

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PERLİTİN PUZOLANİK AKTİVİTESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Mim. Ülger BULUT

Anabilim Dalı : MİMARLIK

Programı : YAPI BİLİMLERİ

ARALIK 2007

PERLİTİN PUZOLANİK AKTİVİTESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Mim. Ülger BULUT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Eylül 2007

Tezin Savunulduğu Tarih : 5 Aralık 2007

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Leyla TANAÇAN

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Erol GÜRDAL (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY (M.S.G.S.Ü.)

Prof.Dr. Nihal ARIOĞLU (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü.)

ARALIK 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca yakın ilgi ve desteğini gördüğüm hocam Doç.Dr. Leyla TANAÇAN'a;

Bilgi ve görüşlerinden yararlandığım hocamlarım Prof.Dr. Erol GÜRDAL ve Prof.Dr. Halit Yaşa ERSOY'a;

Deney sürecinde yardımını esirgemeyen, Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı teknisyeni İbrahim ÖZTÜRK'e;

Mineralojik incelemelerde yardımcı olan Kimya Metalürji Fakültesi araştırma görevlileri Nuri SOLAK ve Tahsin BOYRAZ'a;

Deneylerde kullanılan kireci sağlayan Lafarge'a ve kumu sağlayan Set Çimento'ya
Teşekkürü borç bilirim.

Eylül 2007

Ülger BULUT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	vii
TABLO LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Problemin Tanımlanması	1
1.2. Amaç	2
1.3. Kapsam	2
1.4. Yöntem	3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	4
2.1. Bağlayıcılar	4
2.1.1. Kireç	6
2.1.2. Kireç harçları	9
2.2. Puzolanlar	10
2.2.1. Puzolanların tanımı	11
2.2.2. Puzolanların sınıflandırılması	13
2.2.2.1. Doğal puzolanlar	15
2.2.2.2. Yapay puzolanlar	17
2.2.3. Puzolanik reaktiviteyi belirleyen etkenler	18
2.2.3.1. Atom yapısı	18
2.2.3.2. Kimyasal bileşim	19
2.2.3.3. Kalsinasyon	19
2.2.3.4. Aktivasyon	20
2.2.4. Kireç-puzolan harçlarında puzolanik aktivitenin kimyasal yapısı	22
2.2.4.1. Hidratasyon	22
2.2.4.2. Kimyasal tepkime	22
2.2.5. Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesiyöntemleri	24
2.2.5.1. Kimyasal değerlendirme yöntemi	24
2.2.5.2. Fiziksel değerlendirme yöntemi	25

2.2.5.3. Mekanik değerlendirme yöntemleri	26
2.2.5.4. Mikro yapısal değerlendirme yöntemleri	26
2.2.5.5. Puzolan standartlarının aktivite değerlendirme ölçütleri	27
2.2.6. Kireç-puzolan harçlarının performans parametreleri	28
2.2.6.1. İşlenebilme ve priz yapma	29
2.2.6.2. Dayanım (mukavemet)	29
2.2.6.3. Durabilite	30
2.2.6.4. Uygulanabilirlik ve ekonomiklik	31
2.3. Perlit	31
2.3.1. Perlitin tanımı ve özellikleri	32
2.3.1.1. Perlitin fiziksel özellikleri	32
2.3.1.2. Perlitin kimyasal özellikleri ve genişletilmesi	34
2.3.1.3. Perlitin minerolojik kompozisyonu	34
2.3.2. Perlit rezervleri ve kullanım alanları	35
2.4. Puzolanlar İle İlgili Yapılmış Çalışmalar	37
2.4.1. Perlitin puzolanik aktivitesinin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar	48
2.4.2. Değerlendirme	50
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	51
3.1. Ödeneyler	51
3.1.1. Perlit-kireç harcı ön deney ilkeleri	51
3.1.2. Malzeme ve numune üretimi	52
3.1.2.1. Puzolan: perlit	53
3.1.2.2. Bağlayıcı: kireç	57
3.1.2.3. Kum	58
3.1.2.4. Karışım suyu	58
3.1.2.5. Kimyasal katkıları	58
3.1.3. Puzolanik aktivite deneyi	59
3.1.4. Perlit-kireç harcının puzolanik aktivitesinde etkin parametrelerin incelenmesi	60
3.1.4.1. Bileşen tür ve oranlarının puzolanik aktivite etkisi	60
3.1.4.2. Kür sıcaklığının puzolanik aktiviteye etkisi	64
3.1.4.3. Kür süresinin puzolanik aktiviteye etkisi	64
3.1.5. Ön deney sonuçları ve değerlendirilmesi	65
3.2. Deneyler	72
3.2.1. Taze harç deneyleri	74
3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler	74
3.2.2.1. Birim hacim ağırlığı ve sonuçları	75

3.2.2.2. Özgöl ağırlık ve sonuçları	75
3.2.2.3. Porozite ve sonuçları	75
3.2.2.4. Kapiler su emme tayini ve sonuçları	76
3.2.2.5. Atmosfer basıncı altında su emme deneyi ve sonuçları	77
3.2.2.6. Buhar geçirgenlik tayini ve sonuçları	77
3.2.2.7. Donma-çözülme dayanımı ve sonuçları	78
3.2.2.8. Rötire ve sonuçları	79
3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler	79
3.2.3.1. Basınç dayanımı	79
3.2.3.2. Eğilme dayanımı	80
3.2.3.3. Ultrases hızı ve elastiklik modülü	80
3.2.4. Mineralojik yapının belirlenmesi için yapılan deneyler	80
3.2.4.1. X Işınları difraksiyon testi	81
3.2.4.2. Diferansiyel termal analiz-termogravimetrik analiz	81
4. DENEY SONUÇLARININ PERLİTİN PUZOLANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ	83
4.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	83
4.2. Sertleşmiş Harç Deneyi Sonuçları	85
4.2.1. Birim hacim ağırlığı deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	85
4.2.2. Özgöl ağırlık sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	87
4.2.3. Porozite deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	89
4.2.4. Kapiler su emme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	92
4.2.5. Atmosfer basıncı altında su emme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	93
4.2.6. Buhar geçirgenlik deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	98
4.2.7. Donma-çözülme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	98
4.2.8. Rötire deneyi sonuçlarının perlitin puzalanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	99
4.2.9. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	100
4.2.10. Eğilme dayanımı deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik	

özeliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	103
4.2.11. Ultrases hızı ve elastiklik modülü deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	106
4.2.12. Mineralojik yapı deneylerinin perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi	109
4.2.12.1. X Işınları difraktometrisi	109
4.2.12.2. Termogravimetrik analiz	111
4.3. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi	113
4.3.1. Taze harç deneyleri sonuçlarının irdelenmesi	113
4.3.2. Sertleşmiş harç deneyleri sonuçlarının irdelenmesi	114
4.3.2.1. Boşluk özellikleri	114
4.3.2.2. Kararlılık	119
4.3.2.3. Dayanım özellikleri	119
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	125
KAYNAKLAR	128
EKLER	134
ÖZGEÇMİŞ	162

KISALTMALAR

AFm	: Hidrate Kalsiyum Trisülfoalüminat
AFt	: Hidrate Kalsiyum Monosulfoalüminat
ASTM	: The American Society for Testing and Materials
CSH	: Kalsiyum Silikat
CSAH	: Kalsiyum Alümino Silikat
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
TS	: Türk Standartları
XRD	: X Işınları Difraktometrisi (X Ray Diffraction)
XRF	: X Işını Floresan Spektrometresi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1:	Kirecin üretim aşamaları ve katılaşma tepkimeleri 7
Tablo 2.2:	Farklı puzolanların kimyasal kompozisyonları 12
Tablo 2.3:	Mielenz ve diğerlerine göre puzolan sınıflandırması 14
Tablo 2.4:	Mehta'ya göre puzolanların sınıflandırması 14
Tablo 2.5:	Puzolanların aktif maddeleri ve petrografik sınıflandırması.....15
Tablo 2.6:	Puzolanların beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri.....16
Tablo 2.7:	Puzolanlarda aranacak kimyasal özellikler (TS 25) 27
Tablo 2.8:	Kireç-puzolan durabilite özellikleri (Larew, 1976).....30
Tablo 2.9:	Perlitin fiziksel özellikleri 33
Tablo 2.10:	Ham perlit, genleştirilmiş perlit ve malzeme ile ilgili TSE Standartları 36
Tablo 3.1:	Ön deney programı 53
Tablo 3.2:	Farklı puzolan örneklerinin öğütülebilme-Blaine özgül yüzey değerleri ilişkisi (Okucu, 1998).....54
Tablo 3.3:	Perlitin kimyasal analizi.....54
Tablo 3.4:	Perlitin XRF analizi 55
Tablo 3.5:	Perlit ile ilgili deneyler ve sonuçları.....56
Tablo 3.6:	Toz tutma filtresinde elde edilen perlitin elek analizi 57
Tablo 3.7:	Deneylerde kullanılan kirecin kimyasal özelliği 57
Tablo 3.8:	Standart kumun kimyasal analizi.....58
Tablo 3.9:	Standart kumun elek analizi 58
Tablo 3.10:	Puzolanik aktivite deneyi karışım oranları.....59
Tablo 3.11:	Puzolanik aktivite deneyi sonuçları.....59
Tablo 3.12:	Öndeney harçlarındaki perlit miktarları.....61
Tablo 3.13:	Öndeney harçlarında farklı dane boyutlarında perlit kullanılması 61
Tablo 3.14:	Öndeney harçlarında farklı su miktarları kullanımı 62
Tablo 3.15:	Öndeney harçlarında CaO / Ca(OH) ₂ kullanımı.....63
Tablo 3.16:	Öndeney harçlarında katkı tür ve oranları.....64

Tablo 3.17:	Öndeney harçlarının farklı sıcaklıklarda kürlenmesi.....	64
Tablo 3.18:	Öndeney harçlarında kür süresi etkisinin incelenmesi	65
Tablo 3.19:	Öndeney sonuçları	66
Tablo 3.20:	Deney Programı.....	73
Tablo 3.21:	Taze harç deneyleri ve birim hacim ağırlığı, özgül ağırlık, porozite-kompasite sonuçları	75
Tablo 4.1:	Taze harç birim hacim ağırlığı ve kıvam değerleri.....	84
Tablo 4.2:	Harç kıvamları ve akıcılık değerleri (Erdoğan, 2003)	113
Tablo 4.3:	Bazı yapı malzemelerinin birim ve özgül ağırlıkları ile su emme değerleri (Kocataşkın, 2000)	115
Tablo 4.4:	Bazı malzemelerin kapilarite katsayıları (Kocataşkın, 2000)	117
Tablo 4.5:	Fabrika tuğlalarının hacim ağırlığı ve basınç dayanım değerleri (TS 705, 1985)	121
Tablo 4.6:	Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS 2510, 1977)	122
Tablo 4.7:	Beton blok ve briket basınç mukavemeti (TS 406, 1988)	122
Tablo 4.8:	Gazbeton yapı elemanlarının sınıflarına göre basınç dayanımları (TS 453, 1988)	122
Tablo 4.9:	Harç çimentosu basınç dayanım değerleri (TS 22-1 ENV 413-1) ...	123

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1:	TS EN 459-1'e göre kireç tipleri ve uygulama alanları 7
Şekil 2.2:	Puzolanların sınıflandırılması 13
Şekil 2.3:	Perlitin taş halde görünümü 32
Şekil 2.4:	Perlitin toz halde görünümü 32
Şekil 3.1:	Ön deney basınç dayanımı sonuçları 68
Şekil 3.2:	Ön deney eğilme dayanımı sonuçları 70
Şekil 3.3:	Öndeney ultrases hızı sonuçları.....71
Şekil 3.4:	Kapiler su emme deneyinin yapılışı 76
Şekil 3.5:	Buhar geçirgenlik deney düzeneği 77
Şekil 3.6:	Basınç dayanımı ölçümü 79
Şekil 3.7:	Eğilme dayanımı ölçümü 79
Şekil 3.8:	Ultrases ölçüm cihazı.....80
Şekil 4.1:	Katkısız ve katkılı taze harçların birim hacim ağırlığı 84
Şekil 4.2:	Katkısız ve katkılı taze harçların kıvam değerleri.....84
Şekil 4.3:	Farklı kürleme koşullarında 7-28-91 günlük katkısız ve katkılı numunelerin birim hacim ağırlığı değişimleri.....85
Şekil 4.4:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin özgül ağırlık değerleri 87
Şekil 4.5:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin gerçek porozite yüzdeleri.....89
Şekil 4.6:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin kapiler su emme değerleri 92
Şekil 4.7:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin su emme yüzdeleri.....94
Şekil 4.8:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin hacimsel su emme (görünür porozite) yüzdeleri 96
Şekil 4.9:	Buhar difüzyon direnç katsayıları.....98
Şekil 4.10:	Farklı kür koşullarında 7- gün kürlen numunelerin sonraki 7 ve 28. günlerdeki rötre kaybı 99
Şekil 4.11:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin basınç

	dayanımı değerleri	100
Şekil 4.12:	Sodyumsülfat katkılı numunede glamber tuzu oluşumu.....	102
Şekil 4.13:	Farklı koşullarında 91 günlük numunelerin basınç-porozite ilişkisi	103
Şekil 4.14:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerleri	104
Şekil 4.15:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin ultrases hızı değerleri	106
Şekil 4.16:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin elastiklik modülü değerleri.....	107
Şekil 4.17:	Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanımı-elastiklik modülü ilişkisi	108
Şekil 4.18:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin birim hacim ağırlığı bağıl değerleri.....	114
Şekil 4.19:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin porozite yüzdelерinin bağıl değerleri.....	115
Şekil 4.20:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin kapiler su emme değerleri.....	116
Şekil 4.21:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin su emme değerleri	117
Şekil 4.22:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanımı bağıl değerleri	119
Şekil 4.23:	Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin eğilme dayanımı bağıl değerleri.....	123
Şekil 4.24:	Eğilme-basınç dayanımları oranları.....	124

PERLİTİN PUZOLANİK AKTİVİTESİ

ÖZET

Sürdürülebilir yapı üretimi bilincinin, yapı malzemesi üretiminden başlayarak dikkate alınması gerekir. Sürdürülebilir bir malzemenin, üretiminde kullanılan hammaddesinin rezervinden çıkarılmasından, malzemenin yok edilmesi sürecine kadar geçen aşamalarda, ekolojik kriterleri içinde barındırması gerekir; tüm süreçlerde, kullanılan enerjinin ve çevreye yaydığı zararlı gazların en az düzeyde olması, öncelikli kriterlerdir.

Günümüz yapı üretiminde yaygın olarak tüketilen çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye olumsuz etkileri değerlendirildiğinde, alternatif malzeme-bağlayıcı araştırmaları gereği ortaya çıkmaktadır.

En eski yapı malzemelerinden olan puzolanlı kireç harçlarının yüksek durabilite özelliklerine karşın, ortam sıcaklığında kürlendiklerinde yavaş dayanım kazanmaları, kullanımlarının azalmasına neden olmuştur. Bu bağlamda kireç harcının iyileştirilerek yapısal kullanımının yaygınlaştırılması, çalışmanın amaçlarından biridir.

Diğer yandan, geliştirilmiş perlit olarak yapı sektöründe kullanılmakta olan malzemenin geliştirilmeden, puzolanik özeliğinden yararlanılarak kullanılması olanaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması bu çalışmanın ana amacıdır.

Bu çalışma kapsamında, perlitin puzolanik aktivitesine etki eden parametrelerin belirlenmesi, bu parametrelerin, aktiviteyi artırıcı yönde geliştirilmesi olanakları araştırılmıştır. Saptanan en uygun kompozisyonlar üzerinde puzolanik aktiviteyi geliştirecek yöntemlerin belirlenmesi, katkı maddeleri ile puzolanik etkinliğin geliştirilmesi olanakları incelenmiştir.

İyileştirilmiş perlitli kireç harcının yapı malzemesi olarak kullanılması için boşluk özellikleri, boyutsal kararlılık ve dayanım özelliklerini belirleyici deneyler yapılmıştır.

Çalışmanın esasını deneysel yöntem oluşturmakla birlikte, süreçlere göre izlenen yöntem: konuyla ilgili ASTM ve TS standartlarının incelenmesi, perlitin puzolanik aktivitesinin geliştirilmesi için parametrelerin değerlendirilmesi, yapılacak deneylerin tespiti ve deneysel çalışma için nedenlerin incelenmesi, deney bulgularının, üretilen malzemenin yapıda kullanımı için gerekli performans ölçütleri için irdelenmesi, sonuç değerlendirmesiyle yapıda kullanılabileceği yerlerin önerilmesi şeklinde özetlenebilir.

Deneye dayalı bu araştırma ile elde edilen bulgular ve bu bulguların değerlendirilmesi sonucunda, amaca uygun nitelikte iç yapı bloğu ve harç elde edilebildiği saptanmıştır.

POZZOLANIC ACTIVITY OF PERLITE

SUMMARY

The consciousness of sustainability of production of buildings should be considered beginning from building materials production. From the raw material process to recycling, whole phases of a sustainable material should be fit to ecological criteria. Fewer amounts of embodied energy and diffusion of harmful gas emission are the priority criteria for whole phases.

When the high cost and the unconstructive negative environmental affects of the frequently used material cement is considered, the certain need for a research of an alternative adherent material appears.

Although, one of the oldest construction materials; pozzolanic lime mortars, have high durability, the long term strength development caused to decrease of its usage. In this context, one of the aims of this study is widespread of use of lime mortars in construction.

On the other hand, the main objective of this study is to expand the use of perlite as a raw material in construction sector as a natural pozzolanic material, without dilatation which currently is used as.

In this study, determining the parameters of perlite effecting pozzolanic activity, and developing these parameters on increasing the features of activity, has been the main objective. Determination of the methods to develop increase of the pozzolanic activity on the most convenient compositions and the effectiveness of pozzolanic activity with additives is studied.

For searching usage possibility as construction materials of modified perlite lime mortars, the experiments have been done for testing determine the necessities like porosity features, dimensional stability and strength features of the perlite lime mortar.

Although the principle of this study based on experimental methods, also different methods have been used for different phases. By studied ASTM, TS standards and articles which are related with subject literature scanned. Parameters like curing, setting time, raw materials ratio and additives which effect to perlite-lime mortar durability are scrutinized by different perlite-lime mortar samples. And then convenient mortar samples were tested. Finally results were evaluated by comparing existing materials' features.

Data which obtained with results of this experimental study and evaluation of these data indicates that perlite-lime mortars are convenient for restorations of historical masonry, inner side brick and mortars.

1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkeler kategorisinde yer alan ülkemizde, inşaat ve yapı malzemeleri üretimi ekonominin lokomotif sektörleridir. Bununla birlikte nüfus potansiyelindeki artış ve paralelinde yapı gereksinimi göz önüne alındığında, yerel kaynakların kullanıldığı, düşük maliyetli, üretimi, kullanımı ve dönüşümü safhalarında çevreye en az zarar veren yapı malzemesi üretilmesi büyük önem taşımaktadır.

En eski yapı malzemelerinden olan puzolanlı kireç harçları yüksek durabilite özelliklerine karşın, ortam sıcaklığında kürlendiklerinde yavaş dayanım kazanırlar. Daha hızlı priz yapan ve kısa sürede yüksek dayanıma ulaşan portland çimentosunun bulunuşuyla puzolanlı kireç harçlarının kullanımı azalmıştır. Öte yandan puzolanlı kireç harçları, düşük maliyeti ve yüksek durabilitesi ile bazı uygulamalar için cazibesini sürdürmüştür.

Günümüz yapı üretiminde yaygın olarak tüketilen çimentonun yüksek maliyeti ve çevreye olumsuz etkileri değerlendirildiğinde, alternatif malzeme-bağlayıcı araştırmaları gereği ortaya çıkmaktadır.

1.1. Problemin Tanımlanması

Dünyadaki toplam 6.628,1 milyon ton'luk perlit rezervinin 4.489 milyon ton'u, yani yaklaşık olarak %68'i ülkemizde yer almaktadır. Ülkemiz perlit bakımından zengin kaynak ve kapasiteye sahip olmasına rağmen yurtiçi talep çok sınırlı kalmaktadır. Devlet Planlama Teşkilatı 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı'na göre, Türkiye'deki geliştirilmiş perlit tüketiminin %60'ı inşaat, %20'si sanayi, %17'si tarım ve %3'ü diğer kullanım alanlarına ait olduğu, bu miktarların da yıllık geliştirilmiş perlitin üçte biri civarında olduğu yer almaktadır.

Genleştirilmiş perlit üretiminin enerji-yoğun bir süreç olması ve mevcut rezervlerin kırılmış elenmiş ham perlit şeklinde olması nedenleriyle, perlitin geliştirilmeden değerlendirilmesi gerekliliğinden söz edilebilir.

1.2. Amaç

Sürdürülebilir yapı üretimi bilincinin yapı malzemesi üretiminden başlayarak dikkate alınması gerekir. Sürdürülebilir bir malzemenin, üretiminde kullanılan hammaddesinin rezervinden çıkarılmasından, malzemenin yok edilmesi sürecine kadar geçen aşamalarda ekolojik kriterleri içinde barındırması gerekir; tüm süreçlerde kullandığı enerji, çevreye yaydığı zararlı gazların en az düzeyde olması öncelikli kriterlerdir.

Bu bağlamda kireç harcının yapısal kullanımının yaygınlaştırılması, çalışmanın amaçlarından biridir.

Diğer yandan, geliştirilmiş perlit olarak yapı sektöründe kullanılmakta olan malzemenin geliştirilmeden, puzolanik özeliğinden yararlanılarak kullanılması olanaklarının araştırılması ve kullanımının yaygınlaştırılması bu çalışmanın ana amacıdır. Perlitin puzolanik madde olarak etkinliğinin incelenmesi ve geliştirilmesi ile:

- Kireç bağlayıcı harçlarda su etkisine karşı dayanıklılık sağlanmış olur.
- Çimento harçlarında ise puzolanlı çimentolarda bilinen yararlar sağlanmış olur.
- Öte yandan mevcut yerel kaynakların yapı sektöründe kullanılması sağlandığı gibi, kırılmış elenmiş perlitin geliştirilmeden önce elde edilen ve hiç bir şekilde kullanılmayan üretim artığı kullanılarak da ekolojik ve dolayısıyla ekonomik açıdan ikinci bir yarar sağlanmış olacaktır.

Bu amaca yönelik olarak, perlitin puzolanik etkinliğine etki eden parametreler değiştirilerek, farklı etkilerin aktivite üzerindeki etkisi deneysel yöntemle araştırılmıştır.

1.3. Kapsam

Perlitli yapı malzemesi geliştirilmesi olanaklarının araştırılması amacıyla yapılan bu çalışma kapsamında,

- Perlitin puzolanik aktivitesine etki eden parametrelerin (dane boyutu,

bağlayıcı (kireç) - puzolan (perlit) karışım oranları, su/bağlayıcı oranı, kürleme sıcaklığı, kürleme süresi) belirlenmesi, bu parametrelerin, aktiviteyi artırıcı yönde geliştirilmesi olanakları araştırılmış;

- Bu parametrelerin etki düzeyleri mekanik yöntemle belirlendikten sonra, saptanan en uygun kompozisyonlar üzerinde puzolanik aktiviteyi geliştirecek yöntemlerin belirlenmesi, katkı maddeleri ile puzolanik etkinliğin geliştirilmesi olanakları incelenmiş;
- Puzolanik aktivitenin geliştirilmesi amacıyla yapılan deneylerin, daha derin bir incelenme olanağını sağlamak için, mekanik yöntemlerle ve yanı sıra puzolanik reaksiyon sonunda meydana gelen hidratasyon ürünlerini tespit etmek amacıyla XRD ve DTA-TG analizi yöntemleri uygulanmış;
- İyileştirilmiş perlitli kireç harcının yapı malzemesi için gerekli durabilite özelliklerinin tespiti için kapiler su emicilik, ağırlıkça ve hacimsel su emicilik, buhar geçirgenlik, donma-çözünme dayanımı, rötre deneyleri yapılmıştır.

1.4. Yöntem

Çalışmanın esasını deneysel yöntem oluşturmakla birlikte, süreçlere göre izlenen yöntem:

- Yukarıda tanımlanan problem alanında yapılmış olan puzolanik aktivite ve perlit ile ilgili bilimsel çalışmaların, konuyla ilgili ASTM ve TSE standartlarının incelenmesi;
- Perlitin puzolanik aktivitesinin geliştirilmesi için parametrelerin değerlendirilmesi, yapılacak deneylerin tespiti ve deneysel çalışma için nedenlerin incelenmesi;
- Deney bulgularının, üretilen malzemenin yapıda kullanımı için gerekli performans ölçütleri için irdelenmesi;
- Sonuç değerlendirmesiyle yapıda kullanılabileceği yerlerin önerilmesi

şeklinde özetlenebilir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çalışmanın bu bölümünde bağlayıcılar ve kireç, puzolan ve perlit konuları ele alınacak; özellikleri ve kullanımları ilgili yapılmış çalışmalar incelenecektir.

2.1. Bağlayıcılar

“Bağlayıcılar, kırma taş, tuğla kırıkları, çakıl, kum gibi dolgu maddelerini birbirine bağlayarak, bir anlamda yapıştırarak yapay taş oluşumuna imkan veren malzemelere verilen addır.” (Akman, 1989)

Bağlayıcı maddelerin sıvı halden katı hale geçmesine “priz” denir. Priz fiziko-kimyasal bir olaydır; fiziksel nedeni kristalleşme, kimyasal nedeni moleküler yapısına hidrat suyu alması yani hidratasyondur.

Kimyasal özellikleri ve bağlama mekanizmaları değişik olan bağlayıcı grupları olarak alçı, kireç, çimento türlerinden başka katran, kil ve koloidal özellikli bazı maddeler de sayılabilir.

Bağlayıcıda olması gerekli temel özellikleri işlenebilirlik ve priz yapabilme, dayanım ve durabilite şeklinde özetlemek mümkündür.

İşlenebilirlik, harcın priz yapmadan önceki, taze hali için geçerli bir özelliktir. Harcın kolay karıştırılabilmesi ve yerleştirilebilmesi; karışırken, taşınırken ve yerleşirken ayrışmaması, homojenliğini yitirmemesi işlenebilirliği ile ifade edilir. Priz süresinin uzun olmaması, üretimde önemli bir ölçüttür.

Prizini tamamlamış olan bir harcın ön görülen taşıyıcılık ve benzeri mukavemeti sağlaması beklenir. Bu dayanıma kısa sürede ulaşabilmesi önemlidir.

Prizini tamamlamış bir harcın hava, su ve çevresel etkilerle donma-çözülme, ıslanma-kuruma, kimyasallara maruz kalma hatta iç yapı reaksiyonları gibi etkenlere direnç göstermesi gereklidir.

Akman (2003)’a göre, ilk çağlarda inşaat teknolojisinin en büyük sorunu bağlayıcı

madde olmuştur. Bağlayıcı olarak nitelendirilmesi doğru olmasa da, doğal taş, kerpiç ve tuğla duvarların ilk bağlayıcı harcı çamurdur. Prehistorik devirde alçı, bitüm ve bir oranda kireç denenmiş ancak, bu maddelerin elde edilmesi için hammaddenin pişirilmesi işlemine gerekli yüksek sıcaklık sağlanamaması engel oluşturmıştır. Alçı elde etmek için alçı taşının 190 °C’de pişirilmesi nispeten kolay olduğundan alçı bağlayıcı kullanımı öncelik kazanmıştır.

Beton ve çimentonun bulunmasında önemli rolü olan kireç, neolitik ve kalkolitik devirlerde, kireç taşı olarak bilinen kalsiyum karbonatın (CaCO_3) kirece dönmesi için gerekli 900 °C sıcaklık üretilemediğinden, yalnızca kireç beyaz badana malzemesi olarak kullanılabilmektedir.

Diğer yandan kirecin hidrolik bağlayıcı olarak kullanımı neolitik dönemlere dayanmaktadır. Yunanlılar Santorin adası toprağını, Romalılar Vezüv volkanı yakınındaki Pozzuoli toprağını kireç ile karıştırarak bir tür hidrolik bağlayıcı üretmişlerdir.

Kireç ile tuğla kırıkları ve tozundan elde edilen, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı yapılarında kullanılmış olan “horasan harcı”, farklı uygarlıklarda farklı isimler almıştır.

18. yüzyılda, Romalıların puzolanlı bağlayıcıları üzerinde, marnlı taşların pişirilmesi, kil ve kireç taşı oranlarının değiştirilmesi şeklinde yapılan araştırmalar günümüz çimentosunun geliştirilmesini sağlamıştır.

1813’te Fransız Vicat, kil ve kireç taşını karıştırıp pişirerek günümüzde “hidrolik kireç” olarak bilinen bağlayıcıyı geliştirmiştir. Hidrolik kireç söndürüldüğünde Ca(OH)_2 sönmüş kireç ve çimentonun ana karma oksiti olan 2CaO.SiO_2 a dönüşür. İnce öğütülmüş kireç taşını ince bölümlenmiş kille karıştırıp fırına koyan ve tüm CO_2 gazı uçana kadar pişiren Smeaton, bu çimento ile yapılan taşın Portland kasabesindeki taşlar kadar sağlam olduğunu söyleyerek çimentoya portland ismini vermiş olur.

19. ve 20. yüzyıl başlarındaki bu öncül çalışmalardan sonra çimento endüstrisinde ve beton teknolojisinde büyük gelişmeler sağlandı; kimyasal, mineralojik ve mekanik yönde çimento ve beton alanında bilimsel çalışmalar sürmektedir.

2.1.1. Kireç

Kireç, kireç taşının $[CaCO_3 - CaMg (CO_3)_2]$ çeşitli derecelerde (850 - 1400 °C) pişirilmesi sonucunda elde edilen, su ile karıştırıldığında cinsine göre hava veya suda katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür. Kireç, içindeki kil miktarına bağlı olarak yalnız havada katılaşma özelliği gösteren “hava kireci” ve hem havada hem suda katılaşma özelliği gösteren “su kireci” (hidrolik kireç) olmak üzere başlıca iki türe ayrılır. Yapı kireçleri, hava kireci türünden olup, kireç sözcüğü yaygın anlamıyla hava kirecini ifade etmektedir.

