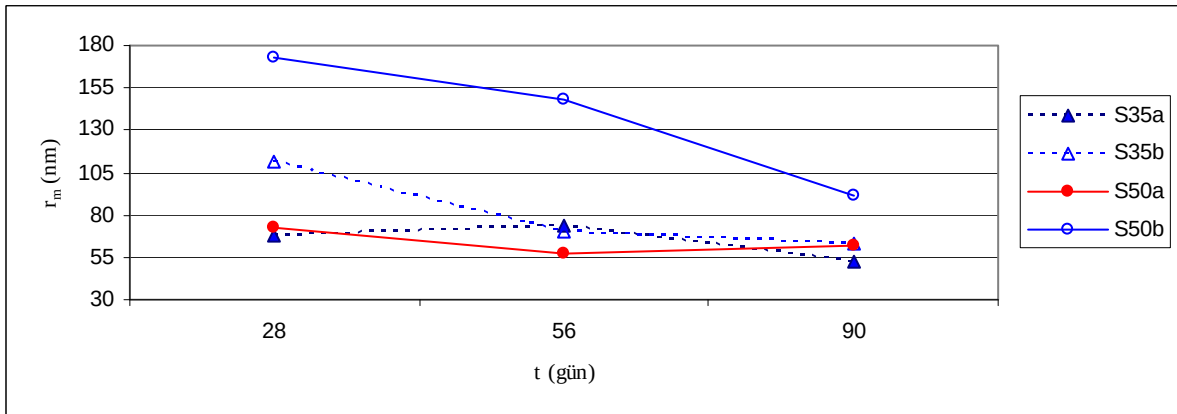


c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin % p_{Hg} -t ilişkisi

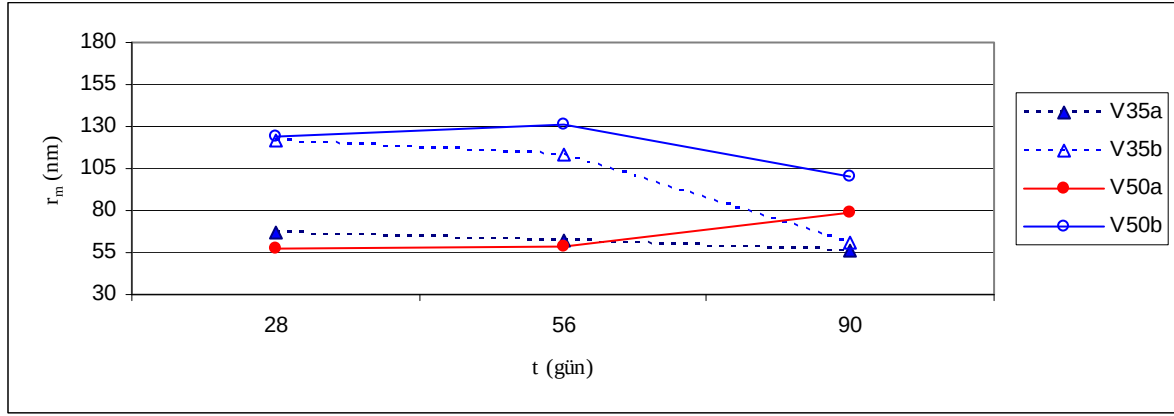
Şekil Ek15 Cıva porozitesi deneyi ile belirlenen porozitenin zamanla değişimi (% p_{Hg} -t)



a) Ortam nemindeki ponza agregalı serilerin r_m -t ilişkisi



b) Suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin r_m -t ilişkisi



c) Vakum ile suya doyurulmuş ponza agregalı serilerin r_m -t ilişkisi

Şekil Ek16 Ortalama boşluk yarıçapının zamanla değişimi (r_m -t)

Çizelge Ek1 Taze beton deney sonuçları

Kod	Slump (h, cm)	Çökme Sınıfı	Vebe (sn)	D (kg/m ³)
N35a	5	S2	4	1570
N35b	13	S3	3	1455
N50a	17	S4	2	1700
N50b	25	S5	<1	1465
S35a	10	S3	4	1705
S35b	24	S5	<1	1380
S50a	21	S4	1	1755
S50b	25	S5	<1	1440
V35a	13	S3	3	1765
V35b	23	S5	<1	1475
V50a	21	S4	1	1805
V50b	25	S5	<1	1540
Sonuç	5–25	S2-S5	0–4	1440–1805