Kireç, çok eski çağlardan beri insanların kullandığı bir bağlayıcıdır. Mısırlıların kireci kullanarak harç ürettikleri sanılmaktadır. Romalılar ise kirece puzolan katarak Coliseum gibi kalıntıları günümüze kadar ulaşabilmiş yapılar inşa etmişlerdir. Bunlara karşın, günümüzden ancak 600 yıl kadar önce düşey fırınların gelişmesi ile kirecin endüstriyel üretimi mümkün olabilmektedir.

Çimentonun icadına kadar bağlayıcı olarak yapı alanında çok fazla kullanılmış olan bu malzeme, çimentonun yaygınlaşmasıyla birlikte, gitgide özel amaçlarla harç üretiminde kullanılan bir malzeme niteliği kazanmıştır. Örneğin, kirecin harca iyi işlenebilirlik ve aderans özelliği kazandırması nedeniyle sıva yapımında halen çimento ile birlikte, bazı durumlarda örneğin tavan sıvalarında tek başına kullanılmaktadır. Bağlayıcı olarak kireç düşük dayanımlı bir matris oluşturur.

Kirecin üretimi, yapıda kullanılabilir hale getirilmesi iki aşamalı olarak gerçekleşmektedir. Bunlar, doğal kireçtaşının pişirilmesiyle kalsiyum oksit (CaO) haline geçmesi ve kalsiyum oksitin suyla birlikte kalsiyum hidro oksit'i ($CaOH$) oluşturmasıdır. Bu oluşumda, CaO sönmemiş kireç ve $CaOH$ sönmüş kireç diye adlandırılmaktadır.

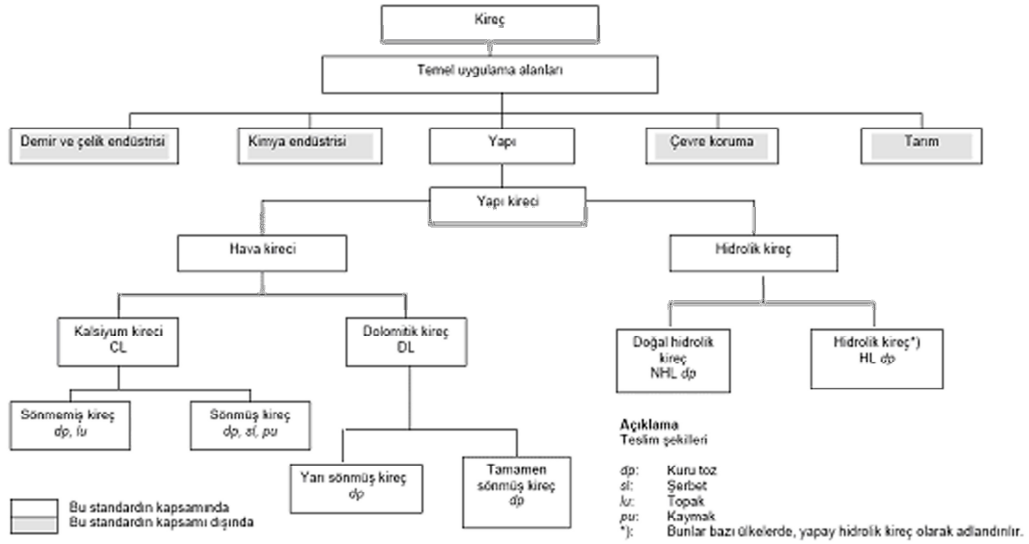
Kireç fazla su ile söndürüldüğünde ürün $Ca(OH)_2 + n H_2O$ şeklindedir ve “yağlı kireç” olarak adlandırılır. Fabrikalarda üretilen sönmüş kireç yalnızca $Ca(OH)_2$ ‘dir ve “hidrate kireç” olarak da bilinir. Bunlar, ince toz halindedir ve çimento gibi torbalar içinde satılır. **Şekil 2.1**’de kireç tipleri ve uygulama alanları gösterilmiştir.

Kirecin üretim aşamaları ve katılaşmasıyla ilgili tepkimeler **Tablo 2.1**’de şematize edilmiştir:

Tablo 2.1: Kirecin üretim aşamaları ve katılma tepkimeleri

Yakılma:	CaCO_3 (900 °C'de)	$\rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$	Sönmemiş kireç (2.1)
Söndürme:	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	$\rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{cal} \uparrow$	Sönmüş kireç (2.2)
Sertleşme:	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2$	$\rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Sertleşmiş kireç (2.3)

Kirecin sertleşmesi üç aşamada olur: kuruma, Ca(OH)_2 formülündeki sertleşme; havanın CO_2 'i ile birleşerek karbonatlaşma; kuruma ve kristalleşme aşaması geçicidir. Kireç suyla karıştırılınca tekrar yumuşar. Asıl sertleşme karbonatlaşma sonucudur (Akman, 1987).



Şekil 2.1: TS EN 459-1'e göre kireç tipleri ve uygulama alanları

Hava kireçlerinin bünyesinde reaksiyon kabiliyeti olan $\text{CaO}+\text{MgO}$ miktarı %80'den fazla (beyaz kireçte MgO %6) olmalıdır. Ancak dolomitli kireçte MgO miktarı %4'ten büyük olabilir. Su kirecinde ise reaksiyona giren $\text{CaO}+\text{MgO}$ miktarı %45-60 oranındadır (Eriç, 1994).

Kirecin hammaddesi kireç taşı (kalker), tebeşir vb kalsiyum karbonat (CaCO_3) ve magnezyum karbonattan (MgCO_3) oluşan kütlelerdir. Eğer kireçtaşı, %90 CaCO_3 içerirse “yüksek kalsiyumlu kireçtaşı” adını alırken, %10'dan çok MgCO_3 içermesi halinde “magnezyumlu kireçtaşı” denir. Ancak taş, %25'ten fazla magnezyum karbonat içerirse “dolomitik kireçtaşı” diye adlandırılır (Smith, 1979).

Kireç harçlarına hidrolik bağlayıcı özelliği vermek amacıyla yapılan çalışmalar sonucu su kireçleri (hidrolik kireç) bulunmuştur. Alüminyum ve silis içeren marnlı

kireç taşlarının yakılması sonucu elde edilen su kireçlerinin mekanik mukavemetleri hava kirecinden yüksektir (**Postacioğlu, 1986**). Su kireçlerinin su içerisinde prizini tamamlaması, suya direnci hiç olmayan hava kireçlerine göre sahip olduğu bir diğer üstünlüktür (**Ersen ve Güleç, 1991**).

Kirecin kalitesini etkileyen birçok etken bulunmaktadır. Kireç taşlarının yumru büyüklüğü, gözenekliliği, gözeneklilik dağılımı gibi fiziksel özellikleri ve kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklüğü sönmemiş kirecin reaktifliğine etki eden en temel etkenlerdendir. Bu etkenlerin yanı sıra su/kireç oranları, sönmemiş kirecin saflığı, dane büyüklüğü, sıcaklık, karıştırma, söndürmede kullanılan suyun saflığı da kirecin özelliklerini etkilemektedir.

Gözenekli, saf ve çok yüksek sıcaklıklarda kalsine edilmemiş kireç taşlarından elde edilen sönmemiş kireç, suyla daha çabuk reaksiyona girer. Öğütülmüş sönmemiş kireç de su ile daha hızlı reaksiyona girer (**Boynton, 1980**). Söndürme işleminde kullanılacak suyun içinde sülfat ya da sülfat iyonlarının bulunması söndürülme işlemini yavaşlatır. Diğer yandan söndürülme suyu içinde bulunan şeker ya da klorür iyonları ise kirecin söndürülme işlemini hızlandırır. Deniz suyu, içerdiği klorür iyonları nedeniyle söndürülme işlemini hızlandırmasına karşın beraberinde tuzlanmaya yol açtığından, kullanılmaz. Söndürülme işlemi sırasında yapılan karıştırma, söndürülme hızını artırarak daha yüksek oranlarda sönmüş kireç elde edilmesini sağlar.

Söndürülme işleminde kullanılan suyun sıcaklığı da elde edilen kirecin kalitesini etkiler. Bu işlem, sıcaklık arttıkça hızlanmakta, ancak yüksek sıcaklık kirecin topaklanmasına neden olmaktadır. Bu ise, kirecin plastik olmasını engellemektedir (**Cowper, 2005**).

Söndürülmüş kirecin uzun yıllar hava ile temas etmeden bekletildikten sonra kullanılması Roma ve onu izleyen dönemlerden bu yana bilinmektedir. Roma döneminde kirecin en az üç yıl bekletildikten sonra kullanılması gerektiği ileri sürülmüştür. Kirecin bekletilme süreci uzatıldıkça, plastik özelliği ve su tutma kapasitesi artmaktadır (**Cowper, 2005**). Bu süreçte kireç kristallerinin (portlandit) boyutları küçülmekte ve havanın karbondioksiti ile reaksiyona girecek yüzey alanı artarak karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşmektedir (**Rodriquez, 1998**).

2.1.2. Kireç harçları

Kireç harç ve sıvaların sertleşmesi, kirecin havada bulunan CO_2 gazı ile karbonatlaşması sonucu gerçekleşir. “Gaz halindeki CO_2 kirecin yüzeyindeki veya gözeneklerindeki yoğunlaşmış su (H_2O) içinde çözünür. Bu çözünmede, hidrojen iyonu (H^+), bikarbonat (HCO_3^-) ve karbonat (CO_3^{2-}) iyonları oluşturarak su asidik hale gelir. Oluşan asidik suda kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) çözünerek kalsiyum (Ca^{+2}) iyonları oluşur. (Ca^{+2}) iyonları ile (CO_3^{2-}) iyonları birleşerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturur” (Böke ve diğ., 2004).

Kirecin karbonatlaşmasına etki eden bir çok etken bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri su miktarı, karbondioksit gazının derişimi ve kirecin gaz geçirgenliğidir (Van Balen ve Van Gemert, 1994). Karbondioksit derişiminin artması ile karbonatlaşma artmaktadır. Suyun yokluğunda veya aşırı miktarda varlığında karbonatlaşma çok yavaş olmaktadır. Ortam bağıl nemi arttıkça karbonatlaşma artmaktadır (Swenson ve Sereda, 1968).

Kireç, kagir malzeme ile yüksek aderans gösteren ve deformasyon kabiliyeti yüksek bir malzemedir. Bu nedenle kireç harçları plastik bir bünyeye sahiptirler; işlenebilme ve yerleşme özellikleri yüksek değerdedir. Geniş boşluk hücrelerine sahip kireç harçlarının, bu boşlukların toplam boşluk içindeki oranının iyi bir dengede olması nedeniyle nem ve buhar geçişini engellememesi, çimento harçlarına göre avantajlı özellikleridir.

Ancak, geleneksel kireç harçlarının, sertleşme için hava ile sürekli temas halinde olma gerekliliği, suya direncinin olmaması ve düşük mukavemetli olması dezavantajlarıdır. Hava kireçlerinin en fazla 1-2 cm kalınlığında tabakalar halinde kullanılması, CO_2 gazının nüfuzu için gereklidir. Kalın tabakalar, iç kısımlarından CO_2 alamadıklarından sertleşmez.

Hava kireçleri yapı içinde, suya maruz olmayan yerlerde; su kireçleri yapı dışında ve su içinde kullanılabilir niteliktedir. Hava kireci ile yapılan sıvalar düşük mukavemetli ancak yüksek aderanslı, elastik bir yapıya sahip olduğundan, özellikle tavan ve iç duvar yüzeyleri için uygundur. “Suya karşı dayanımlarının zayıf olması nedeni ile dış duvarlarda ve yapının subasman hatılı dahil zemin seviyesi altındaki bodrum dış duvarlarında kullanılmaması gereklidir” (Eriç, 1992).

Kireç badana yapımında aderans artırıcı özellik sağlamak amacıyla bazı katkı maddeleri (tutkal, zeytinyağı, tuz vs.) ilave etmek mümkündür. Kireç badanalar, eski önemini kaybetmekle birlikte hijyenikliği, tenneffüs ettirme kabiliyeti, ucuzluğu ve uygulama kolaylığı açısından günümüzde de yaygındır (**Eriç, 1994**).

Günümüzde kirecin yapıda kullanıldığı diğler alanları, duvar harçları, stüka ve iç-dış sıvalar, tarihi duvar restorasyonu, kireç badana, otoklavlanmış gaz beton, kalsiyum silikat tuğlaları, kirecin bağlayıcı olarak bulunduğı kalsiyum silikat esaslı yalıtım malzemeleri şeklinde özetlemek mümkündür (**url 1**).

2.2. Puzolanlar

Milattan yaklaşık 100 yıl önce eski Romalılar, Pozzuoli kasabasının civarında volkanik kül ile söndürölmüş kirecin suyla birlikte karılmasıyla elde edilen malzemenin hidrolik bağlayıcılık özelliğı gösterdiğini fark etmişlerdir. O nedenle su altında sertleşme gösterebilen bu malzeme, kasabanın ismi “pozzuoli” ile anılmaya başlanmıştır. Bu sözcük İngilizce literatüre “pozzolana” olarak geçmiş, zamanla kolay kullanım için “pozzolan” a dönüşmüş; dilimize “puzolan” olarak geçmiştir. Günümüzde, ince taneli durumdayken söndürölmüş kireçle ve suyla birleştirildiğinde hidrolik bağlayıcılık gösteren silisli ve alüminli malzemelerin tümü aynı isimle anılmaktadır.

Bilim adamlarının Türkiye’de Çatalhöyük’teki eski yapılar üzerinde yaptıkları incelemelerde, bu yapılarda kullanılan harcın 8000 yıl eski olduğı ortaya çıkarılmıştır. Bilindiğı gibi sadece kireç ve alçıdan elde edilen bağlayıcılar özellikle sulu ortam koşullarına karşı dayanıklı değildirler ve bu bağlayıcıların bu kadar uzun süre dayanıklılık göstermeleri mümkün değildir. O nedenle, 8000 yıl eskilikteki harcın muhtemelen puzolanik malzemelerle yapıldığı anlaşılmaktadır. Bir başka deyişle, Romalılardan çok uzun yıllar önce de (bu malzemenin puzolan olarak adlandırılmasından önce de), puzolanik malzemeler eski insanlar tarafından bir şekilde kullanım olanağı bulmuşlardır. (**Erdoğan, 2003**)

Öğütölmüş tuğlanın (pişirilmiş kilin) ve kirecin suya karılması sonucu elde edilen bağlayıcılar da, çok eski zamanlarda kullanılmıştır. Bu malzemelerden yapılan harçlar, Hindistan’da “surkhi”, Mısır’da “homra” adıyla anılmıştır. Osmanlılar

dönemindeki Türkler tarafından yapılan çok önemli eserlerde de kullanılan bu harç, “horasan harcı” olarak adlandırılmıştır.

Doğal puzolanlara ülkemizde Alman inşaat kültürünün etkisiyle “tras” adı verilir.

2.2.1. Puzolanların tanımı

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık gösterebilen, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olan silisli ve alüminli malzemeler (**Erdoğan, 2003**) olarak tanımlanmaktadır.

Puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silis’in ve alümin’in yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler ve karbon bulunabilmektedir. Farklı puzolanlarla yapılan çalışmalarla kimyasal kompozisyonları **Tablo 2.2**’de verilmiştir.

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde tepkimeye girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır.

Puzolanik malzemenin yeterli aktiviteyi gösterebilmesi için, yeterince ince taneli olması, amorf yapıya sahip olması ve yeterli miktarda “silis+alümin+demir oksit” içermesi gerekmektedir.

Günümüz ileri çimento endüstrisi ve beton teknolojisi karşısında puzolanlar, tarihi yapıların restorasyonu, katkılı ve traslı çimento üretimi, yapı bloğu üretilmesi gibi alanlarda önemlerini korumaktadır.

Böke ve diğerleri (2004)’ne göre, tarihi yapıların korunmasına yönelik yapılacak müdahalelerden önce, (söz konusu yapıda kullanılmış orijinal harç ve sıvanın) harcın özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerde harç ve sıva üretilerek koruma çalışmasının yürütülmesi gerekmektedir. Bu bağlamda puzolanlar, günümüz restorasyon çalışmaları için önem taşımaktadır.

Günümüzde puzolanlar, düşük hidratasyon ısısı, geçirimsizlik (permeabilite) ve alkali-silika tepkimesi, yüksek geç dayanım ve sülfat dayanımı gibi yararları nedeniyle harç ve betonda kullanılmaktadır. Ayrıca, çimento endüstrisinde enerji korunumu ve çevresel etki, durabilite ve beton yapıların yaşam dönemi maliyeti (life cycle cost) bakımından puzolanik malzemelerin kullanımı önem taşımaktadır.

Tablo 2.2: Farklı puzolanların kimyasal kompozisyonları

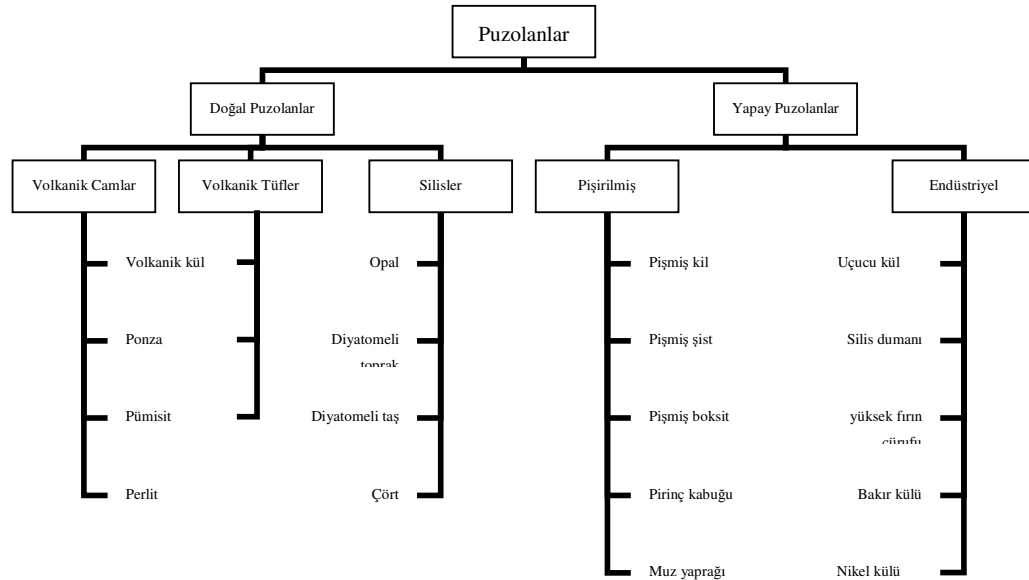
Referans	Orijin	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Kızdırma kaybı ve diğer
Volkanik Kül										
Shi ve Day, 1999	Bolivya	66,48	15,41	0,66	10,29	0,31	1,39	5,64	0,23	5,10
Ponza Taşı										
Hossain, 2004	Papua Y.Gine	60,82	16,71	7,04	4,44	1,94	5,42	2,25	0,14	1,22
Diatomit										
Tonak ve diğ., 1991	Türkiye	84,24	4,75	0,91	0,94	0,26	0,15	0,25	0,09	8,47
Zeolit										
Subrahmanyam, 1968	Kanada	54,0	22,9	0,30	0,80		13,05			8,4
Uçucu Kül										
Özcan, 1997	Tunçbilek Termik	58,3	9,7	22,1	2,1	4,8	2,5		0,4	1,9
Özcan, 1997	Seyitömer Termik	46,7	11,7	13,8	12,3	4,7	2,8		5,5	1,4
Tüf										
Türkmenoğlu & Tankut, 2001	Orta Anadolu									
Koçu, 1997	Konya	65,10	3,77	9,41	0,23	0,08	0,57	2,07	5,30	
Postacioğlu ve diğ., 1960	Kayseri	63,08	18,63	5,58	5,07	1,55			-	2,57
Perlit										
Bulgu, 2003	Manisa	74,64	13,81	0,84	0,83	0,25	1,51	5,72	0,07	
Cam Tozu										
Shi ve diğ. 2005	Newyork	72,5	0,16	0,2	9,18	3,65	13,2	0,12	0,39	-
Pirinç Kabuğu Külü										
Mazlum, 1989	Türkiye	86-97,30	-	Eser-0,54	0,20-1,50	0,12-1,96	Eser-1,75	0,58-2,50	0,10-1,13	P ₂ O ₅ :0,20-2,85

Turanlı ve diğerleri (2004)'ne göre, volkanik tuf bakımından zengin olan Türkiye'de, bunların bazıları puzolan olarak yerel çimento fabrikalarınınca portland çimentosu üretimi sürecinde çimentoya katılmaktadır. Doğal puzolanların fiziksel, kimyasal ve mineralojik özelliklerindeki farklılıklar, sabit bir çimento üretimini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte, yeterli özelliklere sahip yüksek miktarlarda puzolanlı çimento üretimi potansiyeli vardır.

Bir diğer puzolan olan ponza (bims, süngertaşı), tarihte kullanımı bilinen hafif agregalardan biridir ve Romalılarından beri kullanıldığı bilinmektedir. Ponza taşı agregasıyla üretilen betonlar, taşıyıcı betonun dışında, ısı yalıtımı, ses emme amacıyla beton blok olarak kullanılabilceği gibi, hafif beton duvar panoları da üretilebilir. Ponza taşının öğütülmesi ile elde edilen puzolanlar çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirler. Bimsbeton hafifliğinden dolayı zemin mukavemetinin fazla olmadığı yerlerde, taşıyıcı eleman olmadan kullanıldığı gibi, hafif olması istenilen yerlerde dolgu betonu olarak kullanılabilir.

2.2.2. Puzolanların sınıflandırılması

Puzolanların sınıflandırılması için birçok sistem geliştirilmiştir. En yaygın olan sınıflandırma **Şekil 2.2**'de yer alan, doğal ve yapay olarak iki gruba ayırandır. Bunun dışında literatürde yer alan diğer sınıflamalara da değinilmiştir.



Şekil 2.2: Puzolanların sınıflandırılması

Tablo 2.3'te, **Mielenz ve diğlerleri (1951)**'nin puzolanik etkinliğı sağılayan mineral kompozisyonuna göre puzolan sınıflandırması yeralmaktadır.

Tablo 2.3: Mielenz ve diğlerine göre puzolan sınıflandırması

Aktivite tipi	Temel aktif bileşen
1	Volkanik cam
2	Opal
3a	Kaolinit -kil tipi
3b	Montmorilonit kil
3c	İllit - kil tipi
3d	Vermikülitli kil karışımı
4	Zeolit
5	Alüminyum hidro oksit
6	Puzolansız (non-pozzolan)

Mehta (1986), puzolanik etkinliklerine göre puzolanları 5 sınıfa ayırmış (**Tablo 2.4**), ancak değışik tiplendirme ölçütleri detaylandırılmamıştır.

Tablo 2.4: Mehta'ya göre puzolanların sınıflandırması

Sınıf	Tanım	Örnek
I	Bağlayıcı	Granüle yüksek fırın cürufu
II	Bağlayıcı puzolanik	Yüksek kalsiyumlu uçucu kül
III	Yüksek reaktive puzolan	Silis dumanı, pirinç kabuğı külü
IV	Normal puzolan	Düşük kalsiyumlu uçucu kül
V	Zayıf puzolan	Yavaş soğumuş yüksek fırın cürufu

Massaza (1989)'ya göre, doğal ya da yapay bütün puzolanlar tepkime kapasiteleri açısından meydana geldikleri bileşenlere göre üç grupta sınıflandırılır. Bunlar: aktif tertip maddeleri: az veya çok değışmiş cam fazları, opal, silisli toprak, zeolitler; atıl bileşenler: zeolitlerden farklılık gösteren kristal fazları (augit, piroksen ve saf çini); zararlı (istenmeyen) bileşenler: organik maddeler, kalay ve karbon maddeleridir.

Taşkın'a göre, doğal puzolanların pek çoğu, gösterdikleri puzolanik aktivite özelliklerini bir veya beş madde halindeki hassaların (özelliklerin) kombinasyonuna borçludur. Bunlar,

- Volkanik cam,
- Opal,
- Kil mineralleri,
- Zeolitler,
- Alüminyum hidroksitlerdir.

Uçucu küller geniş çapta yapay camların hemen daima küre şeklindeki parçalarından ibarettir. Diğer yapay puzolanlar ise orijinal bileşimlerinin tekrardan yapılmasıyla veya eritme yoluyla elde edilen camları içerirler. Petrografik karakterlerine göre tipik puzolanlar aktif maddelerin değişik tiplerini içerirler ki, bunlar **Tablo 2.5**'te gösterilmiştir.

Tablo 2.5: Puzolanların aktif maddeleri ve petrografik sınıflandırması

Aktif maddeler	Puzolanların petrografik sınıflandırılması
Volkanik cam	Riyolit, dasit, altere volkanik tüfler ve sünger taşları
Opal ve benzerleri	Diyatomit, diyatome toprağı, opal, çört ve şeyller
Kaolenit tipi kil	Kaolin içeren kil mineralleri
İllit tipi kil	Hidromika killeri ve şeyleri
Montmorillonit tipi kil	Bentonitik killer ve şeyller, fuller toprağı
Karışık killer ve altere vermikülit	Buzul killeri ve siltleri
Zeolit	Zeolitli tüfler, volkan külleri ve iğnimbiritler
Yapay cam	Uçucu kül, yanmış metal artıkları, toprak tuğlası ve cüruflar

2.2.2.1.Doğal puzolanlar

Volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar, diatomlu topraklar ve bazı killeri ve şeyller doğal puzolanlardır. Genellikle doğal puzolanların çimento ya da beton sistemlerde kullanımına ilişkin düşük hidratasyon ısısı, yüksek dayanım, düşük geçirimsizlik

(permeabilite), yüksek sülfat dayanımı ve düşük alkali-silika aktivitesi gibi yararlı özellikler kabul edilir (ACI, 1994).

Doğal puzolanlara ülkemizde Alman inşaat kültürünün etkisiyle “tras” adı verilir; doğal puzolan içeren çimentolara da “traslı çimento” denilmektedir. Tras oranı %20-%40 arasında olunca üretilen “traslı çimento”; en fazla %19 olunca “katkılı çimento” olarak adlandırılmaktadır.

Tablo 2.6: Puzolanların beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri

Olumlu etkileri	Potansiyel olumsuz etkileri
Taze betondaki işlenebilmeyi artırmaktadır.	Özellikle soğuk havada taze betonun prizini geciktirmektedir.
Taze betondaki terlemeyi azaltmaktadır.	Betonun ilk günlerdeki dayanım kazanma hızını azaltmaktadır.
Betonun hidratasyon ısını azaltmakta, böylece kütle betonlarındaki çatlama önlenmektedir.	Betonun daha dikkatli ve daha uzun süreyle kür edilmesini gerektirmektedir.
Sertleşmiş betonun su geçirimsizliğini azaltmaktadır.	Hava sürüklenmiş betonların içerisine dahil edilecek sürüklenmiş hava miktarını azaltmaktadır. Belirli miktarda sürüklenmiş hava elde etmek için daha çok hava sürükleyici katkı maddesinin kullanımı gerekmektedir.
Sertleşmiş betonun sülfata dayanıklılığını artırmaktadır.	
Sertleşmiş betondaki alkali-silika tepkimesini azaltmaktadır.	
Ekonomiklik sağlamaktadır.	

Volkanik orijinli malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için, çok ince taneli duruma (en az portland çimentosunun inceliğine) getirilmek üzere öğütülmeleri gerekmektedir. Öte yandan, kil, şist ve diatomlu toprak önce ısıtılma tabi tutulup (pişirilip) daha sonra ince taneli duruma getirildiklerinde (öğütüldüklerinde) puzolanik özellik kazanabilmektedirler.

İnce taneli durumdaki doğal puzolanların bağlayıcı olarak görev yaptıkları değişik kullanım türleri mevcuttur:

- Söndürölmüş kireçle ve suyla birleştirilerek, çok eski zamanlarda olduğu gibi, doğrudan kullanılabilirler;
- Portland-puzolan tipi çimento üretiminde, portland çimentosunun klinkeriyle birlikte öğütölerek kullanılmaktadırlar;
- Beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadırlar.

Doğal puzolan katkıların beton özelliklerine olumlu ve olumsuz etkileri **Tablo 2.6**'da yer almaktadır.

2.2.2.2.Yapay puzolanlar

Uçucu küller, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu, yapay puzolan olarak kullanılan atıklardır. “Uçucu küller, termik santrallerde elektrik üretimi için yakıt olarak kullanılan öğütölmüş kömürün yanmasıyla atık malzeme olarak elde edilen ince daneli küllerdir. Yapılan araştırmalarda, çimento ağırlığının %20-30'u azaltılarak onun yerine uçucu kül kullanılan betonların su ihtiyacında yaklaşık %7 kadar daha az su kullanıldığı görölmüştür.” (ACI Committee, 1990).

Kül taneciklerinin yuvarlak şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için daha az su gereksinimine neden olmaktadır. C ve F sınıfı olmak üzere 2 türleri vardır. C tipi uçucu küller, kömür kullanımıyla, F türü ise linyit kullanımıyla elde edilirler.

Diğeri bir yapay puzolan ise, silis dumanıdır. Silis dumanı, silikon metalinin ya da alaşımlarının elde edilmesinde ortaya çıkan silis dumanının yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen “yoğunlaştırılmış silis dumanı veya silika fñme veya mikro silis” olarak adlandırılan çok ince daneli atıklardır.

Silis dumanı, portland çimentosu klinkeriyle ve az miktardaki alçıyla birlikte öğütölerek “silis dumanlı çimento”(çimento-silika fñme) üretiminde kullanılabilirler. Ancak, asıl kullanımı, beton katkı maddesi tarzındadır.

Genellikle beton karışımında yer alan çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve onun yerine bu Puzolanik madde yerleştirilmektedir. Çok ince daneli olması ve çok yüksek miktarda SiO₂ içermesi nedeniyle gerek ilk zamanlarda ve gerekse sonradan oldukça yüksek dayanımlı betonların üretilmesinde kullanılmaktadır.

Silis dumanının çok ince tanelerden oluşması taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini azaltmakta, su gereksinimini artırmaktadır. O nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için katkı madde olarak silis dumanı kullanıldığında, ayrıca su azaltıcı katkı maddesi de kullanılmaktadır.

Yüksek fırın cürufu, demir üretimi için demir cevherinin (demir oksit) yüksek fırın olarak adlandırılan fırınlarda eritilerek indirgenmesi sırasında ortaya çıkan bir atık malzemedir. Fırındaki yüksek sıcaklık nedeniyle eriyik haline gelen ve CaO , SiO_2 , Al_2O_3 gibi oksitleri içeren cüruf, ani olarak suda soğutulduğunda iri kum parçacıkları boyutunda amorf yapıya sahip granüle bir durum kazanmaktadır.

Yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkeriyle öğütülerek cürufllu çimento elde edilmesi oldukça eskiye dayanan bir uygulamadır. İlk cürufllu çimentolar Almanya'da 1892'de ABD'de 1896'da üretilmeye başlanmıştır.

Son 15-20 yıldan bu yana, Güney Afrika'da, Kanada'da, ABD'de İngiltere'de ve Japonya'da üretilen granüle yüksek fırın cürufllarının hemen hemen tümü beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de cürufun ayrıca öğütülerek beton katkı malzemesi olarak kullanılması son bir-iki yıldan bu yana ve çok az miktarda uygulanmaktadır (Erdoğan, 2003).

2.2.3. Puzolanik reaktiviteyi belirleyen etkenler

Puzolanik etkinliğe tesir eden, maddenin atom yapısı, kimyasal birleşimi, kalsinasyon, mekanik, ısı ve kimyasal etkinleştirme faktörleri ele alınacaktır.

2.2.3.1. Atom yapısı

Atom dizilişlerine (yapılarına) göre puzolanları üç grupta toplamak mümkündür:

- Camsı yapıda olanlar: Volkanik camlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, perlit gibi puzolanik etkinliği (reaktiviteyi), camsı yapıları nedeniyle gösterebilirler;
- Amorf yapıda olanlar: silis dumanı, pirinç kabuğu külü gibi;
- Kristal yapıda olanlar: zeolit gibi.

Puzolanik malzemenin içeriğinde yüksek bir oranda bulunan ve puzolanik tepkimedeki temel elementlerden olan silis taneciklerinin kristal yapısı puzolanik etkinliğe tesir eden faktörlerden biridir. Urhan (1991) 'a göre, kristalin yapıda atom

örgüleri düzgün ve sık olduğundan çözünmeleri güçtür. Buna karşın, camsı yapıda atom örgüleri hem daha aralıklı hem de daha bozuktur. Kristalin silis'in yoğunluğu 2,65 iken camsı silis'te bu değer 2,0 'a kadar düşebilir. Dolayısıyla camsı silis'in çözünmesi daha kolaydır.

Okucu (1998), farklı tüflerle puzolanik aktivite değerlendirmesi yaptığı çalışmada, puzolan maddesinin camsı faz yüzdesindeki artışla puzolanik aktivite değerinde yükselme olduğunu belirlemiş, camsı faz ile puzolanik aktivite arasında bir korelasyon olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışmada, puzolan olarak değerlendirilen perlitin camsı yapıda olması nedeniyle, camsı yapı üzerinde durulacaktır.

2.2.3.2.Kimyasal bileşim

Puzolanın kimyasal içeriği, puzolanik aktiviteyi oluşturan tepkimeler nedeniyle önemlidir.

Puzolanik aktivitenin esası silikatlaşmaya dayanmaktadır. “2.2.4.2. Kimyasal Tepkime” başlığında da açıklandığı üzere puzolanik malzemeler SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 oranları yüksek, kristal yapılarının bozuk, yani amorf yapılıdır.

Diğer yandan, **Öz ve Urhan (1993)** TS 25' e göre puzolanik aktivite gösteren iki puzolan madde üzerine yaptıkları araştırmada, puzolanların kimyasal analizlerindeki toplam silis miktarından ziyade, reaktif silis miktarının puzolanik aktiviteyi belirlediğini ortaya koymuştur.

2.2.3.3.Kalsinasyon

Kalsine edilmiş puzolanlar, TS EN 197-1'de, ısıtma işlemi ile aktifleştirilmiş volkanik orijinli killeri, şistler ve tortul kayalar olarak örneklendirilmiştir.

Doğal puzolanların etkinleştirilmesinde (reactivity), kalsinasyon (ısıyla iyileştirme) puzolana göre farklı sonuç verir. **Mielenz ve diğ. (1949)**'nin 70 doğal puzolan üzerinde kalsinasyonun etkisini inceledikleri çalışmanın sonucunda, puzolanlar Tablo 2.3'te verildiği üzere 6 sınıfa ayrılmıştır. Bunlardan volkanik cam (1), opal (2), zeolit (4) ve puzolan olmayanlar (non-pozzolan, 6)'ın puzolanik etkinlikleri kalsinasyon ile artırılmış iken, kaolinit, montmorilonit, illit ve vermikülit ise önemli

gelişim göstermiştir. Uygun kalsinasyon sıcaklığı 680–870 °C iken, daha yüksek sıcaklıkların puzolanik etkinliği azalttığı görülmüştür. Sıcaklık artışıyla malzemelerin özgül ağırlıklarında da arttığı ve kalsinasyon sırasında özgül yüzeylerinin değiştiği görülmüştür; ancak, özgül yüzey değişimi ile puzolanik etkinlik arasında genel bir korelasyon bulunamamıştır.

2.2.3.4. Aktivasyon

Regourd (1980)'ya göre, harcın potansiyel reaktivitesini aktive etmek için üç yöntem kullanılır:

- Mekanik (öğütme),
- Isıl (yüksek sıcaklıkta kürleme),
- Kimyasal (kimyasal aktivatör-etkinleştirici eklenmesi).

Shi ve Day (1999)'e göre doğal puzolanlarda tepkimeyi artırmak için en sık başvurulan, harcın yüksek sıcaklıkta kürlemesi ve puzolanın uzun süre öğütülmesi yöntemleridir. Dayanım değerleri ve maliyet göz önüne alınarak yapılan kıyaslamada CaCl_2 ve Na_2SO_4 katkılarının kullanılmasının, yüksek sıcaklıkta kürleme ve puzolanın uzun süre öğütülmesi yöntemlerine göre daha etkili bulunmuştur.

• Mekanik aktivasyon

Mekanik yöntem, bileşenlerin özgül yüzeyini artırmak ve böylece hidrasyon oranını hızlandırmak için kullanılır. Ancak, **Higginson (1970)**'a göre bu yöntemle erken dayanım için olumlu sonuç verirken, geç dayanım değerinde katkı sağlayamamaktadır. Tersine, puzolanın inceliğinin yüksek olması su gereksinimini artırıp geç dayanım değerinde azalmaya neden olmakta; inceliğin sağlanması için ise ilave enerji harcanmasına neden olmaktadır.

Kireç-puzolan harcındaki SiO_2 ve CaO arasındaki tepkime esas olarak SiO_2 'nin çözülmesine dayalıdır. Puzolanların genelde silisli olduğu düşünüldüğünde, kireç-puzolan harcının erken tepkimesi, reaktif SiO_2 'nin çözülme oranına bağlıdır. Karışımındaki pH değeri 11 ve üzeri ise, SiO_2 'nin çözülmesi özgül yüzeye bağlıdır. (**O'Conner & Greenberg, 1958**)

Ca(OH)_2 'in pH değerinin yaklaşık 12,5 olduğu göz önüne alındığında silis çözünürlüğü için özgül yüzey belirleyici olmaktadır. Ayrıca, uzun öğütme süresi yalnızca malzemenin özgül yüzey değerini artırmakla kalmaz, atomlar arasındaki anormallikleri, gizli yabancı atomları, kusurları da artırır.

- **Isıl aktivasyon**

Roy ve Idorn (1985)'a göre, harç ya da beton yüksek sıcaklıkta kürlenerek birkaç saat sonunda en yüksek dayanım değerine ulaşırlar. Ancak, yüksek sıcaklıkta kürlenme, sertleşmiş betonun nihai dayanımında düşmeye neden olur.

Kireç-puzolan harçlarının hidrasyon sürecinde, tepkimeyi aktive edici enerji portland çimentosuna nispeten daha yüksektir; dolayısıyla kireç-puzolan harçlarının sıcaklıktan daha kolay etkilendiği söylenebilir.

Genelde, kireç-puzolan harçlarının uygun periyotta, yüksek sıcaklıkta kürlenmeyle yüksek dayanım elde edilmesi geçerlidir. Ancak, "Puzolanlar ile Yapılan Çalışmalar" bölümünde, sıcaklık artışına farklı puzolanlar farklı yanıt verdiği görülmüştür.

- **Kimyasal aktivasyon**

Harcın potansiyel reaktivitesini aktive etmek için asit ile iyileştirme, kostik alkali ve bazı katkıların kimyasal etkinleştirici olarak kullanılması mümkündür.

Shi ve Day (2001)'e göre, asit ile iyileştirme yöntemi, puzolanın yüzeyinde bir jel oluşumu sonucunda tepkimeyi yükseltir; ancak bu teknik, yalnızca düşük kalsiyum içerikli puzolanlar için uygundur. Diğer yandan, bu yöntem ekonomik olmadığı gibi, çalışma sırasında da dikkat gerektirdiğinden pratik değildir.

Yine, **Shi ve Day (2001)**'e göre, puzolanlı beton harcına kimyasal katkı eklenmesi puzolanik tepkime oranını artırıp, erken ve geç dayanım değerlerini yükseltir. Bununla birlikte kostik alkaliler gibi bazı katkılar yüksek etkili olmakla birlikte, pahalı ve de tehlikeli olmaları nedeniyle fizibil değildir.

Diğer yandan yukarıda atıfta bulunulan çalışmada CaCl_2 ve Na_2SO_4 kullanılmış, farklı sıcaklıklarda erken ve geç dayanımlar artış ve katı harcın içeriğindeki Ca(OH)_2 tüketiminde hızlanma görülmüştür.

2.2.4. Kireç-puzolan harçlarında puzolanik aktivitenin kimyasal yapısı

Bu başlık altında, kireç-puzolan tepkimesinde ortaya çıkan hidratasyon ürünleri ile tepkimenin kimyası ele alınmıştır.

2.2.4.1.Hidratasyon

Sersale (1980)'e göre, kireç-puzolan tepkimesinden şu altı ürünün ortaya çıktığı görülmüştür:

- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H);
- Aft ya da etrengit (etrengit) ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$);
- Hidrate tetra kalsiyum alüminat (C_4AH_x);
- AFm ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$);
- Hidrate gehlenit (C_2ASH_8);
- Hidrate kalsiyum karboalüminat ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$).

Kireç-puzolan harçlarında hidratasyon sonunda genellikle düşük C/S oranlı kalsiyum silikat hidrat'ın oluştuğu kabul edilir. Puzolanda çözülebilir alkaliler C/S oranını etkileyebilir. Al^{3+} ve Fe^{2+} C-S-H strüktürünün içine girebilir. (**Benton, 1962**)

Puzolanda bulunan alüminat, kalsiyum alüminat hidrat (C_4AH_{19}), gehlenite hydrate (C_2ASH_8), Aft fazı ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) ve AFm fazı ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$) gibi farklı türde hidratlar oluşturabilir. (**Helmuth, 1983**)

Sonuç olarak bir puzolanik tepkimedeki hidrat ürünler, sözkonusu puzolanın içerdiği reaktif bileşenlere ve kireç-puzolan oranına bağlıdır. Puzolanın içeriğinde yüksek pH değerinde yeterli sülfatın bulunması durumunda alüminyum önce çözünür, daha sonra $Ca(OH)_2$ ve sülfat ile tepkimeye girer.

2.2.4.2.Kimyasal tepkime

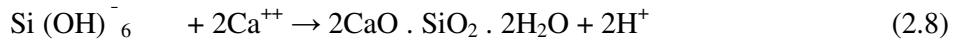
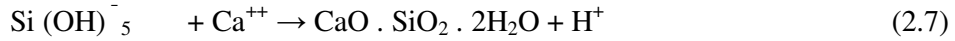
Puzolanik tepkimeler, puzolanik malzemeler ile $Ca(OH)_2$ arasında, nemli ortamda oluşan ve tepkime sonucunda portland çimentosu hidratasyon ürünlerine benzer, hidrolik bağlayıcı niteliği olan ürünler verebilen tepkimelerdir.

Puzolanik malzemeler, SiO_2 ve Al_2O_3 içerikleri yüksek, kristal yapıları genellikle bozuk olan silikatlardır. Bunlar, pH'ı yüksek alkali ortamlarda OH^- iyonlarının etkisi ile çözünebilirler.

Çözünme işlemi, portland çimentosu veya kirecin su ile tepkimesi sonucu ortaya çıkan OH^- iyonlarının ortamdaki puzolanik malzemenin yüzeyine soğrulması ile başlar. Bunun sonucu olarak silikatın yüzeyindeki silisyum atomunun koordinasyon sayısı yükselir, alttaki oksijen atomu ile olan bağı zayıflar ve yüzeyde silisik asit oluşmaya başlar:



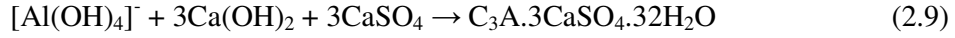
Yüzeydeki silis atomunun bağlarının zayıflaması ile oluşan $\text{Si}(\text{OH})_5^-$ ve $\text{Si}(\text{OH})_6^-$ 'ların negatif yükleri Ca^{++} , K^+ ve Na^+ iyonları ile nötralize edilebilir. Ca^{++} iyonu diğerlerinden daha büyük bir kuvvetle yüzeye soğrulduğu için önce Ca^{++} , oluşan negatif yükleri nötrleştirir. Negatif yüklerin bir kısmı da diğer alkali iyonlar (K^+ ve Na^+) tarafından nötrleştirilebilir. Ca^{++} bir H^+ ile yer değiştirerek kalsiyum silikatlar oluşur:



Bu tepkimeler sürerken, çözeltideki silis konsantrasyonu doygunluğa erişinceye kadar, silikat çözünmeye devam etmek isteyecektir. Ancak puzolanın yüzeyinde oluşan CSH, OH^- iyonlarının geçişini engelleyerek çözünmeyi yavaşlatacak ve durduracaktır. Bu nedenle bir kireç çözeltisinde, Ca^{++} konsantrasyonu yükseldikçe, çözeltideki çözülmüş silis konsantrasyonunda azalma görülür. Eğer silikatın çözünmesi sürecinde ortamda yeterli miktarda Ca^{++} bulunmaz ise veya silikatın çözünme hızı CSH kristallenme hızından yüksek olur ise ki bu da ortamda alkali iyon konsantrasyonunun yüksek olmasını gerektirir, o zaman silikat çözeltide doygunluğa ulaşınca kadar çözünecek ve negatif yüklerin büyük kısmının alkali iyonlarca nötrleştirilmesi sonucunda tepkime ürününün alkali silikat bir jel olduğu alkali silika tepkime oluşacaktır.

Puzolanik tepkimeler sanıldığı gibi silikatlı malzemenin tamamen çözünüp Ca(OH)_2 ile tepkimesi sonucu yeni ürünlerin oluşmasından öte, puzolanik malzeme taneciklerinin yüzeysel çözümleri sonucunda, çözünen kısmın Ca(OH)_2 ile tepkimesi sonucu yüzeylerinde oluşan CSH ile birbirlerine bağlanmasından ibarettir (Urhan 1994).

Puzolanın içeriğinde alüminyumun bulunması puzolanik etkiyi artırır.

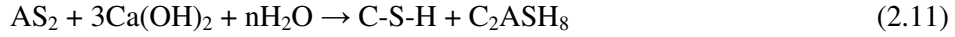


Yeterli sülfat olmaması durumunda:



Sonraki aşamalarda, bütün puzolan partikülleri hidratasyon ürünleriyle çevrelenir; puzolanik tepkime, su difüzyonu ve Ca^{+2} 'nin, tepkimeye girmemiş puzolan partiküllerini çevrelemesi ile sürer.

Yüksek alüminli puzolandan (%54 SiO_2 ve %46 Al_2O_3) farklı olmayan kalsine kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) de benzer tepkime gösterir. Ca(OH)_2 ile tepkime sonucunda C-S-H ve hidrate gehlenit ortaya çıkabilir:



2.2.5. Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesi yöntemleri

Massaza (1989)'ya göre, bir puzolanı değerlendirmek ve kullanmak için, onun puzolanik aktivitesini belirlemek esastır. Bu problem, önerilen birçok yöneme karşın pek çözülmüş sayılmaz. Çünkü bütün puzolan tiplerine uygulanabilir olmasının yanı sıra, maddenin kullanımı karakteristikleriyle hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir olan genel bir test metodu halen yoktur; çünkü puzolanik aktivite birçok faktöre bağlıdır. Prensipte olarak, bir maddenin puzolanik aktivitesini değerlendirmek için verilen yöntemler kimyasal, fiziksel, mekanik ve mikro yapısal olmak üzere dört alt başlıkta ele alınmaktadır.

2.2.5.1. Kimyasal değerlendirme yöntemi

Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesinde farklı yöntemler kullanılabilir. Ancak, en yaygın kullanılan yöntem kimyasal yöntemdir. Kimyasal yöntemin esası, sönmüş kireç veya portland çimentosuyla karıştırılan puzolanın sabitleştirdiği kireç miktarını

belirlemeye dayanır. Test sonuçları, maddenin yapı ve inceliğine, kireç-puzolan oranına ve sıcaklığa bağlıdır.

Puzolanik aktivitenin değerlendirilebilmesi için bir diğer yöntem de, tepkimeyi hızlandırmak için çimento-puzolan veya kireç-hidroksit-puzolan süspansiyonları kaynama noktasına getirilir; ancak, bu değerlendirme temel olarak kireç-puzolan tepkimesine dayanır.

24 saat süren bir işlemle, portland çimentosunun hidrolizinin, kirecin etkisi ile eriyen silika ve alüminyum oksit belirlenmesiyle de puzolanik aktivite değerlendirilmesi yapılabilir.

Başka bir yöntem ise, bir puzolan-kalsiyum hidroksit süspansiyonu bir saat kaynatılarak ve bu işlem başında ve sonunda görülen serbest kireç miktarları karşılaştırılıp, maddenin puzolanik aktivitesi hızlı bir biçimde değerlendirilir.

Uçucu küllerin puzolanik kalitesi, puzolan-kalsiyum karışımından ve aynı karışımın 1000 °C’de 1 saat kalsine edilmiş halinden HCl’de çözünmeyen miktarlarını karşılaştırarak değerlendirilebilir.

Puzolanik aktivitenin bir diğer ölçümü, puzolanların kireçle tepkimesinde eriyen silis ve alüminyum oksit belirlenmesinden elde edilmektedir. Florentin metodu, analitik belirleme için kullanılır.

%2 Seyreltilmiş hidroflorik asit (HF) çözeltisinde çözünebilen puzolan miktarının, puzolanik aktiviteyi sağlayan reaktif SiO₂ olarak kabul edilmesi ilkesine dayalı bir yöntemdir. Bu asit çözeltisinin kristal yapıdaki Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO’yu, feldspat grubu mineralleri ve kuvars (SiO₂) mineralini çözünmediği saptanmış.

2.2.5.2.Fiziksel değerlendirme yöntemi

Puzolanların aktiviteleri, kimyasal yöntem dışında fiziksel yöntemlerle de değerlendirilebilir. Bunlardan biri olan kalorimetrik ve kimyasal bir yöntemde, puzolanın nitrik-floridrik karışım içinde çözülmesi sırasında ve 1 saatlik aşındırma sonunda çözünmeyen kalıntının erimesi ile açığa çıkan ısıya bakılarak puzolanın aktivitesi değerlendirilir.

Puzolanik maddeleri fiziksel yöntemlerle değerlendirmenin bir başka ölçütü ise puzolan içeren çimento danelerinin özgül yüzeyin artış hızını ölçmekle

gerçekleştirilir. Değişik kalsiyum hidroksit-emme hızlarına, benzer özgül yüzey artış hızları karşılık gelir.

2.2.5.3.Mekanik değerlendirme yöntemleri

Puzolanik aktiviteyi değerlendirme yöntemlerinin üçüncü grubu, puzolan-kireç ve puzolan çimento harçlarının mekanik dayanımını ölçmeye dayanır. Kireç daha sabit bir karakteristiğe sahip olduğundan, puzolan-kireç harcı çok daha iyi değerlendirilip deneyin standartlaştırılmasını sağlar. Öte yandan puzolan-çimento harcı, klinker-puzolan bileşiminin doğrudan değerlendirilmesini olası kılar.

Reaksiyona giren kalsiyum hidroksit ve mekanik sağlamlık arasında bir ilişki olamaması, puzolanları değerlendirmek için bizi daha uzun süren mekanik yöntemleri kullanmaya zorluyormuş gibi görünebilir. Aslında bu yöntemler, belli puzolan maddelerinin incelenmesinin yalnızca son aşamasında gerekmektedir. Zira, araştırma, ilk aşamalarda gayet iyi bir şekilde daha hızlı olan kimyasal yöntemlerle götürülüp, uygulama ve standartlar açısından sağlamlık düzeylerini belirlemek gerektiğinde mekanik yöntemlerle sonuçlandırılabilir (Shi, 1992).

2.2.5.4.Mikro yapısal değerlendirme yöntemleri

Diferansiyel termal analiz (Differential thermal analysis-DTA), termogravimetrik analiz (Thermogravimetric analysis-TG), X ışını difraktometresi (X ray powder diffraction-XRD), X ışını floresan spektrometresi (XRF) gibi mikro yapısı inceleme yöntemleriyle malzemenin puzolanik aktivitesi hakkında bilgi edinilebilir.

Diferansiyel termal analiz (DTA) bir maddenin fiziksel ve kimyasal değişimlere uğradığı zaman bu madde tarafından verilen (ekzotermik) ya da alınan (endotermik) ısının karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. DTA grafiğinde görülen endotermik reaksiyon pikleri su kaybı ya da dekompozisyon göstergesi iken, ekzotermik reaksiyon pikleri yeni bir kompozisyon oluşumunu ifade eder. Termogravimetrik analiz (TG) ise, maddenin sıcaklık etkisiyle ağırlık kaybını gösterir. Böylece, DTA-TG, üretilen numune içinde, hidratasyon sonunda oluşan silikatları ve bağlanan CaOH_2 miktarının belirlenmesini sağlar.

X ışını difraktometresi (XRD), faz analizidir; puzolandaki ve bitmiş ürünlerdeki mineral kristalleri saptar, grafik olarak verir. Böylece, harç içindeki kuvars,

kristobalit, feldspat cinsi SiO_2 ve amorf yapı içeren bileşiklerin varlığı ile puzolan harcının içinde kireçle tepkimeden artan portlandit $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ belirlenmiş olur.

X ışını floresan spektrometresi (XRF), tuf içindeki oksitleri % olarak tayin ederek, puzolanik aktiviteyi belirleyen SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 oranlarının belirlenmesini sağlar.

2.2.5.5. Puzolan standartlarının aktivite değerlendirme ölçütleri

Puzolanik aktivitenin değerlendirilmesinde gerek tanım ve ön koşullar, gerekse deney yöntemlerinde başvuru kaynağı olarak Türk Standartları (TS) incelenmiştir.

TS 25'e göre puzolan-kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) tepkimesi sonunda

eğilme dayanımı: 10 kg/cm^2 ($=1 \text{ N/mm}^2$)

basınç dayanımı: 40 kg/cm^2 ($=4 \text{ N/mm}^2$)'den az olmamalı ve traslarda aranması gereken kimyasal özellikler, **Tablo 2.7**'deki gibi olmalıdır.

Tablo 2.7: Puzolanlarda aranacak kimyasal özellikler (TS 25)

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	en az	% 70,0
MgO	en çok	% 5,0
SO_3	en çok	% 3,0
Rutubet	en çok	%10

TS 25, puzolanın kimyasal analizine dair ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) asgari oranları vermiş olmakla beraber, esas olarak puzolanik aktiviteyi etkileyecek aktif silis oranına dair herhangi bir tanım yapmamıştır. Dolayısıyla TS 25, tepkimeye girmeyip harç içinde kalıntı halde bulunacak SiO_2 limiti verilmemiştir.

Öz ve Urhan (1993), çözünmeyen kalıntısı yüksek ve düşük olan puzolanların etkinlikleri üzerine yaptıkları deneylerde, kalıntısı fazla puzolanın, kalıntısı daha az puzolandan yüksek dayanım gösterebildiğini saptamıştır. Bu durumda, puzolanik etkinliğin kalıntı miktarına göre değerlendirilmesinin hatalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Ancak, **TS 10156**, katkılı çimentonun çözünmeyen kalıntı miktarını %15 ile limitlendirmiştir. Sözü edilen çalışmaya göre böyle bir limit, daha az klinker ile daha çok üretim ve çevre kirliliğinin azaltılması açılarından kayıptır. Sözü edilen

çalışmada **TS 687**'de verilmiş olan çözünmeyen kalıntı oranının belirlenmesi yöntemi de eleştirilerek, yüksek etkinlikteki bir puzolanın bu yöntem ile değerlendirildiğinde yüksek kalıntı bıraktığı sonucuyla kullanılmaması da benzer şekilde kayıp olarak görülmektedir. Bu yöntemin portland çimentosu için geçerli ancak puzolanlar için hatalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Şu anda, TS 687 ve TS 10156 yürürlükten kaldırılmış olup yerine TS EN 197-1 gösterilmektedir. Puzolanlarla ilgili belirli limit değer için TS 197-1'de, "reaktif SiO₂ miktarı kütlece %25'den az olmamalıdır" denilmektedir.

TS 639 Uçucu Küller standardı, çimento imal edilirken klinkere katılacak uçucu külleri kapsamakta ve **ASTM C 618-05**'ten farklı olarak tek sınıf uçucu kül tanımlamaktadır. TS 639'da kül dane boyutu ve özgül yüzey değerlerindeki 1975 yılında belirlenmiş olan sınırlamalar 1993 yılındaki revizyonda kaldırılmıştır.

Uçucu külde aranan kimyasal özellikler, TS 25'te tanımlanan tras kimyasal özelliği ile aynı olup **Tablo 2.7**'de yer almaktadır. Bu standartta puzolanik aktivite için yalnızca basınç dayanımı ölçütü olarak değerlendirilip, 3 numune ile tespit edilen 28 günlük basınç dayanımı ortalamasının, uçucu kül katlısı olmadan hazırlanmış portland çimentosu harcı dayanımının en az %70'i olması koşuldur. Aynı standarta göre puzolanik aktivite değeri aşağıdaki formül ile hesab edilir:

$$Puzolanikaktivite = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2.12)$$

A= çimento/kül karışımı numuneleri ortalama basınç dayanımı (kgf/cm²)

B= referans numunesi ortalama basınç dayanımı (kgf/cm²)

2.2.6. Kireç-puzolan harçlarının performans parametreleri

Genel olarak harçlarda aranacak özellikler, basınç mukavemeti, doluluk, geçirimsizlik, aderans, priz sırasında hacim değişikliği göstermeme, aşınma ve dış etkilere karşı yüksek direnç yani durabilite olarak sayılabilir.

Bu özelliklerden hareketle, kireç-puzolan harçlarının performans parametreleri, işlenebilme ve priz yapma, dayanım, durabilite, uygulanabilirlik ve ekonomiklik olmak üzere dört başlık altında ele alınmaktadır.

2.2.6.1.İşlenebilme ve priz yapma

Harçlar için “işlenebilme”, kolayca karıştırılabilme, yerleştirilebilme, sıkıştırılabilme ve yüzeyinin düzeltilebilmesi anlamına gelmektedir. Kireç-puzolan harçlarının işlenebilme özelliğinin yüksektir.

Genel olarak, plastik kıvamdaki harç, kurumuş veya taze haldeki harçlara oranla daha yüksek aderansa sahiptir. Harç türleri içinde kireç bağlayıcılı olanların yüksek aderansa sahip oldukları söylenebilir.

Priz süresi ise Vicat iğnesi yöntemiyle (TS EN 196-3) ve harç için kullanılmış olan su miktarıyla belirlenir.

Kireç-puzolan harçları genellikle yavaş priz yapar. **Lea (1974)**’ya göre, priz başlangıcı (initial setting) 1-3 saat arasında olurken; geç priz (final set) ise 10-12 saatten erken olmaz. Harca priz hızlandırıcı kimyasal eklenmesi bu süreleri kısaltır.

2.2.6.2.Dayanım (mukavemet)

Kireç-puzolan harçlarının dayanımı kullanılan puzolanın doğasına bağlı olarak oda sıcaklığında yavaş gelişme gösterir (**Lea, 1974**). Puzolanın aktivitesini etkileyen faktörler, harcın dayanım gelişimini de etkiler. Bunlara ek olarak kireç türü ve puzolan-kireç oranı dayanımı etkiler.

Aynı CaO içerikli sönmüş ve sönmemiş kireç ile hazırlanan harçlardan, aynı süre ve kütleme koşulları sonucunda sönmemiş kireç ile hazırlanmış olanın daha yüksek dayanım gösterdiği belirlenmiştir (**NICT 1989**). Sönmemiş kirecin harçta su ile tepkimeye girmesiyle ortaya çıkan ısı, puzolanik tepkimeyi hızlandırır.

Kireç-puzolan harçları mukavemetinde, kireç-puzolan oranı önemli bir etkidir. Kirecin yetersiz olduğu durumda, hidratasyon ürünleri boşlukları doldurma ve partikülleri bağlamada yetersiz kalacak; harç düşük dayanım gösterecektir. Harçta kirecin fazla olması durumunda ise, bağlayıcılık işlevi gösteremeyecek olan kireç serbest halde harç bünyesinde kalarak dayanımda düşmeye neden olacaktır.

Lea (1974), kireç: puzolan oranı 1:2 olan harcın, 1:4 olandan daima yüksek dayanım gösterdiğini saptamıştır.

2.2.6.3.Durabilite

Bir malzemenin durabilitesi (dayanıklılığı), o malzemenin özelliklerinin değişikliklere karşı direnebilme yeteneğidir; malzemenin, kullanımından ve maruz kaldığı çevre koşullarından ayrı düşünülemez.

Kireç, tuzlara dayanıklı, alkali özelliği ile bakteri ve mantar oluşumunu engelleyici, yoğunlaşma dispersiyonu ile çürümeyi önleyerek iyi bir geçirimsizlik (permeabilite) özelliğine sahiptir. Zamanla artan basınç dayanımı ile esnek (fleksibil) ve düşük rötre (büzülme) özelliği ile genişleme derzi zorunluluğu olmadan en az çatlak oluşumuna neden olabilecek elastikliktedir.

Tablo 2.8: Kireç-puzolan durabilite özellikleri (Larew, 1976)

No	puzolan: kireç: alçı	kütleme sıcaklığı (°F)	kır süresi (gün)	basınç mukavemet (MPa)	permeabilite (cm/sec) (20 °C)	Donma-çözünme sonucunda ağırlık kaybı (%)	çevrim sayısı
1*	80:13,3:6,7	50 (=10°C)	7	0,98	$2,51 \times 10^{-4}$	61,2	12
	80:13,3:6,7	50 (=10°C)	28	2,81		35,6	12
	80:13,3:6,7	120 (=49°C)	7	3,72	$3,75 \times 10^{-4}$	17,6	12
	80:13,3:6,7	120 (=49°C)	28	14,31		7,3	12
	85:15:0	50 (=10°C)	7	0,33	$2,33 \times 10^{-6}$	78,9	8
	85:15:0	50 (=10°C)	28	0,79		27,7	12
	85:15:0	120 (=49°C)	7	0,92	$1,01 \times 10^{-5}$	43,7	12
	85:15:0	120 (=49°C)	28	5,36		5,3	12
2*	80:13,3:6,7	50 (=10°C)	7	0,40	$2,15 \times 10^{-5}$	65,5	6
	80:13,3:6,7	50 (=10°C)	28	1,13		49,4	12
	80:13,3:6,7	120 (=49°C)	7	1,39	$2,83 \times 10^{-5}$	57,6	12
	80:13,3:6,7	120 (=49°C)	28	5,32		0,30	12
	85:15:0	50 (=10°C)	7	0,15	$2,86 \times 10^{-3}$	82,8	6
	85:15:0	50 (=10°C)	28	0,48		46,7	9
	85:15:0	120 (=49°C)	7	0,63	$2,04 \times 10^{-3}$	63,4	6
	85:15:0	120 (=49°C)	28	2,04		57,4	12
1* Therlakshofn puzolanı; 2* Savartsengi puzolanı							

Kireç-puzolan harcının durabilite özelliklerine ilişkin ise sınırlı sayıda veri bulunmuştur. **Tablo 2.8'**de kireç-puzolan harçlarına ait literatürden bulunmuş, permeabilite ve donma-çözünme dayanımları yer almaktadır. Bu sonuçlar portlant çimentosu ile kıyaslandığında permeabilite oldukça yüksek, diğer yandan donma çözünme çevirim sayısı düşüktür. Kütleme sıcaklığı arttıkça mukavemetin de arttığı, ancak bunun permeabilite ve donma-çözünme özelliklerini etkilemediği görülmüştür. Her iki puzolan türü için de alçı katkısı her kütleme sıcaklığında mukavemeti artırmış; birinci puzolan türü (Therlakshofn) için permeabiliteyi az miktarda artırırken donma-çözünmeyi etkilememiş; ikinci puzolan türü (Savartsengi) permeabiliteyi azaltmış ve donma-çözünme dayanımında az miktarda artış sağlamıştır (Shi, 1992).

2.2.6.4.Uygulanabilirlik ve ekonomiklik

Kireç-puzolan harcı, portland çimentosuna kıyasla daha düşük mukavemetli ve daha yavaş priz yapması nedeniyle, hızlı mukavemet gelişiminin öncelikli olmadığı (ya da olmaması gerektiği) durumlarda, plastisite ve esnekliğin önem taşıdığı durumlarda kullanılabilir.

Gelişmekte olan ülkelerde, çimento gibi yüksek yatırım maliyeti ve donanım gerektiren, oluşum enerji yüksek olan bir bağlayıcı üretimi yerine, daha küçük ve basit tesislerde, emek yoğun bir süreçle elde edilen kirecin tercih edilmesi uygun olacaktır.

Günümüz koşullarında 50 kg'lık bir torba çimentonun perakende satış fiyatı 7 YTL iken, aynı miktardaki kirecin fiyatının 4 YTL olması, kirecin ekonomikliğini de ortaya koymaktadır.

2.3. Perlit

Bu çalışmada puzolanik madde olarak ham perlit kullanım olanakları araştırılmıştır.

Türkiye Perlit Envanteri'ne göre perlit adı, dilimize “inci taşı” olarak tercüme edilebilecek Almanca “perstein” kelimesinden türemiştir.

Başta perlit olmak üzere belli bazı volkanik cam tiplerinin süratli ısıtma ile genleştikleri 1928'den beri bilinmektedir. Ayrıca perlitik obsidyen'in 1925'ten önce

Almanya’da genişletilerek abrazif tuğla yapımında kullanılmış olduğu da söylenmektedir. Perlit 1940’da Las Vegas’taki bir fırında tecrübe suretiyle genişletilmiş ve yapı sıvası elde etmek için, alçı ile birlikte kullanılmıştır. Tahminen 1941’de Surerior (Arizona) yakınlarında bulunan Picket Post Dağı’ndan çıkarılmış olan ham perlit gaz fırınına aniden atılmak suretiyle pişirilmiştir. Bu deneme, genişletilmiş perlitin kullanılması ve işlenmesi ile ilgili bir dizi deney yapan tesisin kurulmasına önderlik etmiştir. 1949 yılından önce perlitin ticari amaçla kullanım alanı çok azdı. 1952 yılında hafif beton agregalarında önemli ölçüde kullanılmaya başlanmış ve endüstrileşmenin gelişmesine bağlı olarak kullanım alanları artmıştır (MTA, 1985).



Şekil 2.3: Perlitin taş halde görünümü



Şekil 2.4: Perlitin toz halde görünümü

2.3.1. Perlitin tanımı ve özellikleri

Perlit, mineralojik karakter bakımından %3-10’u kristalleşmiş mineraller olan ve obsidyen parçacıkları içeren asidik karakterli volkanik bir camdır (**Şekil 2.3,4**). Perlit, ısıyla genişleme özelliği olan, genişletildiğinde çok hafif ve gözenekli hale geçen bir kayadır. Perlit kelimesi hem perlit hem de genişletilmiş perlit için kullanılmaktadır (**DTP, 1996**). Ancak, ham perlit ve genişletilmiş perlit farklı fiziksel özellikler göstermektedirler (**Yalın, 1983**).

2.3.1.1. Perlitin fiziksel özellikleri

Çeşitli perlit kayalarının renkleri ve yapıları birbirinden çok farklı olabilir. Bu bakımdan perlit göze tanımak oldukça zordur. Ham perlitin rengi saydam açık griden parlak siyaha kadar değişmekte olup, genişletildiğinde renk tamamen beyazlaşır (**DTP, 1996**). **Tablo 2.9**’da ham ve genişletilmiş perlitin fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 2.9: Perlitin fiziksel özellikleri

Ham perlit	Renk	Gri, siyah ve grinin tonları
	Yumuşama noktası	800-1100 °C
	Erime noktası	1315-1390 °C
	pH	6,6-8,0
	Özgül ısı	0,20 kcal/ kg°C
	Özgül ağırlık	2,2-2,4 gr/ cm ³
	Serbest nem (%) maks.	0,5
	Ağırlık kaybı (%)	0,5
	Çözünme özelliği	Sıcak konsantre alkali ve HF asit (%2) konsantre mineral asitlerde az, (%0,1) seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erir.
genleştirilmiş perlit	Renk	Beyaz, gri ve tonları, genişince tümüyle beyaz
	Sertlik	5–6 mohs
	Yumuşama noktası	871–1093 C°
	Erime noktası	1260–1343 C°
	Özgül ısı	0,2 cal/g C°
	Isı iletkenliği	0,04 W/Mk
	Refraktif indeks	1,5
	Asitte çözülme özelliği	Konsantre sıcak alkali ve hidrolik asitte çözünür. Konsantre mineral asitlerinde az erir (%2). Seyreltik mineral veya konsantre zayıf asitlerde çok az erir (%0,1)

Perliti yapı, genellikle konsantrik çatlaklar içeren, soğan kabuğu şekilli ufak parçalara ayrılmış cam halindedir. Kayaç olarak görünümü, kompakt, ince taneli, gözenekli, gevşek, kolay kırılabilir, kum ve kum taşı yapısında el ile ufalanabilir nitelikler taşır. Petrografik doku ile görünümüne göre perlit, şu şekilde sınıflandırılabilir (MTA, 1985):

- Taneli perlit,
- Ponzalı perlit,

- Konsantrik yapılı perlit,
- Lifli perlit (devitrifiye perlit),
- Feno kristalli perlit,
- Kum halinde perlit; bezelye iriliğinden, portakal büyüklüğüne kadar değişen perlit modülleri mevcuttur.

2.3.1.2.Perlitin kimyasal özellikleri ve genleştirilmesi

Perlitte en önemli özellik sudur. Perlitin bünyesi içinde bulunan suyun tamamına “bağlı su” denir. Bu suyun %94–98 kadarı, ince kılcal sistemler tarafından tutulmakta olup serbest su niteliğindedir. Geri kalan %2–6 kadarı ise, perlitin %90-97’sini teşkil eden volkanik camın içine, perlit oluşurken moleküller halinde girmiş, yani perlit camıyla birleşmiştir. Buna etkin su denir. Bu suyun oluşumundan ötürü cam kütle kristalleşmemekte, perlit de kararlılığını korumaktadır. Perlit ısıtıldığında, sıcaklık 450°C iken, serbest suyun tamamı buhar olup gider ama kayada bir değişme olmaz. Sıcaklık 700–1200 °C’ye ulaşınca camın bünyesindeki etkin su, birkaç yüz derecelik buhar haline dönüşerek kayayı patlatır ve kaybolur. Bu olayla perlitin hacmi, en az 4 misli artar, cinsine göre bu artış miktarı 20 kat kadar olabilir (**Önem, 2000**).

2.3.1.3.Perlitin minerolojik kompozisyonu

Hacminin %90–97 kadarı cam olup, kristalleşen mineraller feldispat ve biyotittir. Nadir olarak da, apatit ve manyetit görülür. Çoğu kez volkanik camdan oluşan hamur içinde mikrolitler ve fenokristaller (vitrofirik doku) vb bulunur.

Perlitin cam karakterine rağmen, soğan kabuğu yapısının çatlaklarından ve diğer kısımlarından çok ince dağılmış zeolit kristalizasyonu, yani morderit oluşumu saptanmıştır. Perlitin kırılma indisi 1,488–1,506 arasında olup, ortalama değer 1,497’dir. Polarize ışıktaki perlit camı izotropiktir; fakat bazen hafif bir çift kırılma gösterir. X ışını analizi ile (XRD) perlitlerin en çok %4 oranında serbest silis içerdiği saptanmıştır. Altere olmamış perlitler sekonder mineraller içermezler; fakat altere olmuş perlitlerde kalsedon, opal, montmorillonit ve ilmenit mineralleri bulunabilir (**MTA,1985**).

2.3.2. Perlit rezervleri ve kullanım alanları

Dünyanın en büyük üretici ve tüketici konumundaki ülkelerden biri olan ABD’de 2006’da tüketilen perlitin %61’i yapı malzemelerinde, %14’ü tarım agregası %7,5’i filtre yardımcı malzemesi, %11’i dolgu malzemesi, %6,5’i diğer alanlarda kullanılmıştır (**url-2**). Dünya genelinde, yapı malzemelerinde kullanılan perlitin yaklaşık %70’inin yalıtım plakaları ile tavan döşemelerinde kullanıldığı belirtilmektedir.

MTA, Türkiye Perlit Envanteri (1985)’ne göre dünya genelinde perlitin kullanım alanı istatistikî olarak şöyledir:

- % 35’i sıvada,
- % 25 ‘i beton agregası olarak,
- % 23’ü filtre sanayinde,
- % 8’i yalıtım malzemesi yapımında,
- % 4’ü tarımda,
- % 5’i diğer alanlarda kullanılmaktadır.

Toplam perlit tüketiminin %60-70’ini gerçekleştiren inşaat sektörü, perlitin en fazla tüketildiği sektördür. Genleştirilmiş perlitin inşaatta kullanım alanları ise,

- Perlitli sıva;
- Perlit agregalı hafif yalıtım betonu (çimento veya alçı bağlayıcı);
- Perlit agregalı hafif yapı elemanları (kiremit, boru yalıtımı vb.);
- Isı ve ses yalıtım betonu;
- Isı ve ses yalıtıcı yüzey panoları;
- Çimento ve alçı dışındaki bağlayıcılarla yapılan özel amaçla perlit betonları;
- Çatı ve zeminde şekillendirilmiş yalıtım malzemeleri;
- Yangına karşı özellikle çelik konstrüksiyonlarda yalıtım katı;
- Hafif pişmiş toprak yapı tuğlası;

- Gevşek dolgu malzemesi olarak (tavan araları zemin ve duvar boşluklarında yalıtım malzemesi olarak; silikonla özel bir işleme tabi tutularak köpük halinde)

olarak sıralanabilir.

Tablo 2.10: Ham Perlit, Genleştirilmiş Perlit ve malzeme ile ilgili TSE Standartları

TSE 415	Isı iletkenliği ve geçirgenliği direncinin yapıda kullanılması için hesap değerinin bulunması
TSE 1114	Hafif agregalar (Beton için)
TSE 2511	Taşıyıcı hafif betonların karışım hesap esasları
TSE 2381	Konutlarda ses yalıtımının değerlendirilmesi
TSE 1476	Ses absorsiyonu katsayıların ölçülmesi
TSE 1474	Alçı bölme duvar bileşenleri
TSE 1475	Alçı bölme duvar bileşenlerinin yerlerine konulması kuralları
TSE 1262	Sıva yapım kuralları (Bina iç yüzeylerinde kullanılan)
TSE 1263	Yapı elemanlarının yanmaya dayanıklılık deney metotları
TSE 825	Binalarda ısı etkilerinden korunma kuralları
TSE 305	Odun talaşı levhaları
TSE 705	Fabrika tuğlaları
TSE 639	Uçucu küller
TSE 640	Uçucu küllü çimento
TSE 20	Yüksek fırın cürufu çimentoları
TSE 901	Lifli ısı ve ses yalıtma malzemesi
TSE 2823	Betondan mamul yapı elemanları
TSE 453	Gaz beton yapı malzemeleri ve elemanları
TSE 3681	Genleştirilmiş perlit agregası
TSE 3649	Perlitli ısı yalıtımı betonu yapım- uygulama kuralları deney ve metotları
TSE 3682	Alçılı perlit bölme duvarı elemanları

Perlit genleştirilmiş olarak kullanıldığı gibi ham olarak da geniş kullanım alanlarına sahiptir. Ham perlit kimyasal bileşimi itibarıyla silisli ve alüminyumlu bileşikler içerdiğinden kalsiyum esaslı bağlayıcılar ile kimyasal tepkimeye girerek hidrolik aktivite gösterir. Bu özelliği nedeniyle yapı sektöründe geniş çapta kullanılmaktadır. Perlit çimentoya dayanıklılık kazandırmaktadır.

Bunun için ham perlit kayası kırılıp öğütülüp elendiği gibi doğal olarak agrega halinde bulunan perlit kaynakları da kullanılmaktadır. Bu şekilde doğal agrega olarak bulunan perlitin ülkemizde geniş rezervleri vardır. (Erzincan, Nevşehir, Ankara civarındaki yataklarda)

Perlitin, inşaat sektöründe kullanımı:

- İç ve dış inşaat sıvalarında
- Dona karşı dayanıklı olduğundan su alan inşaatlarda
- Çatı ve terasların su yalıtımlarında
- Yüzme havuzların yapımında
- Isı yalıtımında sıva olarak veya briket kiremit gibi yalıtımla hafif yapı elemanı üretimindedir.

Kullanım alanlarına paralel olarak ülkemizde perlit ile ilgili TSE standartlar **Tablo 2.10'**da yer almaktadır.

2.4. Puzolanlar İle İlgili Yapılmış Çalışmalar

Puzolanlar konusunda yapılan çalışmaların birçoğu, farklı puzolanik maddelerin, çimento karışımındaki klinker oranının yerini alabilmesine dair olmakla beraber; geri kalan çalışmalar, büyük oranda tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere puzolanlı kireç harçlarının özelliklerinin incelenmesi konusudur.

Tonak ve diğerleri, (1989) puzolanik aktivitenin tespiti konusunda kimyasal tetkikin değerlendirmesini ele almışlardır. %2'lik seyreltilmiş hidroflorik asit (HF) çözeltisinde çözünebilen puzolan miktarını, puzolanik aktiviteyi sağlayan reaktif SiO₂ olarak kabul ederek Türkiye genelinde 23 adet puzolan üzerinde deney yapmışlardır. Sonuçta, %2'lik hidroflorik asit (HF) çözeltisinin kristal yapıdaki

Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 'yu çözmediği; ayrıca feldspat grubu minerallerin ve kuvars (SiO_2) mineralinin de bu asit çözeltisinde çözünmediği saptanmış. Aynı puzolanlar ile TS 25'te tanımlı puzolanik aktivite deneyi tekrar edilmiş, 7 günlük numunelerin kırılmasıyla elde edilen parçalar öğütülerek X ışınları difratogramları (XRD) çekilmiştir. Difratomlardaki mineralojik analiz sonucunda, 2'lik seyreltilmiş hidroflorik asit çözeltisinde çözünmemiş olan mineraller bulunarak yöntemin sağlaması elde edilmiştir. Puzolanik aktivite tespiti için, doğruluğu test edilmiş bu yöntem ile 1 gün içinde sonuç alınabilmesi kolaylık sağlamaktadır.

Okucu (1998), “Bigadiç ve Turnatepe Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri” başlıklı çalışmasında adı geçen bölgelerdeki volkanik zeolitik ve perlitik volkanik tüflerinin çimento katkı maddesi olarak değerlendirilebilmesi olanaklarını ele almıştır.

Söz konusu puzolanların fiziksel özelliklerinin belirlenebilmesi için: özgül ağırlık, dane boyutu, özgül yüzey (Blaine) ve öğütülebilirlik testi deneyleri; kimyasal özelliklerinin belirlenebilmesi için: çözünmeyen kalıntı, kızdırma kaybı ve kimyasal analiz deneyleri sonuç olarak da TS 25'e göre puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır.

Zeolitik ve perlitin tuf katkılı çimentolar ve portland çimentosunun dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacıyla %24-28-32 oranlarında katkılı çimentolar ve aynı klinkerden referans numunesi olarak çimento numunesi üretilmiştir. Üretilen çimentolar ile normal kıvam tayini, priz başlama ve sona erme süreleri, hacim genleşmesi tayini, eğilmede çekme ve basınç deneyleri yapılmıştır.

Bu çimentolarla hazırlanan harçlar 28 gün normal koşullarda su içinde, 28. günden sonra da 12 hafta su ve sülfat çözeltisinde kür edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre katkılar portland çimentosuna göre sülfatlı ortamda harcın dayanıklılığını artırmıştır. Özellikle zeolit katkılı harçlarda bu özellikler daha belirgin olarak saptanmıştır. X ışını difraktometre (XRD) incelemelerinde referans numunelerinde etringit oluşumuna rastlanırken, katkılı çimentolarda rastlanmamıştır. Bu da katkılı çimentoların sülfatlı ortama dayanıklı olduğunu bir kez daha ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, zeolitik tüflerin kolay öğütülebilirliği yanında puzolanik aktivitelerinin yüksek olduğu, buna karşılık perlitik tüflerde puzolanik aktivitenin yüksek olmasının yanı sıra zor öğütülebilmesi ve 28. gün sonunda basınç dayanımının standartları

aşmakla birlikte zeolitik tüflere oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Perlitik tüflerin kullanılabilir bir puzolan olmakla beraber zeolitik tüflerle uygun oranlarda harmanlanarak kullanılması önerilmektedir.

Papayanni ve Stefanidou (2005), geçmişte anıtsal yapıların inşasında yaygın olarak kullanılmış kireç-puzolan harçlarının günümüzde restorasyon amaçlı kullanımlarından yola çıkarak mukavemet-porozite ilişkisini incelemiştir. Çimento harçlara kıyasla yüksek porozite ve düşük dayanım gösteren bu harçların durabiliteleri dikkat çekicidir.

Araştırmada bağlayıcı olarak sönmüş kireç tozu ve 45 µm elek üzerinde en fazla %10 kalıntı bırakacak dane büyüklüğünde Milos Adası doğal puzolanı 1:1 oranında kullanılmıştır.

Kireç-puzolan harçları mukavemetine, puzolanik tepkime indeksinin etkisinden başka su/ bağlayıcı ile agrega hacmi, orijini ve boyutu değişkenleriyle porozitenin etkisini ölçmeye yönelik farklı numune serileri üretilmiştir. Bu numuneler 20 °C de kürlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, su/ bağlayıcı oranı poroziteyi etkileyen en önemli faktör olarak belirlenmiştir. Dayanım-porozite ilişkisinin, Power'in matematiksel formülasyonu ile kabul edilebilir sapma oranıyla bulunabileceği saptanmıştır. Kireç-puzolan harçlarında porozitenin zamanla azaldığı, 28 günlük numunedeki porozitenin 2 yıl sonra %20-25 civarında eksik olarak ölçülmesiyle saptanmıştır. Ayrıca, harcın erken dönemlerinde uygun kütleme koşullarının açık porozite ve sonuçta durabilitesi için önemli ölçüde etkili olduğu sonuçlarına varılmıştır.

Shi (2001), kireç-puzolan harçlarının özellikleri ve hidratasyonunu etkileyen bazı faktörler üzerine çalışma başlıklı makalesinde, kireç-puzolan harçlarında farklı kireç oranları, su miktarı, porozite, dayanım gelişimi ve puzolanik tepkime oranı gibi etkenleri incelemiştir. Bu incelemenin sonucunda, kireç miktarının %20'ye kadar artırılması durumunda gerekli su miktarında bir değişme olmadığı, kirecin bu orandan daha fazla konulduğunda ise, ilave su gereksiniminin ortaya çıktığı, buna paralel olarak porozitede artış olduğu, puzolan ile tepkimeye giremeyen fazla Ca(OH)_2 nedeniyle mukavemette düşme görüldüğü saptanmıştır. Ayrıca, puzolanik tepkimeye giren CaO miktarı açısından sönmüş ve sönmemiş kireçler

kıyaslandığında, 28 güne kadar olan dayanım değerlerinde sönmemiş kirecin daha iyi sonuç verdiği, ancak daha sonraki sürelerde bu ayrımın ortadan kalktığı gözlenmiştir. Neden olarak da, sönmemiş kireç ile hazırlanan harçta puzolanik tepkime öncesi kirecin sönme tepkimesinin başlaması ve ortaya çıkan ısıнын puzolanik tepkimeyi olumlu etkilemesi gösterilmiştir. Sönmemiş kireç ile üretilen harçlar, sönmüş kireçle üretilene kıyasla daha yüksek dayanım göstermiştir.

Shi ve Day (2000), doğal puzolanın tepkime potansiyelini tetikleyici etkenleri araştırmıştır. (a) doğal puzolanın kalsinasyonu, (b) asitle iyileştirilmesi, (c) uzun öğütme süresi, (d) puzolan ile hazırlanan harcın yüksek sıcaklıkta kürlenmesi, (e) puzolanlı harca alkali eklenmesi yöntemleri bulunmuş; ancak, kolaylık, maliyet gibi ölçütlerle alkalilerin etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Bu amaçla, %80 puzolan, %20 sönmüş kireç bağlayıcısı olan karışım için ağırlıkça %4 oranında NaSO_4 ve CaCl_2 eklenerek hazırlanan numuneler 23, 35, 50 ve 60 °C’lerde kürlenmiştir.

NaSO_4 katkısı farklı sıcaklıkta kürlenlen tüm numune gruplarında hem erken hem de son dayanım değerlerinde artış sağlamıştır.

CaCl_2 , 23 °C’de kürlenlen numuneler için erken dayanımı düşürürken, geç dayanımda artış; 35, 50 ve 60 °C’lerde ise hem erken hem de geç dayanımda artış sağlamıştır. Yapılan XRD ve Isıl Analizler sonucunda her iki katkının da serbest Ca(OH)_2 tüketimini hızlandırdığı ve basınç dayanımı ile Ca(OH)_2 tüketimi arasında bir korelasyon olduğu ortaya konulmuştur.

Shi ve Day (2001), doğal puzolanlar için puzolanik etkinlik (aktivite) reaksiyonunun artırılması için mekanik, ısı ve kimyasal olmak üzere üç farklı yöntemin kıyaslamasını yapmışlardır. Mekanik yöntemde, doğal puzolanın uzun süre öğütülmesiyle Blaine özgül yüzey değeri yüksek puzolandan numuneler hazırlanmış; ısı yönteminde, doğal puzolan ile hazırlanan numuneler yüksek sıcaklıkta kürlenmiş; kimyasal yöntem de ise, puzolan ve bağlayıcı kütleleri toplamının % 4’ü kadar NaSO_4 ve yine aynı oranda CaCl_2 katkıları ile numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan harç %80 puzolan ve %20 kireç oranlarında üretilmiştir. Ca(OH)_2 kullanım oranı, dayanım gelişimi, geç basınç dayanım değeri ve maliyet, bu çalışmadaki başlıca parametreler olmuştur. Bu üç aktivasyon yöntemi puzolan-kireç

harcının hem puzolanik tepkimesini hem de dayanım gelişimini hızlandırmıştır. Ancak, mekanik aktivasyon yöntemi ile son dayanım değerinde önemli bir etki görülmezken; ısı aktivasyon yöntemi ile geç dayanım değeri azalmış; kimyasal yöntemle ise, önemli artış kaydedilmiştir. Mekanik ve ısı aktivasyon yöntemleri için ekstra araç ve enerji gerekliliğinin maliyeti artırması olumsuz bir etken olarak değerlendirilmiştir. Kimyasal aktivatörler ise, öğütülme sırasında puzolana eklenebileceği gibi harç hazırlanırken de eklenebilirler; böylece ayrıca bir araç ya da enerji gerektirmemiş, bunla birlikte toplam maliyete kendileri gider kalemi olarak katılmıştır. Deney sonuçları kimyasal aktivasyonun en etkili ve fizibil (makul) yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

Uzal ve Turanlı (2003)'nın yüksek hacimde doğal puzolan içeren harmanlanmış çimentolar üzerine çalışmalarında, Türkiye'den iki çeşit tütün ağırlıkça %55 oranında portland çimentosuna karıştırılmasıyla elde edilen harman çimentonun özellikleri incelenmiştir. Farklı öğütme süreleri, partiküllerin boyut dağılımı, priz süresi, basınç dayanımı ve alkali-silika aktivite değerleri portland çimentosu ile kıyaslanmıştır. Basınç dayanımı testinde 0,45 olarak belirlenip sabit tutulmak istenen su/ çimento oranı nedeniyle süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Harman çimentoyla elde edilen değerlerin kontrol numunesi olan portland çimentosu ile kıyaslamasında 90 dakika öğütülen puzolan ile üretilmiş harman çimentonun 91 güne kadar düşük dayanım gösterdiği; ancak, 120 dakika öğütülmüş olan puzolanla hazırlanmış harman çimentonun 91 günde kontrol numunesi ile aynı dayanım değerlerini verdiği gözlenmiştir. Ayrıca, harman çimentoları ile hazırlanan numunelerde alkali-silika genleşmesinin büyük oranda azaldığı saptanmıştır.

Turanlı ve diğerleri (2004), yüksek miktarda doğal puzolan içeren harmanlanmış çimentoda malzeme özelliklerinin etkileri konulu çalışmalarında, Türkiye genelinden alınan 3 farklı özellikteki puzolanın portland çimentosuna katkı olarak kullanımı araştırılmıştır. Puzolanik madde ile harman edilen portland çimentosu harcın partikül boyutu, priz süresi, hidrasyon ısı, su gereksinimi ve basınç dayanımı değerleri portland çimentosundan elde edilen değerler ile kıyaslanmıştır.

Camsı yapı ve hidrasyon sıcaklığı değerlendirilerek en yüksek puzolanik reaktiviteyi gösteren puzolan türü aynı zamanda 3, 7, 28 ve 91 günlük dayanım değerlerinde de en iyi sonucu vermiştir. Bu tür puzolanın %30, 40 ve 55 oranlarında

portland çimento ile karıştırılması sonucu elde edilen harman çimentonun özellikleri değerlendirilmiştir.

Ön deneylerde puzolanın 400 m²/kg'dan düşük Blaine özgül yüzey değerine sahip olmasının erken dayanım değerleri için uygun olmadığı, uzun süreli öğütmenin enerji girdisini artıracak göz önüne alınıp 450-500 m²/kg'lık Blaine özgül yüzey değerinin yeterli olduğu saptanmıştır.

Yaklaşık aynı süreler öğütülmüş olan karışım çimentosunun Blaine özgül yüzey ölçümleri portland çimentosundan daha yüksek bulunmuş. Öğütme süreleri ve Blaine özgül yüzey değerleri göz önüne alındığında harmanlanmış çimentonun portland çimentodan daha kolay öğütülmesi sonucu çıkmakta; ne var ki 45 mikronluk elek üstü kalıntı miktarı bunun tersini göstermiş ve karışım çimentosunun daha iri olduğu sonucu bulunmuştur. Bu çalışma ile Blaine özgül yüzey ölçümünün portland çimentosu dışındaki diğer malzemeler için güvenilir olmadığı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmadan çıkarılan bir diğer sonuç, harmanlanmış çimentoların dayanım gelişme özellikleri yalnızca doğal puzolanın puzolanik aktivitesine ya da klinkerin bileşim kompozisyonuna bağlı olmadığı; bunların yanında harmanlanan çimento bileşenlerinin öğütülmesindeki etkileşim sonucu partikül boyut dağılımının da etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Harmanlanmış çimentoda puzolan oranı arttıkça, su ihtiyacı ve oranı da artmış, priz başlama ve sonlanma sürelerinin kısaldığı görülmüştür; hidrasyon ısının, puzolanik tepkimeye bağlı olarak düştüğü tespit edilmiştir.

Tonak ve diğerleri (1991), diatomit atıklarının çimento üretiminde kullanılabilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, diatomitin çeşitli oranlarda ilave edildiği portland klinkeri, alçı taşı ve diatomit karışımından çimento örnekleri hazırlanmıştır. Farklı oranlarda diatomit içeren bu çimentoların fiziksel ve mekanik dayanım testleri yapılmıştır.

Elde edilen test sonuçları incelendiğinde %10 diatomit katkı oranının dayanımları yaklaşık %30 oranında artırdığı; %15 ve daha yüksek katkı oranının ise harcın su gereksiniminin artırması nedeniyle dayanımın düştüğü görülmüştür. Ayrıca, %10 diatomit ile öğütmenin çimento değirmeninde yaklaşık %33 oranında elektrik enerjisi tasarrufu ve böylece değirmende %50 üretim artış sağladığı görülmüştür.

Dolayısıyla diatomitin çimento endüstrisinde, öğütmede enerji tasarrufu sağlayan, çimento değirmeninde üretimi artıran ve dayanımların artmasını sağlayan iyi bir katkı maddesi olması nedenleriyle çok amaçlı olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Hossain (2004), Papua Yeni Gine volkanik süngertaşının (ponza) yapı malzemesi olarak endüstriyel kullanımını araştırdığı çalışmada bu malzemenin iri ve ince agrega olarak hafif beton üretimi, puzolanik malzeme olarak çimento katkısı ve ısı yalıtımı özelliğinin değerlendirilmesi olanaklarını değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla üç harç grubu oluşturmuştur. Bunlar, kaba agreganın ponza, ince agreganın ise kum olduğu birinci; ince ve kalın tüm agreganın ponzadan olduğu ikinci; ponzalı kaba agrega oranının artırılıp, kumdan mütevellî ince agreganın azaltıldığı bunun birlikte su miktarının da artırıldığı üçüncü numune gruplarıdır.

Ponzanın yalnızca kaba agrega olarak kullanıldığı numuneler, tüm agreganın ponza olduğu numunelere oranla daha yüksek basınç dayanımı verdiği deney sonuçlarıyla bulunmuştur. Boşluk miktarı ve su emiciliği göz önüne alındığında ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması gereği görülmüştür.

İnce ve kalın tüm agreganın ponzadan olduğu numunelerin ısı iletkenliği en düşük bulunurken, agrega olarak ponzanın fazla olduğu numunelerin ısı iletkenlik değerleri daha düşük tespit edilmiştir.

Ponzanın puzolanik niteliğinin karışım çimentosu üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması amacıyla alkali silika tepkimesi, otoklav genleşmesi ve dayanım değerleri ölçüt olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, portland çimentosuna ağırlıkça %10, 20, 30 ve 40 oranlarında ponza karıştırılmış numuneler üretilmiştir. Alkali-silika tepkimesi için en uygun sonucu %40 oranda ponza karıştırılmış numune grubu vermiştir. Ancak, bu numune grubu dayanım değerleriyle tatmin edici olamamıştır. Otoklav genleşmesi de göz önüne alındığında, %20 oranında ponza içeren numuneler, karışım çimentosu için en uygun değerleri sağlamıştır.

Sonuç olarak, ponza hafif beton üretimi ve karışım çimentosu üretimi için uygunluğu yanı sıra ısı iletkenlik değeriyle ucuz, çevre dostu ve enerji korunumu sağlayan yapı bloğu üretimi için uygun bulunmuştur.

Koçu (1997), Konya çevresinde bulunan volkanik tüfün bağlayıcılık özelliğinden yararlanılarak yeni yapı malzemesi geliştirilmesi amacıyla yaptığı çalışmada,

öncelikle volkanik bir kayaç olan bu tüfün TS 25'teki puzolan limit değerlerini sağladığını kanıtlamıştır. Dane boyutu olarak 211 μ luk elekten geçen puzolan malzeme ile kireç ve su miktarlarında değişiklik yapılarak ve farklı sıcaklıklarda kürlemeler denenmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan kirecin puzolan miktarına oranı % 30-35-40 için; suyun puzolan ve bağlayıcıya oranı % 45 olarak denenmiş; 70-80 ve 90 °C de kürlemeler yapılmıştır.

En yüksek basınç dayanımı, bağlayıcı/puzolan oranı % 35, su/ (puzolan+bağlayıcı) oranı %45 olup, 70 °C de kürlenene numune ile elde edilmiştir. Ultrases ölçümleriyle elde edilen porozite-kompasite değerleriyle ısı iletkenlik değerleri bulunmuş; bu karışım, delikli tuğla ve dolu tuğla ısı iletkenlik değerlerine paralellik göstermiştir.

Hazırlanan numunelerde, bağlayıcı/puzolan oranı ve su/ (puzolan+bağlayıcı) oranı arttıkça priz süresinin uzadığı tespit edilmiştir. Kürleme sıcaklığının artışı dayanımın düşmesine neden olmuştur. Farklı karışım ve kürlemelerle elde edilen numunelerden donma-çözünmeye en dayanıklı olanlar 70 °C de kürlenene olarak belirlenmiştir.

Diferansiyel termal analiz (DTA) ve TG sonuçlarında, hammadde ve mamul maddenin birbirinden farklı bulunduğu görülmüş, dolayısıyla, numune üretiminde karışıma giren tüm hammaddenin tepkimeye girdiği sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak bu hammadde ile kireç-kumtaşı tuğlası ve gözenekleri ayarlanabilen boşluklu elemanlar üretilmesi önerilmektedir.

Atmosferik basınç altında buhar kürleme prekast beton üretiminde erken dayanım değeri sağlamak için önemli bir tekniktir. **Türkel ve Alabas (2005)**, prekast beton üretiminde yaygın olarak kullanılan PC 42.5 yerine portland kompozit çimentosunun (PKC/A 42.5) atmosferik basınç altında buhar kürlemesiyle kullanılabilme olanaklarını araştırmıştır. Deney numuneleri, sabit çimento dozajı (400 kg/m^3) ile 4, 8, 16, 24 ve 36 saatlik 65 ve 85 °C'lerde buhar ile kürleme sonucunda basınç dayanım değerlerinin kıyaslaması esaslı ile değerlendirilmiştir. Söz konusu sıcaklığı ulaşmak için kontrollü sıcaklık artırma süreleri, bu sıcaklığı sürdürme süreleri ve ortam sıcaklığına dönüş için kontrollü soğutma süreleri bu çalışmada bir diğer değişken olarak kullanılmıştır.

Sonuçta, 85 °C'de kürlenene tüm numune gruplarının, 3 günlük kontrol numunesinden daha yüksek basınç dayanımı verdiği; optimum dayanım değerinin

elde edildiği PC 42.5 imentoosu ile 65 °C’de 31 saatlik kürlemenin, PKC/A 42.5 ile 85 °C’de 29 saatte elde edilebildiği; bununla birlikte 85 °C’de kürlenen numunelerin yüksek erken dayanım sağladığı; ayrıca her iki sıcaklıkta imento türü fark etmeksizin buharlı kürleme yöntemiyle zaman ve enerji miktarının azaldığı, mekanik özelliklerde olumsuz etkilerin kalktığı ortaya konulmuştur.

Yapay puzolan olarak, atık maddelerin puzolanik özelliklerinin incelenmesine ilişkin, cam atıkların değerlendirilmesi, tarım atığı olarak pirinç kabuğu külünün değerlendirilmesi konularında şu çalışmalar yapılmıştır:

Shi ve diğerleri (2005) New York City atık cam potansiyelini göz önüne alarak, yapı malzemesi olarak değerlendirilmesi olanaklarını araştırmışlardı. Hali hazırda asfalt beton (asphalt concrete) yol yapımında kısmen agrega yerine, boru yataklarında, gaz dağıtım şebekelerinde ve drenajlarda dolgu olarak kullanılan atık camların, portland imento ile harmanlanıp puzolanlı imento elde edilmesi olanakları incelenmiştir. Aynı cam maddesinin kırılması sonucunda farklı dane boyutlarında 4 grup madde oluşturulmuştur. Bunlardan Blaine zgl yüzey alan değer en yüksek olan, aynı koşullarda en yüksek puzolanik aktivite değer ve aynı koşullarda portland imentosu ile hazırlanmış olan numunelerden de daha yüksek dayanım değerlerini vermiştir.

Yukarıda sözü edilen 4 farklı grup cam tozunun portland çimentosuna kütlece %20 oranında karıştırılmasıyla elde edilen harman imento, yine aynı oranda portland imento ile F sınıfı uçucu külün harmanlandığı imento ve yalnızca portland imento ile hazırlanmış altı harç grubu oluşturulmuştur. Bu harçlarda imento/kum oranı sabit olup; su/imento oranı ise, katkısız olan ve kontrol numunesi kabul edilen portland imentosu harcının kıvamını sağlayacak su miktarına göre farklılık göstermiştir. Uçucu kül ile hazırlanan karışımda su oranı azalırken, en yüksek Blaine zgl yüzey değerli cam tozu ile hazırlanan harcın su oranı kontrol numunesi ile aynı olmuştur. 23 °C de 1, 3, 7, 28 günlük dayanımlarda en yüksek iki Blaine zgl yüzey değerine sahip camlarla hazırlanan numune gruplarının uçucu kül ile hazırlananlardan yüksek değerler verdiği grlmştir. Ancak 35 ve 65 °C lerde uçucu kül kontrol numunesi ve cam tozu katıklı numunelerden daha yüksek dayanım göstermiştir. 7,14 ve 21 günlük harçların alkali-silika genleşmesi gözlemlerinde cam tozu katıklı numune, kontrol numunesine oranla daha iyi sonuç verirken, en düşük genleşme oranı ile uçucu kül en başarılı sonuçları vermiştir.

Sonuç olarak cam tozunun belirli bir incelik değerinde kullanılması alkali-silika genleşmesini azalttığı ancak, uçucu kül kadar iyi netice veremediğı ortaya konmuştur.

Mazlum (1989), tarımsal ürün atığı olan pirinç kabuklarından elde edilen pirinç kabuğı külünün özellikleri ve harçlardaki durabiliteye etkisini araştırmıştır. Pirinç kabukları 400–500 °C sıcaklıkta lpg ile çalışan fırında 1,5 saat yakılmış, elde edilen küllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiş, puzolanik karakteri kimyasal ve mekanik deneylerle saptanmıştır; silis dumanı, uçucu kül, cüruf ve tras gibi puzolanlarla karşılaştırılmıştır. Küller çimentoya %10, 20, 30 oranlarında ikame şeklinde katılmış, küllü harçlar ile külsüz şahit harçlar üretilmiştir. Üretilen harçlar üretimden 28 gün sonra saf su ve saf su ile hazırlanmış sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisine konulmuştur. Harçlarda belirli kür süreleri sonunda eğilme ve basınç dayanımı, ağırlık ve boy değişimi, kılcallık, su emme, birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Ayrıca, X ışını difraktometrisi (XRD) ve elektron mikroskobu ile harçların mikro yapıları incelenmiştir.

Çalışmada elde edilen başlıca sonuçlar şöyledir: su içinde bekletilen küllü harçlarda eğilme ve basınç dayanımı şahit harca ve zamana göre artmıştır. Sülfat çözeltisinde bekletilen küllü harçların eğilme ve basınç dayanımı 8. kür haftasından sonra azalmıştır. Küllü harçlarda ise dayanımlar zamanla, şahit harca göre daha fazla artmıştır. Sülfat çözeltisinde bekletilen küllü harçların eğilme dayanımı su içinde bekletilen küllü harçların dayanımına göre daha yüksek; aynı harçların basınç dayanımı ise su içinde bekleyeninkine denktir. Su içinde bekletilen tüm harçların ağırlık ve boy değişimi de 28 günde artış şeklinde az miktarlardadır. 28. günden sonraki kür haftalarında ise şahit harcın ağırlık ve boy değişimi sülfat çözeltisinde sürekli ve büyük miktarlarda artmıştır. Küllü harçlarda ağırlık değişimi sülfat çözeltisinde ağırlık kaybı, su içinde çok az ağırlık artışı şeklindedir; kılcallık ve su emme, değerleri suda kür için kül miktarının artmasıyla artmış; birim ağırlık, kül miktarının artmasıyla azalmıştır.

XRD incelemelerine göre su ve sülfat çözeltisinde bekletilen harçlardan şahit ve %10 kül içerenlerde $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saptanmıştır. Sülfat çözeltisinde bekletilenlerde ise $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in yanında ettrenjit görülmüş; oysa %20 ve 30 küllü harçların yapısında bu bileşiklere rastlanmamıştır. Araştırma sonuçlarına göre %20 ve 30 oranlarında kül

katılmasının sodyum sülfatlı ortamda harcın dayanım ve dayanıklılığını artırdığı kanısına varılmıştır.

Mavi (2000), “Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi” başlıklı tez çalışmasında, kireç özelliklerinin katkı maddeleri eklenmesiyle ne yönde iyileşme göstereceğini araştırmıştır. Bu amaçla, kireç, kum ve sudan oluşan kireç harcını referans numunesi kabul edip, aynı harca puzolan, su itici elastik özelliğinde akrilik, çimento ve puzolan+akrilik katkıları eklenmesi suretiyle farklı numune grupları oluşturulmuştur. Bu numuneler ile 14, 28, 90, 180 ve 270 günlük süreler sonunda fiziksel ve mekanik deneylerin yanı sıra rötre ve buhar geçirgenlik deneyleri yapılmıştır.

Yalnızca puzolan eklenen harç türünde en az rötre miktarı görülürken, akrilik ve puzolanın birlikte katıldığı numune türü en fazla rötre miktarını göstermiştir; yalnızca kireç, kum ve sudan oluşan numune türü ise rötrede en artışı göstermiştir.

Çimento katkılı kireç harcının en düşük ultrases hızı değerini verdiği; puzolan + akrilik katkılı numunelerin ultrases değerinde bir miktar düşme olduğu; kireç harcındaki akrilik katkısı miktarının artırılmasının ultrases hızını bir miktar düşürdüğü gözlenmiştir. Puzolan katkısının artırılması sonucunda, katkısız kireç harcı ile aynı ultrases hız değeri elde edildiği, puzolan miktarı azaltıldığında ise bu değerde düşme olduğu belirlenmiştir.

Akrilik katkılı ve puzolan katkılı numune gruplarının en düşük, çimento katkılı numunelerin ise en yüksek su emme değeri verdikleri; akrilik+su itici katkılı numune grubunun en düşük, puzolan katkılı numune grubunun ise en yüksek buhar difüzyon direnci katsayısını verdikleri görülmüştür.

Eğilme deneyi sonucunda, katkısız kireç harcının 28. günden sonra 180. güne kadar sabit ivmeyle artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek değerleri katkısız ve puzolan+akrilik katkılı numune grupları vermiştir.

Basınç değeri artışı, eğilme de olduğu gibi 28. sonra 180. güne kadar sabit ivmeyle artış göstermiştir. Puzolan+akrilik katkılı numune grubu en yüksek basınç değerlerini göstermiştir.

Akgül (2006), “Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi” başlıklı çalışmasında, sönmüş kirecin bağlayıcı, Datça toprağının

ise puzolan olarak kullanıldığı üç ayrı kategoride numune grubu ile çalışmalar yapmıştır. Birinci kategoride numunelerin 6 gün boyunca farklı etüv sıcaklığında; ikinci kategoride sabit dış ortam koşulları altında 7, 28, 90 gün; üçüncü kategoride ise, su içerisinde 7, 28, 91 gün bekletilmesiyle mekanik ve fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre kireç-Datça toprağı karışımıyla elde edilen harcın farklı kür koşulları altında fiziksel ve mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi sonucunda, Datça çevresindeki volkanik tüflerin puzolanik aktivitesinin zamanla arttığı anlaşılmıştır. Su içinde bekletilen numune gruplarından daha yüksek dayanımlar elde edildiğı saptanmıştır. Dış ortam koşullarında zamanla harç numunelerinin yüzeyinde dökülme ve kırılmalar görülmüştür. Bir hafta süreyle etüvde kürlen numuneler de ise, sıcaklığın artışına paralel olarak dayanımda yükselme belirlenmiştir.

Sonuçta, Datça toprağının tarihi binaların onarımında veya çevre yapıların üretiminde kullanılmak üzere yüksek mukavemetli harç, sıva ve hafif yapı tuğlası gibi yapı malzemeleri olarak değerlendirilebileceğı kanaatine varılmıştır.

2.4.1. Perlitin puzolanik aktivitesinin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar

Bu bölümde, ham perlitin (genleştirilmemiş) puzolanik aktivitesini konu alan literatür çalışmaları ele alınmıştır.

Bulgu (2003), “Perlitin çimentoda puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilirliği” başlıklı çalışmasında, Manisa Yundağı yöresine ait İzmir Cumaovası Etibank Perlit İşletmeleri’nden elde edilen ham perlit, % 5-10-15-20-25-30 oranlarında çimento katkısı olarak kullandığı numuneler üretmiştir. Yaptığı deneylerde bu numuneler ile elde ettiği değerleri, PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5 numuneleri değerler ile karşılaştırmıştır. Çalışmanın özeti şöyledir:

Çimento üretiminde klinker ile öğütülerek kullanılan perlit katkısının işçilik, zaman ve ekonomiklik ölçütleri bakımından çimento üretimi sonrası katkı şeklinde eklenmesi önerilmektedir.

Perlit katkılı çimentolarla üretilen harçlarda, perlit oranına paralel olarak standart kıvam için gerekli su miktarında artış saptanmıştır. Perlit katkılı çimentolar ile üretilen harçlarda priz başlangıcı, priz sona erme süresi ve hacim genleşmeleri TS

EN 197-1 (Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri) standardına uygun bulunmuştur. Perlitin öğütülebilirliğinin zorluğu ile karşılaşılmış. Perlit, üretilen çimentoların dane büyüklüğüne olumsuz etkide bulunmuş ve kıyas çimentoları olan PÇ 42,5 ve PKÇ B 32,5'e göre fazla değerler almışlardır. Perlitin özgül ağırlığının düşük olması nedeni ile, katkılı çimentolarda perlit oranı arttıkça özgül ağırlık değerleri de düşmüştür.

Eğilme dayanımlarında 7 ve 28 günlük değerler % 5 ve 10 oranlarında, 90 günlük değerler ise yalnızca % 5 oranında perlit katkılı çimentoda PKÇ B 32,5'e göre olumlu sonuç vermiştir. Basınç dayanımlarında 7 günlük değerler % 5 ve 10 oranlarında, 28 günlük değerler % 5-10 ve 15 oranlarında, 90 günlük değerler de ise % 25 ve 30 oranları hariç PKÇ B 32,5 çimentosuna göre daha yüksek bulunmuştur.

Rötre değerleri için % 5-10-15 ve 20 oranlarında perlit katkılı çimentolarda, kıyas numunelerinden daha düşük bulunmuştur.

Yu ve diğerleri (2003), perlit tozunun çimento harcındaki etkisini araştırmış, farklı değişkenlerle elde edilen basınç dayanımı sonuçlarına göre indis elde etmişlerdir. Perlit inceliği, perlit karışım oranı, su miktarı, ince ve kaba agrega miktarları ve akışkanlaştırıcının değişken olarak alındığı bu çalışmada, 3, 28 ve 91 günlük sürelerde basınç dayanımları kaydedilmiştir. İndis oluşumunda, perlit katkılı harç ile elde edilen dayanım değeri (R_p), perlitin puzolanik etkisiyle dayanımdaki artış değeri (R_m), bu iki değeri oranları ($K = R_m / R_p$) ve perlit katkılı harcın dayanım değerinin, perlitin puzolanik etkisiyle dayanımdaki artış değerine oranı ($P = \%100 \times R_p / R_m$) kullanılmıştır.

28. günde en iyi basınç dayanımını %15 perlit katkılı harç gösterirken, indis parametreleri farklı sonuç gösterdiğinden indis ile karışım oranı arasındaki ilişkinin lineer olmadığı sonucuna varılmıştır. İndis ve basınç dayanımı sonucuna göre, kürleme süresi puzolanik tepkime için etkili bir faktör olmakla olumlu etkide bulunmaktadır.

Perlitin inceliği ile basınç dayanımı ve indis arasında çok net bir ilişkilendirme yapılamamış; en ince değerdeki perlit ile hazırlanan harç en yüksek basınç dayanımını ve de indisi vermemiştir. Ancak, en yüksek basınç dayanımını ve indisi aynı incelikteki perlit ile hazırlanan numuneler vermiştir.

Bu değerlendirmeler sonucunda perlit tozunun imento için iyi bir katkı maddesi olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tanaçan ve Akgl (2005), Datça toprağı ve perlitin puzolanik aktivitesini inceledikleri çalışmalarında, her iki malzemenin de TS 25'te puzolan malzeme için tanımlanan ltleri sağladıklarını bulmuşlar.

90 μ luk elek altında kalan Datça toprağı, perlit ve, su/bağlayıcı oranı 15,46 ve 18,33 olan iki numune grubu ile TS 25'te tanımlı harç üretilmiştir. 50 ve 70 $^{\circ}\text{C}$ lerde 7 ve 14 günlük kürleme sonucunda numunelerin XRF ve XRD analizleri yapılmıştır.

Kür sıcaklığı, süre ve su/agrega oranı üzerinde değişiklikler yaparak sonuçlar gözlenmiştir. Her iki numune grubunun da oda sıcaklığında 7 günlük kürleme sonucunda yeterli dayanım kazanamadığı; kürlenme süresinin dayanım değerlerinde önemli bir etken olduğu; özellikle perlitli numuneler için su/agrega oranının önemli bir parametre olduğu sonuçları ortaya konmuştur.

2.4.2. Değerlendirme

Puzolan çalışmalarının genel olarak amacı iki ana başlıkta toplanmıştır. Bunlardan biri, imento bağlayıcı yapı malzemeleri geliştirilmesidir. Katkılı ve tralı çimentolar için uygun puzolanların tespiti ve elde edilecek çimentoların performans özelliklerinin belirlenmesi bu amaçla yapılan çalışmalar arasında en yaygın olandır. Diğeri, tarihi yapıların restorasyon çalışmalarında, kireç bağlayıcı tamir harcı araştırmalarıdır.

Literatürde, ham perlitin puzolanik özeliği sayesinde imento katkısı olarak kullanılabilirliği konusunda yaygın olmamakla birlikte çalışmalar mevcuttur. Ancak, lkemizdeki perlit rezervleri göz önüne alındığında, yapı malzemesi alanında kullanım olanaklarının araştırılmasının gereği ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışmada ham perlit kullanımı, puzolanik aktivite göstermesi, ekonomik olması, radyoaktif olmaması, genleştirilme amacıyla hazırlanma sürecinin atık ürünü olması dolayısıyla atık değerlendirilmesi gibi etkenler nedeniyle avantajlar sağlamıştır. Diğer yandan, ğtlebilmesinin güçlüğü ham perlit ile çalışmanın dezavantajını oluşturmuştur.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Perlitin puzolanik madde olarak etkinliğinin geliştirilmesinin amaçlandığı bu deneysel çalışma, numune üretimi ve deneylerin yapılması olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, tezin esas bölümünü oluşturan deneysel çalışmanın sağlıklı ve bilimsel olarak yapılmasını sağlayacak koşulların neler olduğu ve bu koşullara bağlı olarak hangi kapsamda, ne tür deneyler yapılması gerektiğinin araştırıldığı ödeneyler yapılmıştır. Ödeney sonuçlarından elde edilen verilerden yararlanılarak perlitin puzolanik aktivitesinin geliştirilmesi yönünde etkili parametrelerin belirlendiği ve etkinlik düzeylerinin değerlendirildiği esas deneyler yapılmıştır.

3.1. Ödeneyler

3.1.1. Perlit-kireç harcı ön deney ilkeleri

Bu çalışmada, kirece hidrolik bir yapı kazandırabilmek, dayanımını artırmak ve daha kısa sürede geç dayanımına ulaşmasını sağlamak amacıyla, ham perlitin puzolanik malzeme olarak kirece katılması ve etkinliğinin araştırılması birinci ilke olarak; ham perlit ile kazanılan bu aktivitenin geliştirilmesi koşullarının araştırılması ise ikinci ilke olarak benimsenmiştir. Bu ilkeler doğrultusunda, geliştirilen malzemenin yapıda harç, sıva ve yapı bloğu olarak değerlendirilebilmesi olanakları araştırılmıştır.

Perlit-kireç harcının puzolanik aktivitesinin geliştirilmesinde etkin faktörlerin belirlenmesi için:

- harcı oluşturan bileşenlerin özellik ve oranlarının;
- harcın kür koşulları ve kür süresinin

etkisinin ve etkinlik düzeyinin araştırılması gerekli görülmüştür. Bu faktörlerin etkilerinin belirlenmesinde, TS 25 standardı uyarınca üretilip kürlenmiş numuneler, (tüm çalışmada “P-55-7” olarak anılacaktır) bu çalışmada “referans numune” olarak kabul edilmiştir.

TS 25 Tras Standardı'nda tanımlı değerlendirme ölçütü olan eğilmede çekme ve basınç dayanımları deneyleri yapılmıştır. Basınç dayanımı dayanım türleri hakkında kalitatif bilgi sağlaması, diğer dayanım türlerinin bulunabilmesi için uygulanan yöntemlerden daha kolay olması gibi nedenlerle önem taşımaktadır.

Taze harcın işlenebilme özelliğinin belirlenmesi için ise, TS EN 12350-5'e göre yayılma tablası deneyi yapılmıştır. Harcın boşluk yapısının belirlenebilmesi için eğilmede çekme ve basınç dayanımları deneyleri öncesinde, numunelerin ultrases geçiş süresi ölçülmüş, ses geçiş hızı belirlenmiştir.

3.1.2. Malzeme ve numune üretimi

Numunelerin üretiminde puzolan olarak ham perlit, bağlayıcı olarak kireç, agrega olarak standart kum, karışım suyu ve numune grubuna göre CaCl_2 ve Na_2SO_4 katkıları kullanılmıştır.

Harç hazırlanırken öncelikli olarak kuru ve daneli yapıdaki kum ile perlit karıştırılmış, ardından daha önce su ile söndürülmüş kaymak kireç ve su eklenmiştir. CaCl_2 katkılı harç üretiminde katkı, harç karışım suyu içinde çözelti haline getirilerek; Na_2SO_4 katkılı harç üretiminde ise katkı karışım işleminin başlangıcında kum ve perlite eklenmiştir. Harç, elektrikli mikser ile 3 dakika karıştırılarak homojen karışım elde edilmiştir.

Referans numunesinin puzolanik etkinliğinin tespit edilmesi için öncelikle TS 25 e göre puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır. Puzolanik aktiviteye sahip olduğu belirlenen perlit ile puzolan harcının niteliğinde etkili olabilecek harç bileşenleri yani perlit, kireç, kum, su ve katkıların karışım miktarı, dane boyutu-incelik, kireç için söndürülmüş olup olmama gibi özellikleri ile kür sıcaklığı, kür süresi etkenlerinin araştırılması amacıyla toplam 20 farklı harç grubu oluşturulmuştur (**Tablo 3.1**). Her bir harç grubu için TS 25 Tras standardında belirtildiği gibi, 40x40x160 mm boyutlarında 3'er adet kare prizma numune hazırlanmıştır. Deney sonuçları için bu 3 numunenin aritmetik ortalaması kabul edilmiştir.

Tablo 3.1: Ön deney programı

Deneyin amacı	Deneyin türü	sıcaklık (°C)	süre (gün)	üretilen numune adedi	
Puzolanik aktivite deneyi	TS 25'te tanımlı harç karışımı	55	7	3	
puzolanik aktivite deneyinde sürenin etkisi			14	3	
			28	3	
Harç bileşenleri tür ve oranlarının puzolanik aktiviteye etkisinin incelenmesi	ağırlıkça %10 perlit eksiltilmesi		7		3
	ağırlıkça %10 perlit artırılması				3
	ağırlıkça %20 perlit artırılması				3
	ağırlıkça %30 perlit artırılması				3
	ağırlıkça %10 su artırılması				3
	ağırlıkça %20 su artırılması				3
	ağırlıkça %10 perlit ve %10 su artırılması				3
	perlitin dane boyutunda küçülme				3
	sönmemiş kireç bağlayıcı				3
	ağırlıkça %2 CaCl ₂ katkısı				3
	ağırlıkça %2 Na ₂ SO ₄ katkısı				3
	ağırlıkça %4 CaCl ₂ katkısı				3
	ağırlıkça %4 Na ₂ SO ₄ katkısı				3
kür koşulları etkisi	TS 25'te tanımlı harç karışımı	23	7	3	
	ağırlıkça %4 CaCl ₂ katkısı			3	
	ağırlıkça %4 Na ₂ SO ₄ katkısı			3	
		kürleme sıcaklığında artış	65	7	3
Toplam	60 numune				

3.1.2.1.Puzolan: perlit

Bu çalışmada puzolan olarak, İzmir Eti Bank Perlit İşletmeleri'nden alınan, /.. -0,6 / 0,6-1,2 / 1,2-2,4 mm ebatlarındaki, genişletilmek amacıyla kırılıp elenmiş ham perlitin üretimi esnasında toz tutma filtrelerinde tutulan yan ürün kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan toz tutma filtresindeki atık durumdaki genişletilmemiş ham

perlitin dane boyutu 0.3 mm olarak belirlenmiştir. Bu perlit laboratuarda 20 saat süreyle bilyeli değirmende, TS 25 standardı uyarınca, 90 µm’luk elek üzerinde en çok %8 kalıntı bırakacak incelikte öğütülerek kullanılmıştır. Perlitin öğütülmesinin güçlüğü, elde edilecek son ürünün oluşum enerjisini (embodied energy) artırması nedeniyle bir dezavantaj oluşturmaktadır. Nitekim **Okucu (1998)**, zeolitik ve perlitik tüflerin puzolanik özelliklerini incelerken yaptığı öğütme deneylerinin kıyaslamasında, “perlitik tüflerde puzolanik aktivite yüksek olmakla beraber, zor öğütülebilmekte” sonucuna varmıştır. Aşağıdaki tabloda, bu çalışmada yapılmış olan 20 dakikalık öğütme sonucunda 3 puzolan türüne ait Blaine değerleri yer almaktadır.

Tablo 3.2: Farklı puzolan örneklerinin öğütülebilme-Blaine özgül yüzey değerleri ilişkisi (Okucu, 1998)

Puzolan grubu	Blaine değerleri
Alt tüf	6800-7000
Turnatepe Perlitik tüfü	4500-4700
Üst tüf	8000-9000

TS 25’e göre puzolan maddenin sağlaması gereken kimyasal ve bu çalışmada puzolan olarak kullanılan perlitin, ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü’nden sağlanmış kimyasal analizi aşağıdaki **Tablo 3.3**’te verilmiştir.

Tablo 3.3: Perlitin kimyasal analizi

	TS 25’e göre puzolanın sağlaması gereken kimyasal içerik	Çalışmada kullanılan perlitin kimyasal içeriği
SiO ₂	Topl. en az %80	% 74,41
Al ₂ O ₃		% 12,60
Fe ₂ O ₃		% 0,80
MgO	En çok % 5,0	-
SO ₃	En çok % 3,0	-
Na ₂ O	-	% 3,08
K ₂ O	-	% 4,40

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü'nde, Philips PW-2404 model dalga boyu dağılımlı X ışını floresan spektrometre cihazı ile yapılan yarı kantitatif (standartsız) element analizi sonucunda perlitten elde edilen sonuçlar **Tablo 3.4**'te yer almaktadır.

Tablo 3.4: Perlitin XRF analizi

% Element		% Bileşik	
Al	8,298	Al ₂ O ₃	15,678
Ba	0,137	BaO	0,153
Ca	0,542	CaO	0,758
Cl	0,170	Cl	0,170
Fe	0,488	Fe ₂ O ₃	0,697
K	3,501	K ₂ O	4,217
Mg	0,188	MgO	0,312
Mn	0,042	MnO ₂	0,067
Na	1,551	Na ₂ O	2,090
Nb	0,001	NbO ₅	0,002
O	49,596		
P	0,027	P ₂ O ₅	0,063
Pb	0,008	PbO	0,009
Rb	0,015	Rb	0,015
S	0,031	SO ₃	0,076
Si	35,319	SiO ₂	75,559
Sr	0,009	SrO	0,011
Th	0,002	ThO ₂	0,002
Ti	0,061	TiO ₂	0,101
Y	0,004	Y ₂ O ₃	0,006
Zn	0,003	ZnO	0,004
Zr	0,008	ZrO ₂	0,011

Malzemenin içerdği CaCO_2 ve organik madde miktarının tespiti amacıyla TS 639'a göre ham perlit için kızdırma kaybı deneyi yapılmış ve değeri **%3.790** olarak bulunmuştur. TS 25'e göre, bu değer en çok %5 olması gerektiğinden; deneyde kullanılan perlitin kızdırma kaybı uygun değerde bulunmuştur.

TS 639'a göre yapılan rutubet kaybı tayini deneyi ile bulunan, 3 numuneye ait değerlerin ortalaması, perlitin içerdği rutubetin **% 0.25** olduğunu göstermiştir ve TS 25'te verilen "en çok %10" değerini sağlamıştır.

Özgül ağırlık tayini öncelikle puzolanik aktivite deneyinde kullanılacak malzeme miktarlarının belirlenmesi amacıyla hesap edilmiştir. Bu amaçla, TS 639'a göre bu araştırmada kullanılan perlitin özgül ağırlığı, su, benzin ve gaz yağı ile olmak üzere 3 kez denenip birbirine yakın bulunmuş olan değerlerin aritmetik ortalaması olarak **2,38 gr/cm³** kabul edilmiştir.

Özgül yüzey (Blaine incelik modülü) tayini, 1 gr malzemenin içindeki tanelerin cm² olarak yüzeylerinin toplamıdır. TS 24'te tariflenen deneye göre, 90 mikronluk elek üstünde %8 kalıntı bırakan dane boyutundaki perlitin özgül yüzeyi 5044 cm²/gr bulunmuş ve standartta verilen en az 3000 cm²/gr olmalı koşulunu sağlamıştır.

TS 25'e göre puzolanda aranacak bazı özellikler ve perlit için bu özelliklerin belirlenmesi amacıyla yapılan deney sonuçları **Tablo 3.5'**te yer almaktadır.

TS 25'e göre, 200 mikron (μm) delik açıklığı bulunan elek üzerinde en çok % 0,6 ve 90 μm delik açıklığı olan elek üzerinde en çok %8 kalıntı bırakmalıdır. Bu çalışmada kullanılan perlitin elek analizinin yapılması için öncelikle perlit numunesi etüvde 105-110 °C de değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş, ardından 212, 125 ve 90 μm 'luk eleklerden geçirilmiştir. Elek analizi sonuçları **Tablo 3.6'**da verilmiştir.

Tablo 3.5: Perlit ile ilgili deneyler ve sonuçları

	ham perlit	TS 25'e göre istenilen değer
kızdırma kaybı	% 3,79	en fazla %5
rutubet kaybı	%0,25	en fazla %10
özgül ağırlık	2,38 gr/cm ³	-
özgül yüzey	5044 cm ² /gr	en az 3000 cm ² /gr

Tablo 3.6: Toz tutma filtresinde elde edilen perlitin elek analizi

Elek No (mikron)	% Elek üstü
212	19,96
125	40,79
90	17,48
-90	21,77
Toplam	100,00

Puzolanik aktivite deneyi için gerekli dane büyüklüğünü sağlamak üzere perlit yaklaşık 20 saat porselen bilyeli değirmende öğütülmüş, sonuçta 90 µ'luk elek üzerinde %8 kalıntı bırakacak dane boyutunda kullanılmıştır.

3.1.2.2.Bağlayıcı: kireç

Bu çalışmada bağlayıcı olarak kullanılan sönmemiş kireç (CaO), Ömerli Lafarge-Entegre fabrikasından sağlanmıştır. Laboratuarda, 1 kg sönmemiş kireç için 2,3 kg su kullanılarak söndürülmüştür. Sönmemiş kirecin su ile karıştırılmasının ardından, karışım kabının ağzı kapatılarak 15 gün süreyle dinlenmeye bırakılmış; ardından kalıntı ve sönmemiş parça olmaması için 600 µm'luk elekten geçirilmiştir. Numune hazırlanmasında, sönmüş kireç içindeki su miktarı tespit edilip, bu miktar, karışıma girecek toplam su miktarından eksiltilmiştir.

Söndürülmüş kirecin özgül ağırlığı TS 639'a göre yapılan deney ile 2.39 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan kirecin kimyasal analizi ise **Tablo 3.7'**de yer almaktadır.

Tablo 3.7: Deneylerde kullanılan kirecin kimyasal özelliği

içerik	SiO ₂	metal oksitler R ₂ O ₃	CO ₂	CaO	MgO	SO ₃
miktar (%)	1	0,5	5	85	1,5	0,8

3.1.2.3.Kum

Bilindiği gibi “ince agrega” olarak kullanılan kum ve karışımdaki oranı, bağlayıcı harçta zamanla kuruma sonucu oluşabilecek rötreyi kontrol altına almak, harcın dayanımını artırmak gibi nedenlerle önemlidir.

Puzolanik aktivite deneyinin tariflendiği TS 25, deneyde kullanılacak kum için TS 819’u referans göstermektedir. Ancak, bu standart yürürlükten kaldırılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, Set Beton Italcementi Group ürünü, TS EN 196-1’e uygun standart kum kullanılmıştır. Söz konusu kumun kimyasal analizi ve elek analizi **Tablo 3.8** ve **3.9**’da verilmiştir.

Kumun özgül ağırlığı TS 639’a göre yapılan deney ile 2.36 gr/cm^3 olarak bulunmuştur.

Tablo 3.8: Standart kumun kimyasal analizi

SiO ₂ (%)	92,1
Al ₂ O ₃ (%)	2,02
Fe ₂ O ₃ (%)	0,43
CaO (%)	0,2
MgO (%)	0,03
SO ₃ (%)	0,07
K ₂ O (%)	1,3
Na ₂ O (%)	0,93
Kızdırma Kaybı (%)	0,55

Tablo 3.9: Standart kumun elek analizi

2,00 mm üzeri %	0
1,60 mm üzeri %	9
1,00 mm üzeri %	30
0,5 mm üzeri %	41
0,16 mm üzeri %	17,5
0,08 mm üzeri %	2,5
Toplam	100

3.1.2.4.Karışım suyu

Numunelerin üretiminde zararlı olabilecek organik madde ve madensel tuzlar içermeyen İstanbul şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.2.5.Kimyasal katkıları

Katkı maddelerindeki Na⁺ ve Ca⁺ iyonlarının silis ile tepkime verme eğilimi (afinite) yüksektir. Bu iyonlar, “2.2.4.2. Kimyasal Tepkime” başlığı altında daha

önce anlatıldığı üzere, silis atomunun bağlarının zayıflaması ile oluşan Si (OH)^-_5 ve Si (OH)^-_6 'ların negatif yüklerini nötralize ederek kalsiyum silikatlar oluşturur

Dolayısıyla CaCl_2 ve Na_2SO_4 katkıları, elde edilen harcın mukavemetini artırıcı ve sertleşme süresini hızlandırıcı bir etkiye sahiptir.

Perlitin puzolanik aktivitesinin artırılması amacıyla, (perlit+kireç) miktarı ağırlıkları toplamının %2 ve 4'ü kadar CaCl_2 , yine aynı oranlarda Na_2SO_4 katkıları kullanılarak harçtaki puzolanik aktivitenin ne yönde gelişeceği araştırılmıştır.

3.1.3. Puzolanik aktivite deneyi

Puzolanik malzemelerin söndürülmüş kireçle ve su ile ne ölçüde tepkimeye girebileceği, ne ölçüde bağlayıcılık sağlayabileceği, “puzolanik aktivite” olarak tanımlanmaktadır. Puzolanik aktivite incelenmesinde kullanılacak deneysel yöntemler için, “TS 25 Tras” standardından yararlanılmıştır. TS 25'e göre, puzolanik aktivite deneyi için karışım oranları hesabı **Tablo 3.10**'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Puzolanik aktivite deneyi karışım oranları

	TS 25'te verilen oran	Deney için alınan değer
Sönmüş kireç	150 gr	150 gr
Puzolan	$2 \times 150 \times (\text{puzolan özgül ağırlığı} / \text{sönmüş kirecin özgül ağırlığı})$	$2 \times 150 \times (2,38 / 2,39)$ = 298,99 gr
Standart kum	1350 gr	1350 gr
Su	$0,5 \times (150 + \text{puzolan})$	$0,5 \times (150 + 298,99) = 224,50$ gr

Tablo 3.11: Puzolanik aktivite deneyi sonuçları

	Çekme (N/mm^2)	Basınç (N/mm^2)
TS 25'te belirlenmiş alt limit değerler	1	4
Ön deneylerde elde edilen ortalama değerler	2,99	10,50

Bu karışımla dökülen harç, su kaybını önleme amacıyla kalıbıyla birlikte polietilen bir muhafazaya sarılıp bağıl nem oranının %90 civarında sabitlenmesi sağlanarak 24

saat oda sıcaklığında, ardından 6 gün 55 °C deki etüvde kürlenmiştir. Kürlenme işlemi bitince, etüvden çıkarılıp 4 saat ortam koşullarında bekletilmiş, sonra ultrases hızı değerleri, ardından eğilmede çekme ve basınç dayanımları belirlenmiştir. Yapılan deneyler ve 3'er numuneden alınan ortalama sonuçları ile **Tablo 3.11**'de verilmiştir.

TS 25'te göre puzolanik aktivite değerlendirme kriteri olarak eğilmede çekme ve basınç dayanımları ölçüt olarak değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, 7 günün sonunda eğilmede çekme dayanımı en az 10 kgf/cm² (= 1 N/mm²), basınç dayanımı ise en az 40 kgf/cm² (= 4 N/mm²) olmalıdır. **Tablo 3.11**'de görüldüğü üzere standartta belirlenen alt limit değerler sağlanmıştır.

3.1.4. Pelit-kireç harcının puzolanik aktivitesinde etkin parametrelerin incelenmesi

Perlit-kireç harcının puzolanik aktivite özelliği üzerinde etkin parametreler, harç bileşenleri tür ve oranları, harcın kürlenme sıcaklığı ve kürlenme süresi olmak üzere üç başlıkta ele alınmıştır.

3.1.4.1.Bileşen tür ve oranlarının puzolanik aktivite etkisi

Puzolan harcı bileşenleri perlit, kireç, kum, su ve ayrıca katkı malzemelerinin özellikleri ve karışım oranlarının puzolanik aktiviteye etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Perlit / bağlayıcı oranı etkisi:

Aktivite deneyindeki bileşen miktarları ve oranları üzerinden yola çıkarak, perlit miktarının harç dayanımına etkisini tespit etmek amacıyla, TS 25'teki yani, aktivite tespiti deneyindeki harç bileşen miktarları (**Tablo 3.10**) üzerinden karışımdaki perlitin, perlit ve kireç toplamına ağırlıkça oranları tespit edilmiştir. Buna göre,

$$\frac{m_{perlit}}{m_{perlit} + m_{kireç}} = \%67 \text{ olarak bulunmuştur.} \quad (3.1)$$

Bu karışımdaki harcın perlit miktarı “P67” olarak kodlanmıştır.

Bu durumda karışımdaki perlitin ağırlıkça %10 azaltılması ve %10–20 ve 30 oranlarında artırılması denenmiştir. (**Tablo 3.12**) Bu sırada, perlitin artırılması halinde aynı miktarda kireç azaltılmış; perlitin azaltılması halinde ise, aynı miktarda

kireç artırılarak toplam bağlayıcı (perlit+kireç) hacmi sabit tutulmuştur. Karışımın diğer bileşenleri olan kum ve su ağırlıkları sabit tutulmuştur.

Tablo 3.12: Öndene harçlarındaki perlit miktarları

	harç kodu	sönmüş kireç (gr)	perlit (gr)	standart kum (gr)	su (gr)	$\frac{kireç}{perlit}$	$\frac{m_{perlit}}{m_{perlit}+m_{kireç}}$
ağırlıkça %10 perlit eksilmesi	P60-S50-55-7	179,90	$298,99-(298,99 \times 10/100)$ = 269,10	1350	224,50	1:1,5	%60
referans karışım oranı(TS 25)	P67-S50-55-7	150,00	298,99	1350	224,50	1:2	%67
ağırlıkça %10 perlit artırılması	P73-S50-55-7	120,10	$298,99+(298,99 \times 10/100)$ = 328,89	1350	224,50	1:2,74	%73
ağırlıkça %20 perlit artırılması	P80-S50-55-7	90,20	$298,99+(298,99 \times 20/100)$ = 358,79	1350	224,50	1:4	%80
ağırlıkça %30 perlit artırılması	P87-S50-55-7	60,30	$298,99+(298,99 \times 30/100)$ = 388,69	1350	224,50	1:6,4	%87

Perlitin dane boyutu etkisi:

Puzolanın dane boyutunun küçülmesi, bir diğer deyişle, özgül yüzey değerinin artması tepkimeye giren yüzeyi artırması nedeniyle puzolanik aktiviteyi artırır. Diğer taraftan, blaine özgül yüzeyin artışı için dane boyutunun küçültmesi işleminde gerekli öğütme işine ayrıca zaman ve enerji gerektirmektedir.

Dane boyutunun dayanımdaki etkisinin belirlenmesi amacıyla, puzolanik aktivite deneyinde kullanılan 90µ'luk elek üstünde %8 kalıntı bırakacak perlit (P67) yanı sıra 32µ'luk elek üstünde %8 kalıntı bırakacak büyüklükteki perlit (MP67) ile hazırlanmış harç numuneleri oluşturulmuştur. (**Tablo 3.13**)

Tablo 3.13: Öndene harçlarında farklı dane boyutlarında perlit kullanılması

P67-S50-55-7	90µ'luk elek üstünde %6 kalıntı bırakacak perlit
MP67-S50-55-7	32µ'luk elek üstünde %6 kalıntı bırakacak büyüklükteki perlit

Harç için kullanılan perlitin dane boyutu dışında perlit/bağlayıcı oranı (%67), su miktarı (%50), kür sıcaklığı (55°C) ve kür süresi (7 gün) sabit tutulmuştur.

Su / bağlayıcı oranı etkisi:

Karışım suyu miktarının puzolanik aktivite üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla, öncelikle aktivite deneyindeki su/bağlayıcı ağırlıkça oranı % 50 olarak bulunmuştur:

$$\frac{m_{su}}{m_{perlit} + m_{kireç}} = \%50 \quad (3.2)$$

Bu harcın yoğun plastik kıvamlı olması nedeniyle suyun azaltılması düşünülmemiş, artırılması tercih edilmiştir. Bu amaçla, su miktarı %10 ve 20 oranlarında artırılıp, karışıma katılan diğer bileşenlerde artırma ya da azaltma şeklinde bir değişiklik yapılmamıştır. (**Tablo 3.14**) Bu numune grubu için su / bağlayıcı oranı dışında, perlit/bağlayıcı oranı (67), kür sıcaklığı (55°C) ve kür süresi (7 gün) sabit tutulmuştur.

Tablo 3.14: Öndenev harçlarında farklı su miktarları kullanımı

	harç kodu	sönmüş kireç (gr)	perlit (gr)	standart kum (gr)	su (gr)	$\frac{m_{su}}{m_{perlit} + m_{kireç}}$
esas alınan oran	P67-S50-55-7	150,00	298,99	1350	224,50	%50
ağırlıkça %10 su artırılması	P67-S60-55-7	150,00	298,99	1350	269,40	%60
ağırlıkça %20 su artırılması	P67-S70-55-7	150,00	298,99	1350	314,30	%70

Kireç türünün etkisi:

Bu deney, sönmemiş kirecin (CaO) hidratasyonunu harç içinde gerçekleştirmesi sonucu ortaya çıkan ısı enerjisinin harç üzerindeki, dolayısıyla puzolanik aktivite üzerindeki etkisini gözlemek amacıyla yapılmıştır. Diğer harçlarda kullanılan kirecin söndürülme işleminden önce ayrılan bir miktarı ile bu deney yapılmıştır.

Sönmüş kireçteki CaO ve H₂O miktarı saptanarak aynı miktarda CaO alınması amacıyla aşağıdaki hesaplama yapılmıştır:

Kireç taşının su ile söndürülmesi tepkimesi: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ (2.2)

Bu tepkimedeki molar ağırlıklar hesabı: $[(40+6)] + [(2 \times 1) + 16] \rightarrow 74 \text{ gr.}$

Bu durumda, puzolanik aktivite deneyinde kullanılan 150 gr kireç yaklaşık olarak 2 mol Ca(OH)_2 yani 112 gr CaO ve 36 gr hidratasyon suyu etmektedir.

Harç bileşenleri **Tablo 3.15**'te özetlenmiştir.

Tablo 3.15: Öndeney harçlarında CaO / Ca(OH)_2 kullanımı

Harç kodu	Ca(OH)_2 (gr) (sönmüş kireç)	CaO (gr)	perlit (gr)	standart kum (gr)	su (gr)
P67-S50-55-7	150	-	298,99	1350	224,50
SK-P67-S50-55-7 (sönmemiş kireç ile hazırlanan harç)	-	112	298,99	1350	224,50 + 36 (=hidratasyon suyu)

Kireç taşı formundaki CaO, öğütülerek 212 μ elek altında kalanlar harç için kullanılmıştır. Harç oluşturulurken kum, perlit ve CaO öncelikle karıştırılmış, ardından su eklenmiş ve diğer karışımlarda uygulandığı gibi 3 dakika mikser ile karıştırılmıştır.

Bu harç türü için kirecin söndürülme koşulu dışında, perlit/bağlayıcı oranı (%67), su miktarı (%50), kür sıcaklığı (55°C) ve kür süresi (7 gün) sabit tutulmuştur.

Katkı tür ve oranları etkisi:

Numune harcına eklenecek CaCl_2 ve Na_2SO_4 katkılarının miktarları etkinliklerinin araştırılabilmesi için, harçtaki perlit ve kireç miktarının ağırlıkça toplamalarının %2 ve 4 oranlarının denenmesine karar verilmiştir.

$$\%2 \text{ katkı miktarının belirlenmesinde: } (m_{\text{perlit}} + m_{\text{kireç}}) \times \frac{2}{100} \quad (3.3)$$

$$\%4 \text{ katkı miktarının belirlenmesinde: } (m_{\text{perlit}} + m_{\text{kireç}}) \times \frac{4}{100} \quad (3.4)$$

Bu hesaba göre numune harçlarının türüne göre kullanılan malzeme tür ve miktarları **Tablo 3.16**'da verilmiştir.

Katkı tür ve oranları dışında, perlit/bağlayıcı oranı (%67), su miktarı (%50), kür sıcaklığı (55°C) ve kür süresi (7 gün) sabit tutulmuştur.

Tablo 3.16: Öndeney harçlarında katkı tür ve oranları

Harç kodu	kireç (gr)	perlit (gr)	kum (gr)	su (gr)	katkı (gr) (CaCl ₂)	katkı (gr) (Na ₂ SO ₄)
P67-S50-S5-7 (katkısız)	150,00	298,99	1350,00	224,50	-	-
2C-P67-S5-S50-S5-7 (%2 CaCl ₂ katkılı)	150,00	298,99	1350,00	224,50	8,98	-
4C-P67-S5-S50-S5-7 (%4 CaCl ₂ katkılı)	150,00	298,99	1350,00	224,50	17,96	-
2N-P67-S5-S50-S5-7 (%2 Na ₂ SO ₄ katkılı)	150,00	298,99	1350,00	224,50	-	8,98
4N-P67-S5-S50-S5-7 (%2 Na ₂ SO ₄ katkılı)	150,00	298,99	1350,00	224,50	-	17,96

3.1.4.2.Kür sıcaklığının puzolanik aktiviteye etkisi

Kürleme sıcaklığının aktivasyonu olumlu etkileyebileceği ve ortam sıcaklığında kireç esaslı harçların geç dayanım kazandıkları bilgisiyle, kür sıcaklığının puzolanik aktivite üzerindeki etkisini gözlemek amacıyla, referans numunenin kürlendiği 55°C nin artırılarak 65°C’de kürleme yapılmıştır. Öte yandan, puzolanik tepkime ile birlikte karbonatlaşmanın harçlar üzerindeki etkisinin gözlenmesi ve üretimde oluşum enerjisinin en aza indirgenmesi gerekçeleriyle, 23 °C’de ortam koşullarında kürleme yapılmıştır (**Tablo 3.17**). Bu numune gruplarında sıcaklık haricinde perlit-kireç oranı (%67), su oranı (%50), kür süresi (7 gün) sabit tutulmuştur.

Tablo 3.17: Öndeney harçlarının farklı sıcaklıklarda kürlenmesi

P67-S50-S5-7	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 55°C ‘de 7 gün
P67-S50-65-7	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 65°C ‘de 7 gün
P67-S50-23-7	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 23°C ‘de 7 gün

3.1.4.3.Kür süresinin puzolanik aktiviteye etkisi

Kür süresinin puzolanik aktiviteye etkisinin gözlenmesi amacıyla, puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harçtan, 55°C ‘de 7-14 ve 28 er gün kürlenmek üzere 3’er numune hazırlanmıştır. (**Tablo 3.18**) Bu numune gruplarında sıcaklık (55°C) perlit-kireç oranı (%67), su oranı (%50) olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 3.18: Öndenev harçlarında kür süresi etkisinin incelenmesi

P67-S50-55-7	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 55°C 'de 7 gün
P67-S50-55-14	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 55°C 'de 14 gün
P67-S50-55-28	puzolanik aktivite deneyi için hazırlanan harç, 55°C 'de 28 gün

3.1.5. Ön deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Perlitin puzolanik aktivitesinin kanıtlanması ve geliştirilebilmesi ile ilgili yapılan ön deneyler ve sonuçları **Tablo 3.19**'da özetlenmiş, ayrıca **Şekil 3.1**'de basınç, **Şekil 3.2**'de eğilme ve **Şekil 3.3**'te ultrases geçiş hızı sonuçları grafiklerle sunulmuştur. Sonuç, harç bileşenlerinin tür ve oranlarının, kür sıcaklığının ve kür süresinin puzolanik aktiviteye etkisi ölçütleriyle değerlendirilmiştir.

Harç bileşenlerinin tür ve oranlarının puzolanik aktiviteye etkisi:

- Farklı [Puzolan / (Bağlayıcı + Puzolan)] oranlarından en yüksek basınç dayanım değerini P-S50-55-7 kodlu ve perlit oranı %67 olan numune grubu vermiştir. Bu oranda, puzolanik tepkimeye giren perlitteki amorf silis ile kireçteki kalsiyumun, harç bünyesinde C-S-H ve C-H-A yapılarını oluşturduğu söylenebilir. Perlit oranının %67'ye göre artırılıp eksiltilmesi basınç dayanımında her hangi bir gelişme yaratmamıştır.

Öte yandan, en yüksek basınç dayanımını veren referans numunenin eğilme dayanımı diğerleri içerisinde en düşük olanıdır.

En yüksek ultrases geçiş hızı, basınç dayanımında olduğu gibi % 67 perlit oranı içeren referans numunesine aittir. Burada da, perlit oranının artırılması veya eksiltilmesi ultrases geçiş hızında basınç dayanımı değerlerine paralel bir değişime neden olmaktadır.

Puzolanın dane boyutunun küçüklüğü tepkimeye giren yüzeyi artırması nedeniyle dayanımda artış sağlamıştır. 32 μ luk elek üstünde % 8 kalıntı bırakacak incelikteki perlit, 90 μ luk elek üstünde %8 kalıntı bırakacak incelikteki perlite kıyasla basınç dayanımında yaklaşık %17, eğilme dayanımında %55, ses geçiş hızında %0,9 artış sağlamıştır. Ancak, perlitin öğütülmesi için gerekli enerji ve zaman göz önüne alındığında, çalışmanın

Tablo 3.19: Öndeney sonuçları

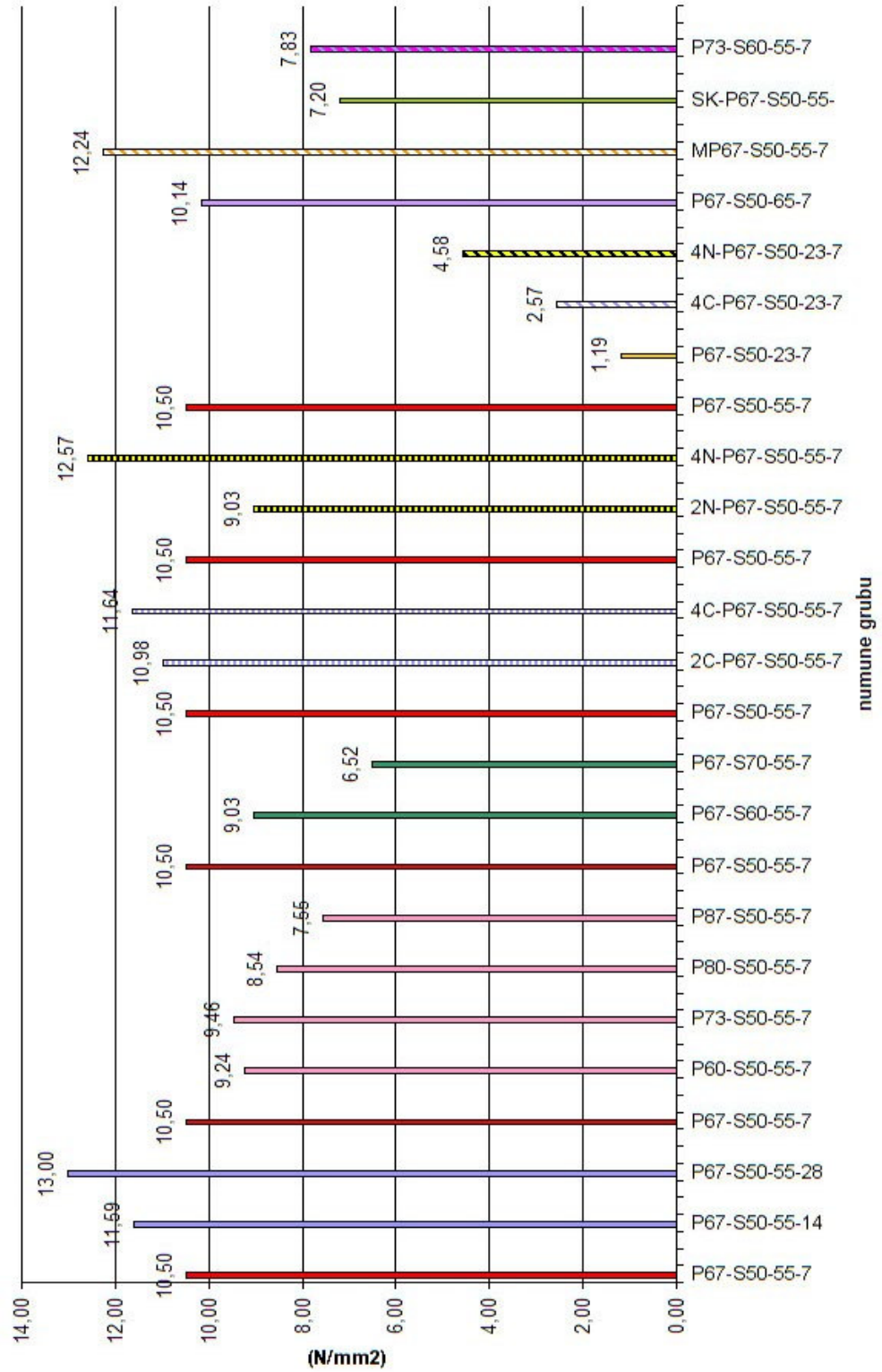
sıcaklık (°C)	numune grupları	süre (gün)	karışım	no	ses geçiş hızı (km/sn)	ses geçiş hızı ort. (km/sn)	eğilme	eğilme dayanımı	ort. eğilme dayanımı (N/mm ²)	basınç	basınç dayanımı	ort. basınç dayanımı (N/mm ²)
55	TS25'te tanımlı karışım	7	P67-S50-55-7	1	3,19	3,21	780	1,54	1,58	18.625	10,50	10,50
				2	3,20		720	1,45		18.375	10,49	
				3	3,23		820	1,62		18.525	10,50	
		14	P67-S50-55-14	1	3,21	3,18	870	1,82	1,80	19.600	11,43	11,59
				2	3,16		850	1,80		19.950	11,81	
				3	3,17		850	1,77		19.600	11,52	
		28	P67-S50-55-28	1	2,92	3,03	1.020	2,20	2,13	22.100	13,15	13,00
				2	3,09		975	2,03		21.075	12,32	
				3	3,09		1.015	2,17		22.900	13,54	
	ağırlıkça %10 perlit eksiltmesi	7	P60-S50-55-7	1	2,83	2,81	785	1,74	1,73	15.675	9,36	9,24
				2	2,79		785	1,76		14.950	8,95	
				3	2,82		750	1,67		15.800	9,40	
	ağırlıkça %10 perlit artışı	7	P73-S50-55-7	1	3,15	3,15	775	1,67	1,86	16.025	9,56	9,46
				2	3,16		840	1,84		15.050	9,05	
				3	3,15		970	2,07		16.450	9,77	
	ağırlıkça %20 perlit artışı	7	P80-S50-55-7	1	3,16	3,13	955	1,92	2,05	14.805	8,39	8,54
				2	3,03		1.000	2,04		15.125	8,72	
				3	3,21		1.040	2,19		14.463	8,49	
	ağırlıkça %30 perlit artışı	7	P87-S50-55-7	1	2,86	2,88	640	1,38	1,39	11.650	6,91	7,55
				2	2,92		770	1,66		14.625	8,69	
				3	2,87		500	1,12		11.525	7,04	
	ağırlıkça %10 su artışı	7	P67-S60-55-7	1	2,92	3,03	710	1,53	1,51	15.240	9,09	9,03
				2	3,09		700	1,51		15.775	9,43	
				3	3,08		690	1,50		14.290	8,57	
	ağırlıkça %20 su artışı	7	P67-S70-55-7	1	2,86	2,87	675	1,48	1,45	11.275	6,81	6,52
				2	2,88		820	1,76		10.900	6,51	
				3	2,86		520	1,11		10.550	6,24	
	ağırlıkça %10 perlit ve %10 su artışı	7	P73-S60-55-7	1	2,86	2,87	690	1,54	1,55	12.525	7,53	7,83
				2	2,87		750	1,67		13.050	7,75	
				3	2,87		650	1,43		13.875	8,22	
	perlitin dane boyutunda küçülme	7	MP67-S50-55-7	1	3,17	3,18	1.280	2,56	2,39	21.500	12,21	12,24
				2	3,15		1.200	2,32		20.800	11,65	
				3	3,22		1.140	2,30		22.450	12,87	
	sönmemiş kireç bağlayıcı	7	SK-P67-S50-55-7	1	2,91	2,93	650	1,41	1,61	12.400	7,25	7,20
				2	2,86		750	1,65		12.675	7,50	
				3	3,02		850	1,77		11.900	6,84	
	ağırlıkça %2 CaCl ₂ katkısı	7	2C-P67-S50-55-7	1	2,96	2,92	920	2,04	1,83	18.675	11,06	10,98
				2	2,91		840	1,84		18.225	10,72	
				3	2,90		750	1,61		19.125	11,16	
	ağırlıkça %2 Na ₂ SO ₄ katkısı	7	2N-P67-S50-55-7	1	2,81	2,80	750	1,67	1,71	15.125	8,99	9,03
				2	2,81		790	1,70		15.350	8,95	
				3	2,76		790	1,76		15.300	9,13	
	ağırlıkça %4 CaCl ₂ katkısı	7	4C-P67-S50-55-7	1	3,28	3,25	940	1,95	2,09	17.750	10,32	11,64
				2	3,21		1.100	2,28		21.300	12,47	
				3	3,27		960	2,03		20.600	12,14	
	ağırlıkça %4 Na ₂ SO ₄ katkısı	7	4N-P67-S50-55-7	1	3,32	3,40	1.340	2,87	2,72	21.600	12,85	12,57
				2	3,47		1.360	2,83		21.100	12,35	
				3	3,40		1.200	2,47		21.450	12,51	
23	ortam sıcaklığında kürlenme	7	P67-S50-23-7	1	1,26	1,27	65	0,15	0,16	2.055	1,26	1,19
				2	1,27		70	0,16		1.710	1,05	
				3	1,27		75	0,17		2.065	1,26	
	ağırlıkça %4 CaCl ₂ katkısı	7	4C-P67-S50-23-7	1	1,56	1,61	210	0,49	0,49	4.220	2,63	2,57
				2	1,61		210	0,49		4.010	2,50	
				3	1,67		210	0,48		4.225	2,57	
	ağırlıkça %4 Na ₂ SO ₄ katkısı	7	4N-P67-S50-23-7	1	2,26	2,21	510	1,16	1,05	7.835	4,71	4,58
				2	2,17		380	0,90		7.080	4,42	
				3	2,20		480	1,10		7.545	4,59	
65	kürlenme sıcaklığında artış	7	P67-S50-65-7	1	3,27	3,27	1.000	2,00	1,75	18.175	10,38	10,14
				2	3,27		840	1,72		18.150	10,56	
				3	3,27		740	1,53		16.250	9,48	

90µ luk elek üstünde % 8 kalıntı bırakacak incelikteki perlit ile sürdürülmesine karar verilmiştir.