Çizelge Ek2 Sertleşmiş beton deney sonuçları

Kod	Yaş (gün)	D (kg/m ³)		h _s (%)	m (kg/m ² h ^{0,5})	μ	ε _r *10 ⁻⁴ (mm/mm)	V (km/s)	f _c (MPa)	f _{ct} (MPa)	Küp f _c (MPa)	Beton Sınıfı	λ (W/mK)	E (MPa)
		EK	SDYK											
N35a	28	1426	1637	20	1,43	15	8,23	3,144	18,5	1,83	21,0	LC 12/13	0,48	9082
	56	1394	1567	19	1,40	16		3,391	19,5	1,91			0,49	9178
	90	1370	1585	20	1,19	19		3,435	22,8	1,94			0,49	11630
N35b	28	1263	1529	19	1,21	14	8,35	3,128	15,4	1,59	17,4	LC 12/13	0,45	7318
	56	1318	1540	19	1,00	16		3,282	19,0	1,66			0,46	8317
	90	1356	1582	20	1,11	18		3,409	22,6	1,73			0,47	8670
N50a	28	1468	1758	24	2,54	15	9,19	3,474	26,0	1,89	27,6	LC 20/22	0,52	11928
	56	1487	1725	24	2,34	16		3,481	28,9	1,99			0,52	13010
	90	1438	1694	24	2,24	18		3,528	31,7	2,07			0,52	12557
N50b	28	1189	1426	21	1,61	10	11,88	3,054	13,1	1,19	15,9	LC 8/9	0,43	6009
	56	1235	1472	24	1,67	12		3,226	16,1	1,48			0,44	7298
	90	1222	1442	23	1,47	11		3,260	18,3	1,47			0,44	7588
S35a	28	1468	1748	23	1,96	17	7,90	3,359	21,5	1,74	25,6	LC 16/18	0,51	8229
	56	1501	1752	20	1,56	21		3,577	25,8	2,27			0,50	11810
	90	1503	1760	22	1,54	22		3,586	26,4	2,32			0,51	11957
S35b	28	1191	1438	20	1,45	9	8,27	2,867	9,4	1,11	12,4	-	0,41	4924
	56	1188	1430	21	1,31	12		2,971	11,8	1,11			0,42	5729
	90	1122	1413	21	1,23	13		2,839	13,0	1,10			0,43	5815
S50a	28	1495	1774	26	3,22	18	8,65	3,400	27,6	1,53	28,6	LC 20/22	0,51	12508
	56	1457	1783	27	2,91	24		3,459	28,7	1,88			0,51	12512
	90	1461	1803	28	2,32	24		3,501	32,7	2,07			0,51	13234
S50b	28	1205	1456	24	2,37	8	9,65	2,982	11,5	1,20	11,7	-	0,41	4296
	56	1209	1475	25	2,42	10		3,025	14,2	1,35			0,42	6762
	90	1253	1490	26	1,96	15		3,175	18,7	1,71			0,43	8107
V35a	28	1426	1762	24	2,06	17	6,04	3,214	21,6	1,69	24,7	LC 16/18	0,51	9785
	56	1482	1780	23	1,79	20		3,390	25,8	2,26			0,52	10616
	90	1489	1784	22	1,66	20		3,418	28,2	2,17			0,53	13324
V35b	28	1212	1490	21	1,63	11	6,25	2,909	10,3	1,05	10,5	-	0,42	5418
	56	1217	1504	21	1,61	11		3,007	14,1	1,16			0,43	6712
	90	1225	1509	22	1,35	14		3,058	14,6	1,28			0,46	6973
V50a	28	1480	1820	28	3,41	17	7,92	3,416	26,6	1,74	29,4	LC 20/22	0,52	9966
	56	1480	1806	25	2,59	23		3,458	28,9	1,87			0,53	12971
	90	1506	1846	26	2,14	24		3,527	30,4	2,00			0,54	13677
V50b	28	1264	1579	25	3,12	9	8,13	3,036	14,4	1,25	17,2	LC 12/13	0,43	7305
	56	1265	1583	26	2,87	10		3,052	15,6	1,36			0,43	8029
	90	1295	1645	26	2,05	13		3,149	19,9	1,81			0,46	8523
Çimento Hamuru							19,58	-	-	-	-	-	-	-