Dolayısıyla çalışmaların [Puzolan / (Bağlayıcı + Puzolan)] oranının %67 olarak sürdürülmesi kararlaştırılmıştır.

Farklı (Su/ bağlayıcı) oranlarının harcın puzolanik aktivitesi üzerindeki etkisinin araştırılmasında, ağırlıkça %50 oranında su katılarak elde edilen referans numune harcının işlenebilir ve kuru plastik kıvamda (%20-%60) (Erdoğan, 2003) olması nedeniyle su oranının azaltılması düşünülmemiştir. Harç suyu miktarının % 10 ve % 20 oranında artırılması denendiğinde ise kıvam akıcılığa doğru gelişmiştir ve harç numunesi bünyesindeki suyun kuruması sonucunda numune kesitinde boşluklu yapının gittikçe arttığı, dolayısıyla ultrases hızı geçiş süresinin uzadığı, eğilme-basınç dayanımlarının da düştüğü belirlenmiştir. Bu değerler göz önüne alınarak çalışmada harç suyu oranının referans numunedeki oran olan %50 olarak alınmasına karar verilmiştir.

- Su oranın %10 artırılması ile elde edilen akıcı kıvamdaki harcın Puzolan katkısı ile plastik bir yapıya dönüştürülebilmesi ve harçtaki ses geçiş hızı ve basınç dayanımı gibi özelliklerin ne yönde değişeceğini gözlemek amacıyla üretilen bir grup (P73-S60-55-7) numune üzerinde yapılan deneylerde yine sözkonusu özelliklerin düştüğü gözlenmiştir. Dolayısıyla buradaki bulgular da çalışmada kullanılan su ve perlit oranının sırasıyla %50 ve % 67 olmasını destekler niteliktedir.
- Sönmemiş kirecin harcın oluşturulması sırasında karışıma katılarak harç içinde ısı vererek hidrasyon oluşturmalarının harcın puzolanik aktivitesi üzerindeki etkisinin araştırıldığı bu ön deney grubunda (SK-P67-55-7) eğilme dayanımı deneyi sonucunda kırılan numune kesitinde görülen 1-2 mm çapındaki topaklanmalardan kireç parçalarının harcın karıştırılması sürecinde yeterince ve tamamıyla hidrate olamadığı anlaşılmıştır. Bunun sonucunda, bu grup numuneye ait deney sonuçları sönmemiş kireçle hazırlanan numunelere kıyasla daha düşük değerler almıştır.



Şekil 3.1: Ön deney basınç dayanımı sonuçları

- Katkı maddeleri olan kalsiyum klorür (CaCl_2) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) ın %2 ve %4 oranlarında kullanılmasıyla referans numuneye kıyasla daha plastik bir kıvamda taze harç elde edilmiştir.

Kalsiyum klorür katkısı her iki oranda da referans numuneye nazaran basınç dayanımını gittikçe artırırken; sodyum sülfat katkısı %2 katkı oranında basınç dayanımını düşürmüş, ancak %4 katkı oranında ön deney grubu kapsamında üretilen aynı kür sıcaklığı ve kür süresinde en yüksek değerin elde edilmesini sağlamıştır. Ultrases hızında da basınç dayanımındaki değişimlere koşut sonuçlar elde edilmiştir.

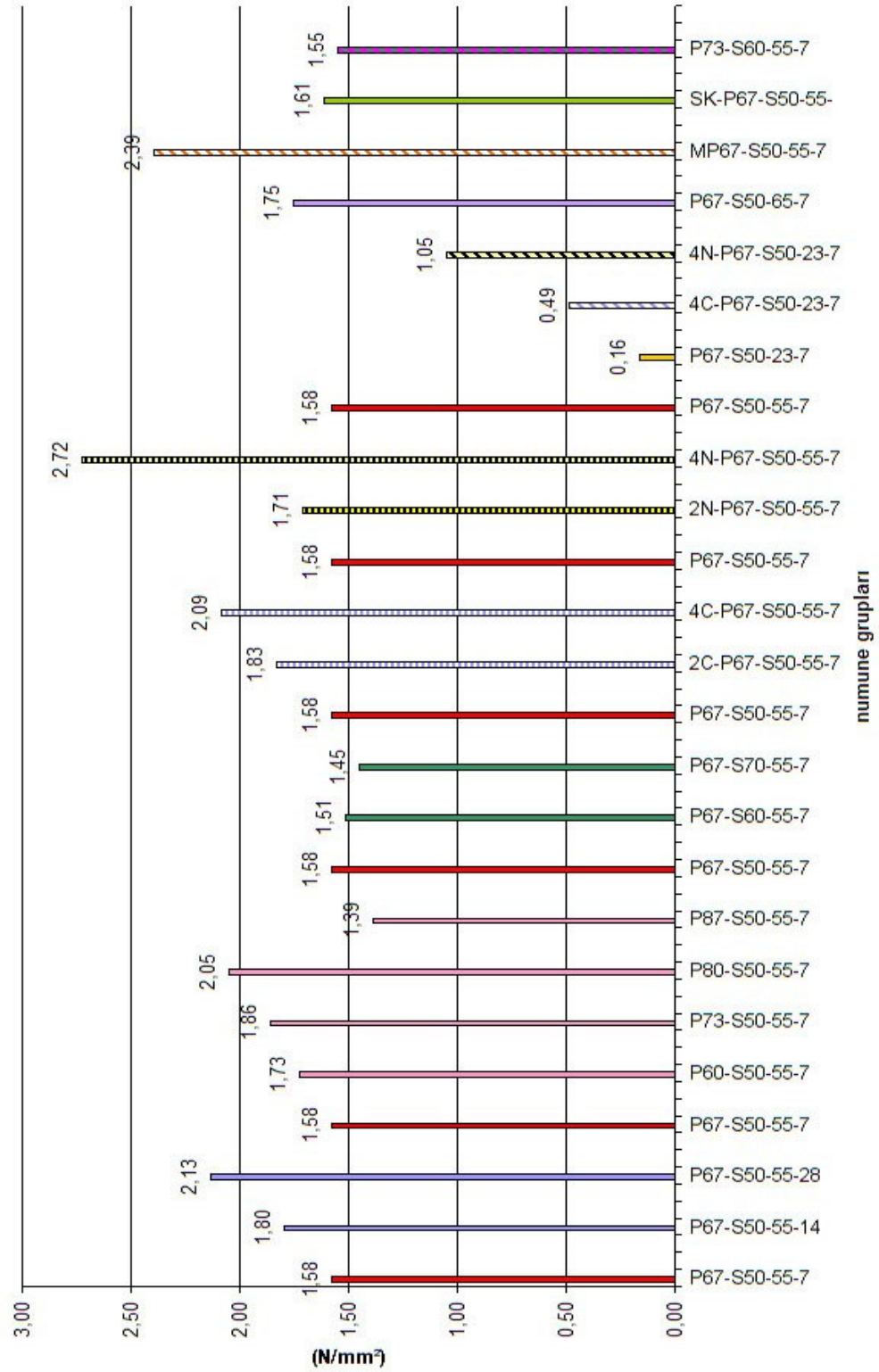
Bu bilgiler sonucunda deneylerde katkıların %4 oranında kullanılması ile farklı süre ve kürleme koşullarında elde edilecek neticenin araştırılması kararlaştırılmıştır.

Kür sıcaklığının puzolanik aktiviteye etkisi:

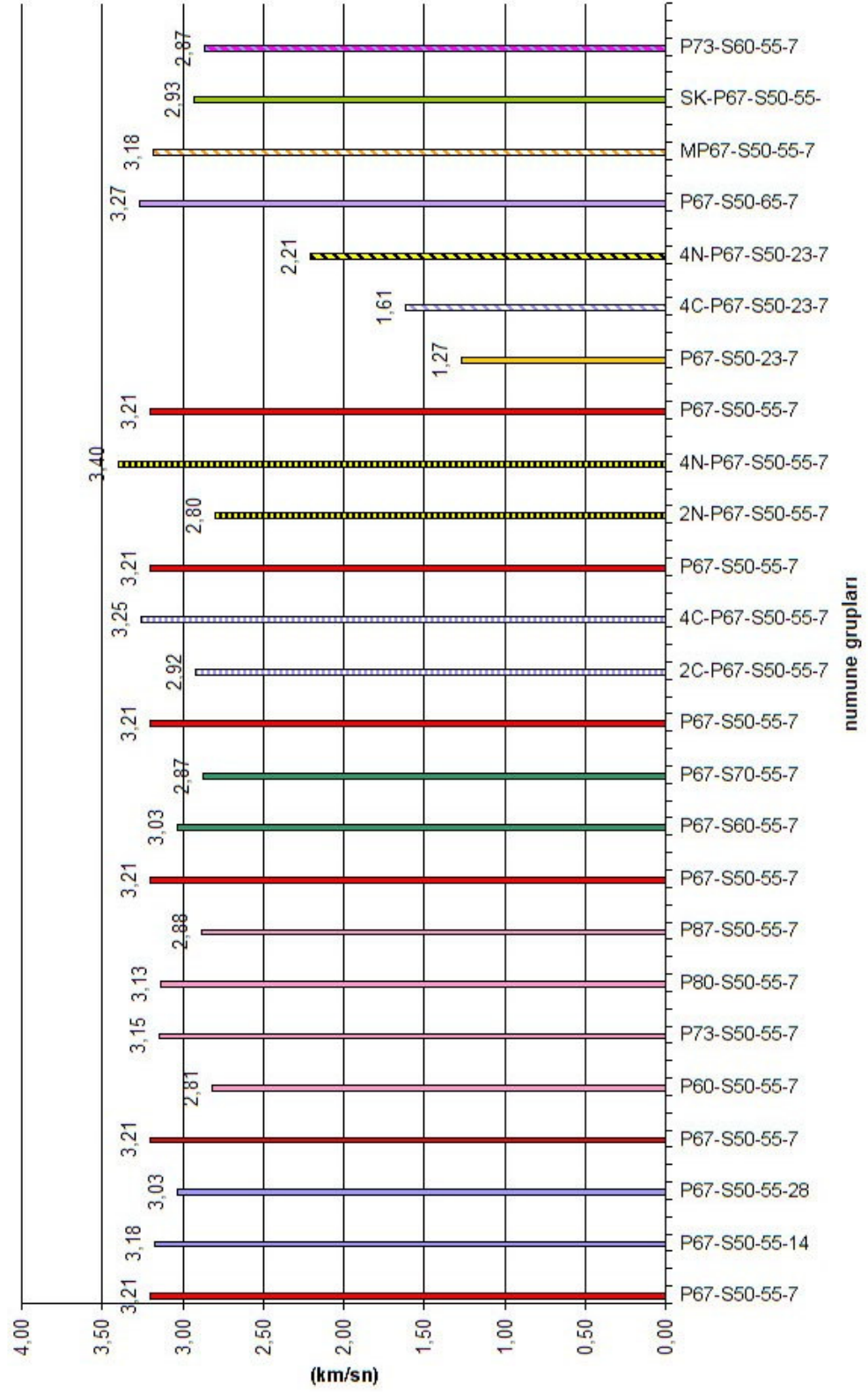
- Puzolanik tepkime ile birlikte karbonatlaşmanın harçlar üzerindeki etkisinin gözlenmesi ve üretimde oluşum enerjisinin en aza indirgenmesi nedenleriyle, 23°C de ortam koşullarında bekletilmiş; numunelerin mekanik dayanım için TS 25'te tanımlı alt sınır değerleri sağlayamadığı belirlenmiştir. Ancak, ortam koşullarında kürlemenin ne kadar bir sürede yeterli değere ulaşacağı, yani kürleme süresinin etkisi ve katkıların bu sürelerdeki tesirinin araştırılması gerekli görülmüştür.
- 65°C'de kürlen numuneler, tüm ön deney numuneleri içinde en yüksek ultrases geçiş hızını vermiştir. Buna karşın, dayanım değerlerinde referans numuneye kıyasla artış eğilimi görülmemiştir. Dolayısıyla, kür sıcaklığının artırılması gerekli görülmemiştir.

Kür süresinin puzolanik aktiviteye etkisi:

- Harç numunelerinin kür sürelerinin artışıyla dayanım değerlerinde belirlenen artış nedeniyle puzolanik tepkimenin 28. güne kadar sürdüğü sonucuna varılmıştır. Sürenin puzolanik tepkimede etkili bir parametre olmasından hareketle, daha uzun süreler ile (91. gün) dayanımın gelişim seyrinin belirlenmesi gerekli görülmüştür.



Şekil 3.2: Ön deney eğilme dayanımı sonuçları



Şekil 3.3: Öndeney ultrases hızı sonuçları

3.2. Deneyler

Perlit-kireç karışımının yapı malzemesi olarak kullanım olanaklarının araştırılması amacıyla yapılan ön deneylerde en başarılı sonuçları, (p/p+b) oranı %67, (su/ p+b) oranı %50, kürlenme sıcaklığı 55 °C olan referans numunesinin verdiği görülmüş; ayrıca kür süresinin artırılmasıyla dayanımın yükseldiği belirlenmiştir. Bu bileşen oranlarıyla hazırlanan harca %4 oranında kalsiyum klorür katılarak bir seri üretilmesi ve ayrıca %4 oranında sodyum sülfat katılarak ayrı bir seri üretilmesiyle aynı kürlenme koşullarında referans numuneye nazaran daha yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir.

Diğer yandan, 23°C’de kürlenlen numunelerde TS 25’te alt limit olarak belirlenmiş değerlere ulaşılammış, ancak katkılarla dayanım değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Bu durumda, bu kür sıcaklığında da puzolanik aktivitenin geliştirilmesi koşullarının aranması gerekli görülmüştür.

Bu durumda deneysel çalışmada:

- deney programı çerçevesinde üretilen numuneleri oluşturan kireç, perlit, kum ve su gibi harç bileşenlerinin yukarıda sözü edilen miktarlarda sabit tutulmasına,
- katkının kullanılması halinde katkı oranının %4 olmasına

karar verildikten sonra;

- harca katılan katkı türünün,
- kürlenme sıcaklığının ve
- kürlenme süresinin

üretilen referans numunenin puzolanik aktivitesini ne düzeyde geliştirdiğinin araştırılmasına karar verilmiştir.

Tablo 3.20’de yeralan deney programında görüldüğü gibi, 55 ve 23°C’lerde, katkısız, kalsiyum klorür (CaCl_2) katkılı ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) katkılı olmak üzere 2x3=6 harç grubu oluşturulmuştur. Üretilen bu harç grupları üzerinde kür süresinin etkisini belirlemek amacıyla numunelerin 7-28-91 gün sonundaki davranışları çeşitli deneylerle tespit edilmiştir. Tablo 3.20’de verilen yapılması

gerekli görülmüş deneyler göz önüne alındığında, 6 harç grubunun 7-28 ve 91 günlük süreleri için 12’şer numune üretilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Dolayısıyla üretilecek toplam numune sayısı: $(2 \times 3) \times (3 \times 12) = 216$ olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.20: Deney Programı

kür sıcaklığı (°C)		katkı türleri	numune kodu	şüre (gün)	6' şar numune										3'er numune			3'er numune		
					taze harç-birim hacim ağırlığı	taze harç-yayılma deneyi	birimhacim ağırlığı	porozite-kompasite	ultrases hızı	eğilme	basınç	özgül ağırlık	DTA TG	XRD	kılcallık	su emme	donma çözülme	rötre	arşiv	
23	Katkısız	P-23-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●		
		P-23-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		P-23-91	91			●		●	●	●					●	●	●			
	%4 Na2SO4	4C-23-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	
		4C-23-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		4C-23-91	91			●		●	●	●					●	●	●			
	%4 CaCl2	4N-23-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	
		4N-23-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		4N-23-91	91			●		●	●	●					●	●	●			
55	Katkısız	P-55-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	
		P-55-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		P-55-91	91			●		●	●	●				●	●	●	●	●		
	%4 Na2SO4	4N-55-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	
		4N-55-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		4N-55-91	91			●		●	●	●					●	●	●			
	%4 CaCl2	4C-55-7	7	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	●	●	
		4C-55-28	28			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●		●
		4C-55-91	91			●		●	●	●					●	●	●			

Numuneler (XX-XX-XX) şeklinde kodlanmıştır. Burada ilk simge grubu sırasıyla katkı oranı ve katkı cinsini, ikinci simge grubu kür sıcaklığını, üçüncü simge grubu ise kürlenme süresini göstermektedir. Örneğin, 4N-55-7 kodlamasında “4” katkı yüzdesini, “N” katkı cinsi olan sodyum sülfatı, “55” kürlenme sıcaklık derecesini, “7” ise kür süresini ifade etmektedir.

Numuneler üzerinde yapılan deneyler, taze harç deneyleri ile sertleşmiş harç deneyleri olmak üzere 2 grupta toplanmaktadır. Taze harçların kıvamı ve birim

hacim ağırlığı saptanmıştır. Sertleşmiş numunelerin üzerinde ise; Birim hacim ağırlık, Özgül ağırlık, Rötire, Porozite, Kapiler su emme katsayısı, Atmosfer basıncı altında su emicilik, Buhar geçirgenlik direnci ve Donma çözülme dayanımı deneyleri yanısıra basınç, eğilme, ultrases hızı ve Statik Elastisite Modülü deneyleri yapılmıştır. Sertleşmesini öngörülen program çerçevesinde tamamlayan bir grup numunedeki aktivite gelişimi ise Minerolojik deneyler yardımıyla gözlenmiştir. Bu deneyler, X ışınları difraktometrisi (XRD), Diferansiyel Termal Analiz ve Termogravimetrik Analiz (DTA-TG) dir.

3.2.1. Taze harç deneyleri

Harçların priz ve kürlleme aşamasından önceki durumlarında yapılan, birim hacim ağırlığı ve akıcılık deneylerini içermektedir.

Taze harç numuneleri, kürlleme sıcaklığı ve süre kriterlerinden bağımsız olduklarından, katkısız (P), kalsiyum klorür katkılı (4C) ve sodyum sülfat katkılı (4N) olarak üç farklı tür üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Birim hacim ağırlığı deneyi:

Birim hacim ağırlığı için hacim ve darası belli olan bir kap içine taze harç şişle yerleştirildikten sonra tartılmış; bulunan net ağırlığın kap hacmine oranı, birim hacim ağırlık olarak belirlenir. Birim hacim deneyi sonuçları Ek **TabloA.1**'de verilmiştir.

Kıvam deneyi:

Taze harçlardaki kıvam (akıcılık, yayılma) deneyi ile harcın işlenebilme ve akıcılığı dolayısıyla aderansına dair bilgiler edinilmesi amaçlanmıştır. Kıvam deneyi, harcın kıvamını ve segregasyon yapma (ayrışma) eğilimini ölçmek için uygulanan bir deneydir; “sarsma tablası deneyi” olarak bilinir. Kıvam deneyi, TS EN 12350-2 Beton-Taze Beton Deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi’nde tariflenmiştir. Buna göre, harç türlerinin kıvam değerleri Ek **Tablo A.1**'de verilmiştir.

3.2.2. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler

Fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla, birim hacim ağırlığı ve özgül ağırlık, bu iki deney verileri kullanılarak porozite ve kompasite değerleri bulunmuş; rötire, buhar geçirgenlik, kapiler su emme, su emme ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır.

3.2.2.1.Birim hacim ağırlığı ve sonuçları

Birim hacim ağırlığının tespitinde her bir numune grubu için, üretilmiş 12 numuneden ölçümler kullanılmıştır. Bu ölçümlere göre katkısız, %4 CaCl₂ katkılı ve %4 Na₂SO₄ katkılı olmak üzere üç harç tipinin 23 ve 55 °C lerde 7-28 ve 91 gün sonucunda ulaştıkları birim hacim değerleri **Tablo 3.21**'de sunulmuştur.

Tablo 3.21: Taze harç deneyleri ve birim hacim ağırlığı, özgül ağırlık, porozite-kompasite sonuçları

numune grubu	taze harç birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)	taze harç kıvamı (%)	birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)	özgül ağırlık (gr/cm ³)	komposite oranı (%)	porozite oranı (%)
P-23-7	2,02	43	1,93	2,36	82	18
P-23-28			1,93	2,35	82	18
P-23-91			1,93	2,34	82	18
4C-23-7	2,06	47	1,97	2,41	82	18
4C-23-28			1,95	2,32	84	16
4C-23-91			1,95	2,29	85	15
4N-23-7	2,04	51	1,98	2,26	88	12
4N-23-28			1,95	2,32	84	16
4N-23-91			1,95	2,33	84	16
P-55-7	2,02	43	2,00	2,22	90	10
P-55-28			2,00	2,27	88	12
P-55-91			1,89	2,35	80	20
4C-55-7	2,06	47	2,03	2,24	91	09
4C-55-28			2,02	2,20	92	08
4C-55-91			1,89	2,35	80	20
4N-55-7	2,04	51	2,03	2,21	92	08
4N-55-28			2,04	2,24	91	09
4N-55-91			1,89	2,35	80	20

3.2.2.2.Özgül ağırlık ve sonuçları

Özgül ağırlık deneyi, TS 699'a göre, katkısız (P), kalsiyum klorür katkılı (4C) ve sodyum sülfat katkılı (4N) olarak üç farklı türün 23 ve 55 °C lerde kürlenmesiyle oluşan toplam 3 çeşit numunenin 7, 28 ve 91. günlerinde yapılmıştır. Numunelerin özgül ağırlıkları ortalama değerleri **Tablo 3.21**'de sunulmuştur.

3.2.2.3.Porozite ve sonuçları

Gerçek porozite tespitinde, her bir numune grubu için, üretilmiş 12 numuneden ölçümler kullanılarak, TS 699'da verilen hesaplama yöntemine göre hesabedilmiştir. Sonuçlar tablo halinde **Tablo 3.21**'de verilmiştir.

Kapiler su emme katsayısının tespitinde 23 ve 55°C’lerde kürlenmiş katkısız (P), kalsiyum klorür katkılı (4C) ve sodyum sülfat katkılı (4N) toplam 6 harç grubunun 7-28 ve 91 günlük 3’er numune ile ölçümler yapılmıştır. Sonuçlar Ek **Tablo A.1**’de yer almaktadır.

3.2.2.5. Atmosfer basıncı altında su emme deneyi ve sonuçları

Kapiler su emme (kılcallık) deneyinden sonra aynı numunelere TS 699’da tariflenen su emme deneyi uygulanmıştır. Su emme katsayısının tespitinde 23 ve 55°C’lerde kürlenmiş katkısız (P), kalsiyum klorür katkılı (4C) ve sodyum sülfat katkılı (4N) toplam 6 harç grubunun 7-28 ve 91 günlük 3’er numune ile ölçümler yapılmıştır. Sonuçlar, ağırlık yüzdesi olarak su emme ve hacim yüzdesi su emme (görünür porozite) olarak Ek **Tablo A.2**’de yer almaktadır.

3.2.2.6. Buhar geçirgenlik tayini ve sonuçları

Buhar geçirgenlik tayini deneyi için, önceden hazırlanmış ortalama 7 cm çap ve 2 cm kalınlıkta olan dairesel numuneler 55°C de 7 gün kürendikten sonra, değişmez ağırlığa ulaşmaya kadar etüvde kurutulmuştur. Bu numuneler, içine genleştirilmiş polistren ve CaCl₂ doldurulmuş PVC bardakların üzerine yerleştirilmiş ve numune ile bardak arasında kalan dairesel derz, parafin ile doldurulmak suretiyle kapatılmıştır (**Şekil 3.5**). Oluşturulan düzenekler, sıcaklık ve nemin günlük kaydedildiği ortam koşullarında bekletilmiştir. Çalışmada yalnızca 7. gündeki buhar geçirgenlik direnç faktörü incelenmiştir.



Şekil 3.5: Buhar geçirgenlik deney düzeneği

$$\mu = \frac{1}{d_{ort}} \left(\delta \times A \times \frac{P_1 - P_2}{G} - d_h \right) \quad (3.6)$$

$$\delta_h = \frac{0,083}{R_B \times T} \times \frac{P_0}{P} \times \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \quad (3.7)$$

$$G = \frac{F_{ort}}{24} \quad (3.8)$$

d_{ort} (m)	: numune kalınlığı
δ_h (kg/msaatPa)	: havanın su buharı iletkenliği
A (m ²)	: su buharının geçtiği numune yüzey alanı
P_1 ve P_2 (Pa)	: su buhar basınçları
G (kg/saat)	: su buharı geçiş oranı
d_h (m)	: bardak içinde numune altında kalan hava tabakası yüksekliği
$\Psi_{iç}$ ve $\Psi_{dış}$ (%)	: iç ve dış koşulların göreceli nem miktarı
R_B	: su buharı gaz sabiti (462 Nm/kg.K)
T (°K)	: hava sıcaklığı
P_0 (mmHg)	: normal atmosfer basıncı
P (mmHg)	: ortalama hava basıncı (760 mm hg = 1033 cm su sütunu)
F_{ort} (kg)	: numunelerin iki ölçüm arası ağırlık farkları
μ	: buhar difüzyon direnç katsayısı

Buhar geçirgenlik direnç faktörü tespitinde katkısız (P), kalsiyum klorür katkılı (4C) ve sodyum sülfat katkılı (4N) toplam 3 harç grubundan 3'er numune ile toplamda 9 numuneden alınan ölçümler kullanılmıştır. Sonuçlar Ek **Tablo A.3**'te yer almaktadır.

3.2.2.7. Donma-çözülme dayanımı ve sonuçları

TS 699 esas alınarak yapılan bu deney, kılcallık ve su emme deneylerinde kullanılmış olan numuneler üzerine uygulanmıştır. Numunelerin donma-çözülme deneyi sırasındaki gözlenen değişiklikler ve ağırlık değişimleri Ek **Tablo A. 4**'te yer almaktadır. 23°C'de bekletilen numunelerin kolay ve erken dağılmaları nedeniyle, bu deney, 23°C'de 91 gün kürlenmiş numuneler ile gerçekleştirilebilmiştir. 55°C'de numunelerin 7, 28 ve 91. gün sonunda yapılan donma-çözülme deneyi sonuçları ekte sunulmuştur.

3.2.2.8.Rötre ve sonuçları

Rötre ölçümü yapılacak kare prizma şeklindeki numunelerin kare yüzeylerine, harç dökümü sırasında kalıplar yardımıyla birer adet pim yerleştirilmiştir. Numunler dahil oldukları gruplara göre 7 gün kürlendikten ya da 23 °C de bekletildikten sonra, ortalama 24-26°C sıcaklık ve %50-67 nem oranında ortamda bırakılarak, zamanla kuruma sonucunda boylarında meydana gelen rötre (kısılma) belirlenmesi amacıyla ölçümler yapılmıştır. **Akman (1987)**'a göre, rötrenin 5-6 ay sürüyor olması ancak, önemli bölümünü birinci ayda gerçekleştiriyor olması nedeniyle bu çalışmada ölçümler, 1 ay sürdürülmüştür. Ölçüm sonuçları Ek **Tablo A.5**'te sunulmuştur.

3.2.3. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için yapılan deneyler

3.2.3.1.Basınç dayanımı

Basınç dayanımı deneyleri, **Şekil 3.6**'da görülen, MFL System marka deney cihazı kullanılarak TS EN 12390-3 ve TS EN 196-1'e göre, eğilme dayanımı deneyinde kırılan parçalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın yükleme hızı 0,05 kN/sn olarak alınmış ve bütün deneylerde aynı yükleme hızı kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Basınç dayanımı ölçümü



Şekil 3.7: Eğilme dayanımı ölçümü

7, 28 ve 91 günlük basınç dayanımı değerleri belirlenmesinde, eğilme dayanımı ölçümü sonrasında 2'ye ayrılan 6 numune, dolayısıyla 12 numune ile ölçüm yapılmıştır. Deney numuneleri kırıldıktan sonra alınan ölçümlerin standart sapması bulunmuş ve sapma değerini aşan değerler elenerek ortalama değer elde edilmiştir. Sonuçlar Ek **Tablo A.6**'da yer almaktadır.

3.2.3.2.Eğilme dayanımı

Eğilme dayanımı deneyleri, **Şekil 3.7**'de görüldüğü üzere, basınç dayanımı ölçümünde kullanılan makinenin başlığı değiştirilerek, TS EN 12390-5 ve TS EN 196-1'e göre, 7, 28 ve 91. günlerde gerçekleştirilmiştir. Cihazın yükleme hızı 0,05 kN/sn olarak alınmış ve bütün deneylerde aynı yükleme hızı kullanılmıştır. Her harç grubu için 6 adet deney numunesi kırılarak, ölçümlerin standart sapması bulunmuş ve sapma değerini aşan değerler elenerek ortalama değer elde edilmiştir. Sonuçlar Ek **Tablo A. 6**'da yer almaktadır.

3.2.3.3.Ultras es hızı ve elastiklik modülü

Ultras es hızı deneyi ölçümlerinde **Şekil 3.8**'de görülen, WTW-DIGI EG-c2 model cihaz kullanılmıştır. Deneyde, iki adet “prob” denilen piezoelektrik transduser, cismin karşılıklı yüzeyine veya aynı yüzeyin birbirinden belirli uzaklıktaki noktalarına yerleştirilmiş; probların birinden gönderilen ses dalgaları diğerinden alınmıştır. Ses dalgaların iletim süresi zaman ölçer devre yardımı ile ölçülmüştür.

Ultras es geçiş süresi ve ultras es geçiş hızı yardımıyla teorik olarak hesab ed ilen dinamik elastiklik modülü değerleri Ek **Tablo A.7**'de yer almaktadır.



Şekil 3.8: Ultras es ölçüm cihazı

3.2.4. Mineralojik yapının belirlenmesi için yapılan deneyler

Üretilen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi yanı sıra, mikro yapılarının belirlenmesi amacıyla XRD ve DTA-TG analizleri yapılması gerekli görülmüş, söz konusu deneyler İTÜ Metalürji Fakültesi'nde yapılmıştır.

3.2.4.1. X Işınları difraksiyon testi

X ışınları difraktometresi, numunedeki fazların analizini, bu fazların ve kristal yapılarını saptar, grafik olarak verir. Bu deney, seramik havanda öğütülerek 200µm luk elekten geçebilecek inceliğe getirilmiş numuneler ve Rigaku DMax 2000, (Cobalt $K\alpha$) marka XRD makine ile 5°/ dakika hızda gerçekleştirilmiştir. X ışınları difraktogramları $2\theta = 10-90^\circ$ aralığında kaydedilmiş ve elde edilen verilere göre fazların karakteristik pikleri belirlenmiştir.

Öncelikle, katkısız olarak hazırlanmış ve 55°C de 7, 28 ve 91 gün kürlenmiş numunelerin analizi yapılarak, süreyle mikro yapıdaki gelişim incelenmiştir. Ardından, $CaCl_2$ katkılı ve Na_2SO_4 katkılı 55°C'de 28 gün kürlenmiş numunelerin XRD analizleri yapılarak katkı maddeleriyle faz yapısında ortaya çıkan değişim incelenmiştir.

Ayrıca, numune kürlenme koşullarının faz yapısı üzerinde etkisini gözlemlemek amacıyla, 23°C'de 28 gün kürlenmiş katkısız, $CaCl_2$ katkılı ve Na_2SO_4 katkılı numunelerin XRD analizleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları ile oluşturulan grafikler Ek Şekil B.1, 2, 3, 4 ve 5'te yer almaktadır.

3.2.4.2. Diferansiyel termal analiz - termogravimetrik analiz

DTA analizi, sıcaklık ile numunede hidratasyon sonunda oluşan faz dönüşümü, kristal su kaybı, ergime, parçalanma gibi, her türlü reaksiyondan oluşan sinyallerin incelenmesidir. Bu çalışma ile numune içinde oluşan silikatları ve bağlanan $CaOH_2$ miktarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

DTA analizi için Perkin Elmer DSC Diamond marka cihaz kullanılmış, sıcaklık dakikada 20°C yükseltilmiş ve en yüksek sıcaklık 1000 °C olarak belirlenmiştir. Numuneler, seramik havanda öğütülerek 200µm luk elekten geçebilecek inceliğe getirilmiş; deney için kullanılacak miktarlar eş ağırlıkta ve homojen olmalarına dikkat edilmiştir.

Bu deney için katkısız, $CaCl_2$ katkılı ve Na_2SO_4 katkılı 55°C'de 28 gün kürlenmiş numunelerin de DTA analizleri yapılarak katkı maddeleriyle mikro analizde ortaya çıkan değişim incelenmiştir.

Ayrıca, numune kütleme koşullarının mikro yapı üzerinde etkisini gözlemlemek amacıyla, 23°C’de 28 gün kürlenmiş katkısız, CaCl₂ katkılı ve Na₂SO₄ katkılı numunelerin DTA analizleri yapılmıştır.

Ölçüm sonuçları ile oluşturulan grafikler Ek **Şekil B.6, 7, 8, 9, 10 ve 11**’de yer almaktadır.

4. DENEY SONUÇLARININ PERLİTİN PUZOLANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

Bilindiği gibi yapı malzemelerinin ve buna bağlı olarak yapı elemanlarının temel işlevi, yapılarda istenen bazı konfor ve emniyet şartlarını optimum düzeyde sağlamaktır. Bu ise, düşük kapilarite ve su emme, yüksek don dayanımı ve mukavemet, düşük birim hacim ağırlığı gibi bazı fiziksel özelliklerin gerçekleşmesi ile mümkündür. Çalışmanın bu aşamasında, üçüncü bölümde üretimi anlatılan numune harçları ve deney koşulları ile ortaya çıkan veriler değerlendirilmiştir.

Değerlendirmede, öncelikle taze harç deneyleri, ardından sertleşmiş harçta fiziksel, mekanik ve mikro yapı deneyleri,

- numune harçlarının katkı durumuna,
- numunelerin kürlenme sıcaklığına,
- numunelerin kürlenme sürelerine

göre ele alınmıştır. Diğer yandan, ilke olarak puzolanik aktivite deneyi karışım oran, süre ve sıcaklığındaki numune (P-55-7), referans numunesi olarak kabul edilerek diğer gruplarla kıyaslamalar yapılmıştır.

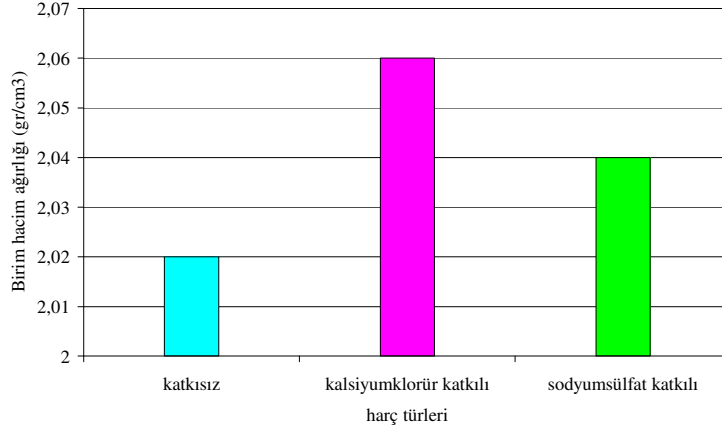
4.1. Taze Harç Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Taze harç deneyleri olarak yapılan birim hacim ağırlık deneyi ve akıcılık deneyi sonuçları **Tablo 4.1**'de yer almaktadır.

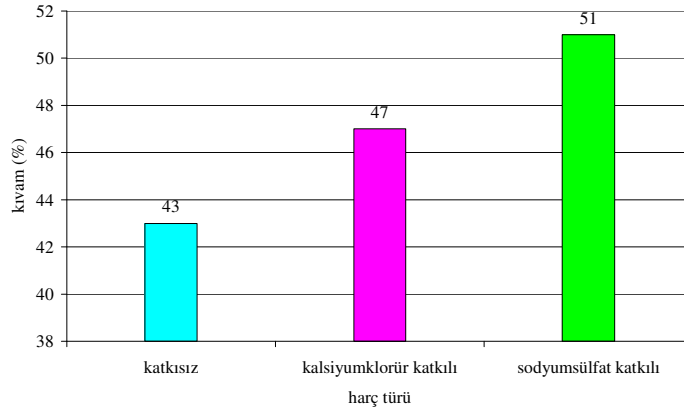
Şekil 4.1'deki grafikte görüldüğü üzere, katkısız harca oranla kalsiyum klorür katkılı harçta %2; sodyum sülfat katkılı harçta %0,9 birim hacim ağırlığı artışı belirlenmiştir. Katkıların eş ağırlıkta kullanılmalarına rağmen, taze harcın birim hacim ağırlığında farklı artışlara neden olmaları, harç bileşenleriyle girdikleri tepkimelerin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Tablo 4.1: Taze harç birim hacim ağırlığı ve kıvam değerleri

	taze harç birim hacim ağırlığı (gr/cm ³)	taze harç kıvamı (%)
katkısız	2,02	43
kalsiyumklorür katkılı	2,06	47
sodyumsülfat katkılı	2,04	51



Şekil 4.1: Katkısız ve katkılı taze harçların birim hacim ağırlığı



Şekil 4.2: Katkısız ve katkılı taze harçların kıvam değerleri

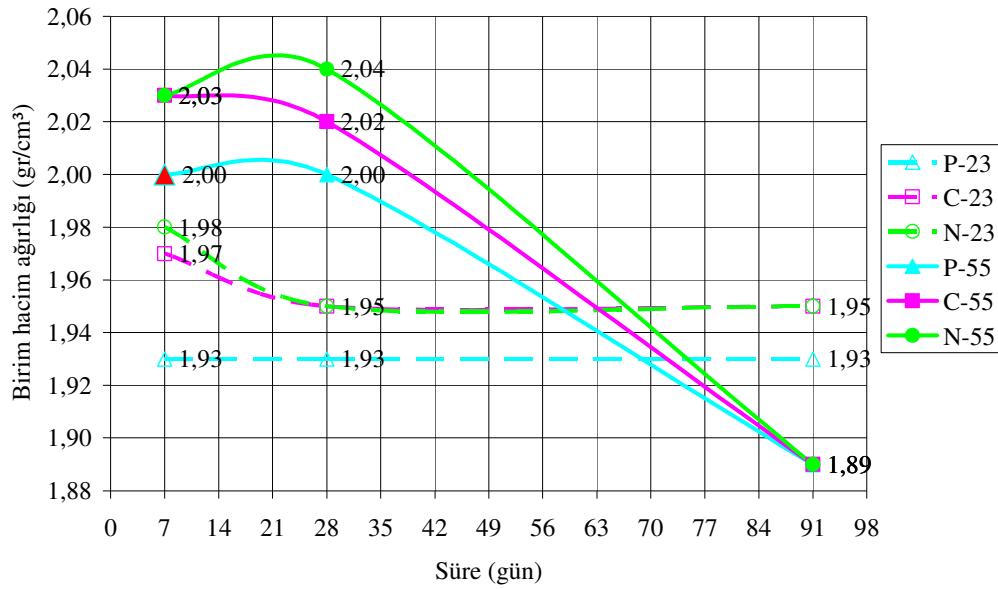
Akıcılık deneyinde ise, harç türlerinde su oranı sabit tutulduğundan, harçların yayılmalarında önemli değişiklik kaydedilmemekle birlikte, Na₂SO₄ ve CaCl₂ katkılarının harcın plastiklik özelliğine olumlu tesiri olduğu görülmüştür (Şekil 4.2).

4.2. Sertleşmiş Harç Deneyi Sonuçları

Bu başlık altında, sertleşmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile mikro yapılarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

4.2.1. Birim Hacim Ağırlığı Deneyi Sonuçlarının Perlitin Puzolanik Özelliklerinin Gelişimi Açısından Değerlendirilmesi

Şekil 4.3'te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük birim hacim ağırlığı değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.3: Farklı kütleme koşullarında 7-28-91 günlük katkısız ve katkılı numunelerin birim hacim ağırlığı değişimleri

Katkı maddelerine göre birim hacim ağırlığı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C'de bekletilen 7 günlük harç numunelerinde, karbonatlaşma tepkimesi sonucunda ortaya çıkan suyun numune bünyesinden uzaklaşması nedeniyle referans numunesine (P-55-7) kıyasla birim hacim ağırlığında düşme gözlemlendiği söylenebilir.

23°C'de bekletilen katkılı numunelerin birim hacim ağırlıkları katkısız numune ile karşılaştırıldığında, harç içeriğindeki kireç + puzolan miktarının %4'ü kadar kullanılmış katkıların artışı neden oldukları görülmektedir. Bu katkıların su ile

tepkimeye girerek su kaybına bağılı birim hacim ağırlığı azalmasını da azaltmış olduğı düşünölmektedir.

23°C’de bekletilen 7 günlük harç numunelerinde, referans numunesine kıyasla birim hacim ağırlık değeriinde %4 azalma belirlenmiştir.

23°C’de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla birim hacim ağırlığı 7. günde %2; 28. günde %1 daha yüksek bulunmuş ve 91.günde %1 fark, 28 ile 91. günde her iki numune türünde de birim hacim ağırlığı değeriinde değışme olmaması nedeniyle devam etmiştir.

23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye kıyasla birim hacim ağırlığı 7. günde %3; 28 günde %2 yüksek bulunmuş ve 28 ile 91.günler arasında değışiklik olmaması nedeniyle %2 fark devam etmiştir.

55°C’de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunenin, aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla birim hacim ağırlığı 7. günde %2; 28. günde %1 yüksek ve 91. günde eşit bulunmuştur.

55 °C’de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla birim hacim ağırlığı 7. günde %2; 28. günde %2 yüksek ve 91. günde eşit bulunmuştur.

55 °C’de kürlenene 7 günlük harç numunelerinde katkılar, referans numuneye oranla birim hacim ağırlığında %1,5 artışa neden olmuşlardır.

Kür koşullarına göre birim hacim ağırlığı deneyi sonuçlarının değeriendirilmesi:

55°C’de kürlenene numuneler kür süresince polimer muhafaza içinde olduklarından bünyelerindeki su kaybı önlenmiştir. Böylece, silikatlaşma ve kalsiyum silikat oluşum tepkimeleri devam ettiğı sürece birim hacim ağırlıklarında azalma belirlenmiştir.

55°C’de kürlenene numunelerin birim hacim ağırlıkları, 23 °C’de bekletilen numunelerin değerilerinden 28. günden sonraki süreye kadar yüksektir. 23 °C’de bekletilme ve 55°C’de kürlenme koşullarının her ikisinde de katkılı numuneler, katkısız numuneye oranla daha yüksek birim hacim değeri göstermiştir.

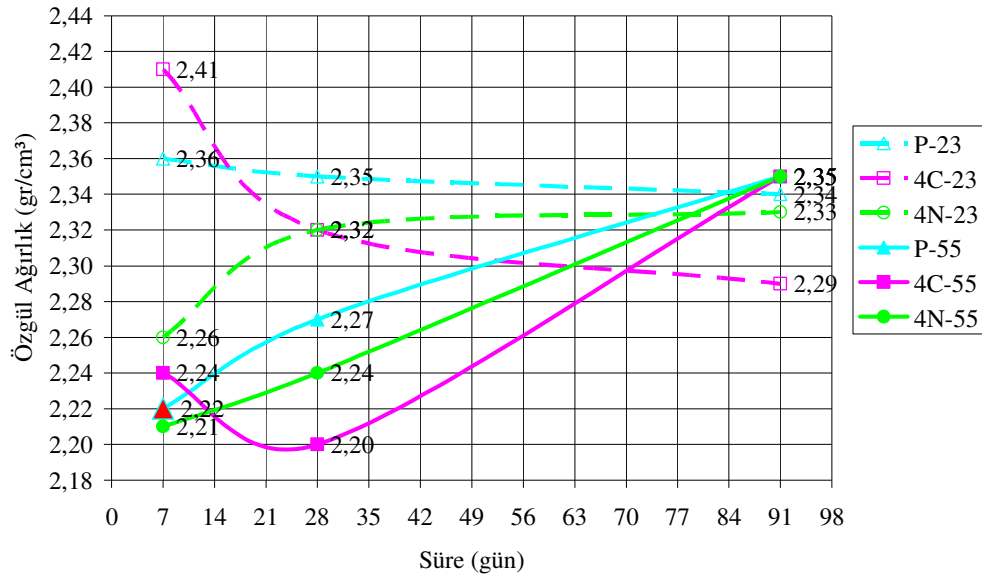
Kür süresine göre birim hacim ağırlığı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C’de bekletilen katkılı numunelerin, 7 ile 28. günler arasında birim hacim ağırlığında azalmaktadır. Ancak bu koşullardaki katkılı katkısız tüm numune grupları 28. günden sonra birim hacim ağırlığı bakımından kararlılık göstermektedir. Bunun, numune bünyesindeki suyun, 28. güne kadar katkıların iyonlaşma tepkimelerinde de kullanılmasının neden olduğu düşünülmektedir. İyonlaşan bu katkılar kalsiyum silikatların oluşumunda tepkimeye girmektedir.

55°C’de kürlen numunelerin birim hacim değerleri ise zamanla azalma gösterip 91.gün sonunda katkı durumlarının farklılığına rağmen aynı değerde çıkmıştır.

4.2.2. Özgül ağırlık sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.4’te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük özgül ağırlık değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.4: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin özgül ağırlık değerleri

Katkı maddelerine göre özgül ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23 °C’de bekletilen 7 günlük harç numunelerinde, referans numunesine kıyasla özgül ağırlık değerinde %6 artış belirlenmiştir.

23°C’de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla özgül ağırlığı 7. günde %2 yüksek; 28. günde %1 ve 91. günde %2 daha düşük bulunmuştur.

23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye kıyasla özgül ağırlığı 7. günde %4; 28 günde %1; 91. günde %0,4 daha düşük bulunmuştur.

55°C’de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla özgül ağırlığı 7. günde %1 yüksek; 28. günde %3 düşük ve 91. günde eşit bulunmuştur.

55°C’de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla özgül ağırlığı 7. günde %0,5; 28. günde %1 düşük ve 91. günde eşit bulunmuştur.

Kür koşullarına göre özgül ağırlık deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Her iki kür koşulunda da, 7 gün sonunda kalsiyumklorür katkısı özgül ağırlığı artırma, sodyum sülfat katkısı azaltma eğilimindedir.

23°C de kürlenene katkısız numunelerin özgül ağırlığı 55°C de kürlenene katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 6 ve 28 gün sonunda %4 daha yüksek iken, 91 gün sonunda %0,4 düşük bulunmuştur.

23°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelerin özgül ağırlığı, 55°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 8 ve 28 gün sonunda %5 daha yüksek iken, 91 gün sonunda %3 düşmüştür.

23°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelerin özgül ağırlığı, 55°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 2 ve 28 gün sonunda %4 daha yüksek iken, 91 gün sonunda %1 azalmıştır.

Katkı durumu farketmeksizin 55°C de kürlenene tüm numuneler 91. günde aynı özgül ağırlık değerine ulaşmıştır.

Kür süresine göre birim hacim ağırlığı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C de bekletilen katkısız numunenin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde %1'den daha az düşme görülmüş ve bu değer 91. güne değin devam etmiştir.

23°C de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde %4, 91. günde ise %5 azalma görülmüştür.

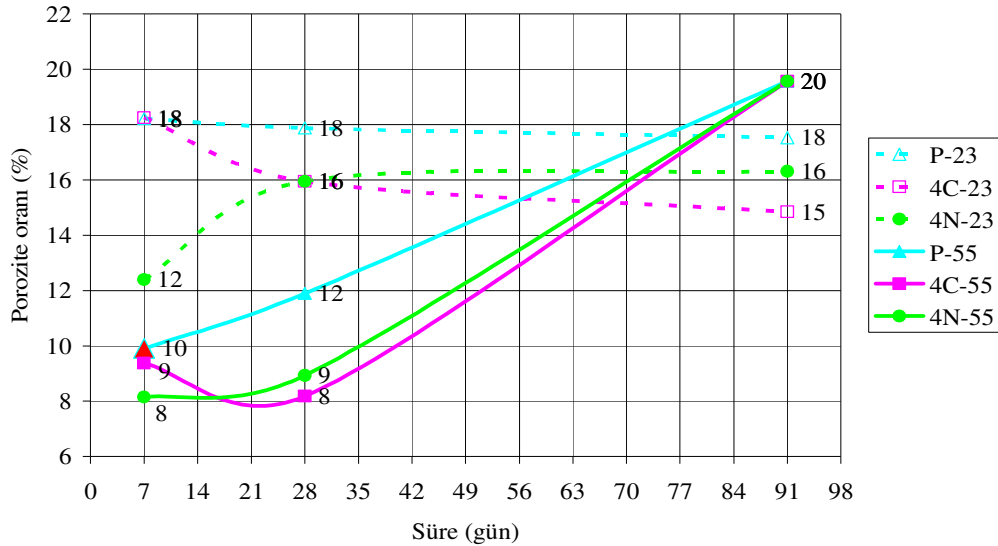
23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde meydana gelen %3lük artıştan sonra 28 ile 91. günler arasında %1den az artış görülmüştür.

55°C de bekletilen katkısız numunelerin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde %2, 91. günde ise %6 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde %2 düşme, 91. günde ise %5 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin özgül ağırlığında 7. güne oranla 28. günde %1, 91. günde ise %6 artış görülmüştür.

4.2.3. Porozite deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi



Şekil 4.5: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin gerçek porozite yüzdeleri

Şekil 4.5'te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük gerçek porozite değerleri yer almaktadır.

Katkı maddelerine göre porozite deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Referans numunesine göre 23 °C'de bekletilen katkısız 7 günlük numunenin porozitesi %80 artış göstermiştir. Bu farkın, 23 °C'de karbonatlaşma ve 55 °C'de silikatlaşma tepkimelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

23 °C'de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla porozite değeri 7. günde aynı çıkarken, 28. günde %11; 91. günde %17 daha düşük bulunmuştur.

23 °C'de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye kıyasla porozite değeri 7. günde %33; 28 gün sonunda %11 daha düşük bulunmuş, bu numunenin porozite değerinde 28 ile 91. günleri arasında değişim olmamıştır.

55 °C'de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla porozite değeri 7. günde %10 ve 28. günde %33 daha düşük iken, 91. günde her iki numune grubu aynı porozite değerine ulaşmıştır.

55 °C'de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunenin aynı koşullarda kürlenene katkısız numuneye oranla porozite değeri 7. günde %20 ve 28. günde %25 daha düşük iken, 91. günde her iki numune grubu aynı porozite değerine ulaşmıştır.

Kür koşullarına göre porozite deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23 °C'de bekletilen numunelerde gerçekleşen karbonatlaşma tepkimesi, 55 °C'de kürlenene numunelerin deney sonuçlarıyla farklılıklara neden olmuştur.

23 °C de kürlenene katkısız numunelerin porozite değeri 55°C de kürlenene katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 80 ve 28 gün sonunda %50 daha yüksek iken, 91 gün sonunda % 10 daha düşük bulunmuştur.

23 °C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelerin porozite değeri, 55°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 ve 28 gün sonunda %100 daha yüksek iken, 91 gün sonunda %25 düşmüştür.

23°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelerin porozite değeri, 55°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 50 ve 28 gün sonunda % 77 daha yüksek iken, 91 gün sonunda %20 azalmıştır.

55°C de kürlenene kalsiyum klorür katkılı numuneye kıyasla 23 °C de kürlenene aynı katkılı numunenin porozite değeri %3; 55°C de kürlenene sodyum sülfat katkılı numuneye kıyasla 23 °C de kürlenene aynı katkılı numunenin porozite değeri %3 artış görülmektedir.

Kür süresine göre porozite deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C’de bekletilen numunelerde kullanılan sodyumsülfat katkısı, sodyumhidroksit ve sodyumkarbonata dönüşürken 7-28 günler arasında birim hacim ağırlığında görülen düşmeyle birlikte poroz yapı artmış; 28. günden sonra gerek birim hacim ağırlığı gerekse porozite sabitlenmiştir.

23°C’de bekletilen katkısız numunenin porozite değeri de birim hacim ağırlığı gibi 7. günden itibaren sabit değer göstermiştir. Buna, numunenin yüzeyinde oluşan karbonatlaşma reaksiyonunun neden olabileceği düşünülmüştür.

23°C’de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin porozite değeri 7. güne oranla 28. günde %11, 91. günde ise %17 azalma görülmüştür.

23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin porozite değeri 7. güne oranla 28. günde meydana gelen % 33lük artıştan sonra 28-91. günler arasında %1den az artış görülmüştür.

55°C de kürlenene numunelerde 28. günden sonra, C-S-H yapılarının neden olduğu porozite artışı görülmektedir.

55°C de bekletilen katkısız numunelerin porozite değeri 7. güne oranla 28. günde %20, 91. günde ise %100 artış görülmüştür.

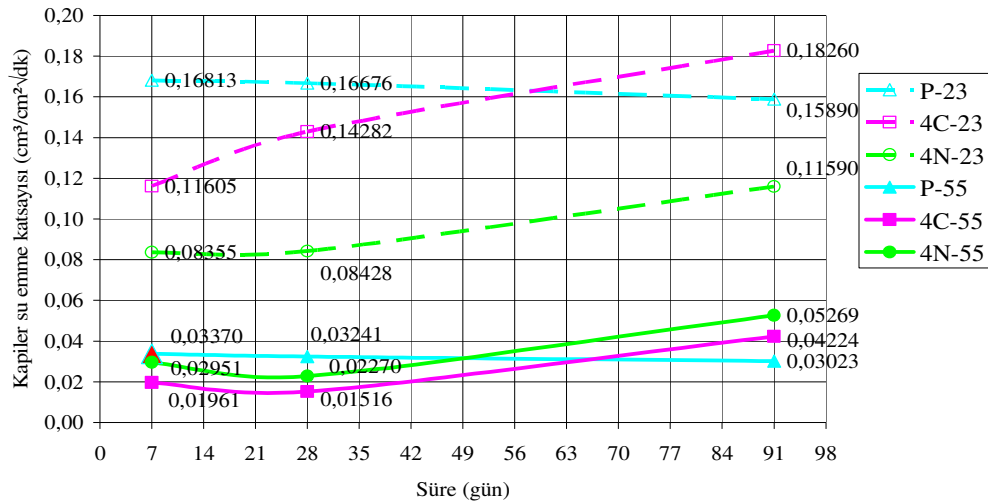
55°C de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin porozite değeri 7. güne oranla 28. günde %11 düşme, 91. günde ise %122 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin porozite değeri 7. güne oranla 28. günde %12,5; 91. günde ise %150 artış görülmüştür.

4.2.4. Kapiler su emme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Kapiler su emme deneyinin gerçekleştirilmesi sürecinde, 23°C ortamda 7 ve 28 gün bekletilen numuneler etüvde bekletilmeden, bünyelerindeki nem ile bu deneye tabi tutulmuştur. 23°C ortamda 91 gün bekletilen ve 55 °C'de 7, 28, 91 gün kürlenen numuneler ise etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulduktan sonra ortam koşullarına alıştırıldıktan sonra kapiler su emme deneyine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin kıyaslanmasında bu farklılığın etkisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 4.6'da katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük kapiler su emme deneyi değerleri yer almaktadır.



Şekil 4.6: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin kapiler su emme değerleri

Katkı maddelerine göre kapiler su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Referans numunesine nazaran 23°C ortamda bekletilen 7 günlük katkısız numunenin kapiler su emme değeri %399 oranında artış kaydedilmiştir.

23°C ortamda bekletilen numunelerde, katkıların kapiler su emme değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Kapiler su emme değeri bakımından, 7 günlük katkısız numuneye kıyasla kalsiyum klorürlü numunde %31, sodyum sülfatlı numunde %50 azalma belirlenmiştir.

55 °C’de kürlenene numunelerde de, katkıların kapiler su emme değeriğini düşürdüğü görülmüştür. Kapiler su emme değeriğinde, referans numunesine oranla 7 günlük kalsiyumklorür katkılı numuneler %34, sodyumsülfat katkılılar %42 azalma göstermiştir.

Kür koşullarına göre kapiler su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23 °C ortamda bekletilen ve 55 °C’de kürlenene numunelerin kapiler su emme deneyi öncesi etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutularak hazırlanması işleminin yalnızca 91 günlük numunelerde uygulanması nedeniyle kür koşulları etkisinin belirlenmesinde 91 günlük numuneler kıyaslanması uygun bulunmuştur.

Buna göre, 23 °C ortamda 91 gün bekletilen katkısız numunenin kapiler su emme değeri 55 °C’de 91 kürlenene katkısız numuneye kıyasla %426 artış göstermiştir. 23 °C ortamda 91 gün bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunenin kapiler su emme değeri 55 °C’de 91 kürlenene katkısız numuneye kıyasla %332; 23 °C ortamda 91 gün bekletilen sodyumsülfat katkılı numunenin kapiler su emme değeri 55 °C’de 91 kürlenene sodyumsülfat katkılı numuneye göre %120 artış göstermiştir.

Sonuç olarak katkı durumları aynı olan 23 