Çizelge Ek3 Boşluk ölçüm sonuçları

Kod	Yaş (gün)	Optik Mikroskop		Cıva Porozimetresi		Porozite (p_t , %)	Boşluk Aralığına Bağlı Olarak Porozite		
		Porozite (p_{om} , %)	Ortalama Boşluk Çapı (D_m , μm)	Porozite (p_{Hg} , %)	Ortalama Boşluk Yarıçapı (r_m , nm)		$p_{<10nm}$	$p_{10nm-3\mu m}$	$p_{100-625\mu m}$
N35a	28	1,21	993,01	34,26	61,92	35,47	1,44	32,86	1,21
	56	1,00	953,25	30,56	61,24	31,56	1,04	29,52	1,00
	90	0,95	515,83	28,48	35,52	29,43	0,00	28,48	0,95
N35b	28	2,87	908,37	35,39	80,09	38,26	0,89	34,50	2,87
	56	2,11	745,51	32,43	56,24	34,54	1,40	31,03	2,11
	90	1,24	683,55	30,61	43,39	31,85	0,00	30,61	1,24
N50a	28	1,41	945,32	30,89	79,49	32,30	1,14	29,75	1,41
	56	1,37	825,87	36,72	68,35	38,09	0,96	35,76	1,37
	90	1,19	764,91	24,87	49,43	26,06	0,00	24,87	1,19
N50b	28	1,67	423,95	35,35	113,45	37,02	1,44	33,91	1,67
	56	1,62	438,93	34,58	80,85	36,20	1,74	32,84	1,62
	90	1,00	405,35	33,09	71,45	34,09	1,06	32,03	1,00
S35a	28	1,43	1216,96	30,08	68,37	31,51	2,90	27,18	1,43
	56	2,34	1012,45	33,73	73,60	36,07	0,89	32,84	2,34
	90	1,33	951,34	36,60	52,23	37,93	2,13	34,47	1,33
S35b	28	2,22	474,33	37,14	111,62	39,36	2,02	35,12	2,22
	56	1,83	307,49	31,68	69,98	33,51	1,69	29,99	1,83
	90	1,53	641,77	29,03	62,97	30,56	0,00	29,03	1,53
S50a	28	0,50	468,56	31,10	71,96	31,60	1,11	29,99	0,50
	56	0,54	588,18	28,71	57,17	29,25	0,87	27,84	0,54
	90	0,27	511,37	25,09	62,09	25,36	0,00	25,09	0,27
S50b	28	4,26	234,52	45,44	173,21	49,70	1,91	43,53	4,26
	56	2,69	291,53	43,64	148,49	46,33	1,48	42,16	2,69
	90	0,27	270,05	41,45	91,69	41,72	1,41	40,04	0,27
V35a	28	1,45	970,25	32,53	66,86	33,98	2,16	28,42	1,45
	56	0,77	749,94	30,58	62,32	31,35	1,14	29,44	0,77
	90	0,65	695,81	31,51	55,66	32,16	1,18	30,33	0,65
V35b	28	1,99	963,95	41,21	121,98	43,20	1,10	40,11	1,99
	56	1,06	549,19	39,44	112,98	40,50	1,94	37,50	1,06
	90	1,05	321,28	26,59	61,40	27,64	1,23	25,36	1,05
V50a	28	0,62	728,40	30,94	57,55	31,56	0,99	29,95	0,62
	56	0,33	669,40	27,75	58,35	28,08	1,62	26,13	0,33
	90	0,31	698,00	30,88	78,68	31,19	1,73	29,15	0,31
V50b	28	2,72	239,24	39,97	124,01	42,69	2,33	37,64	2,72
	56	0,83	273,77	39,33	130,88	40,16	0,61	38,72	0,83
	90	0,19	229,44	37,23	99,81	37,42	1,40	35,83	0,19

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 27.10.1975

Doğum yeri İstanbul

Lise 1990-1993 Özel Tercüman Lisesi

Lisans 1994-1999 Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fak.
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1999-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Yapı Anabilim Dalı, Yapı Programı

Doktora 2002-2009 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Müh. Yapı Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1998-1999 İNGER Mühendislik

1999-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi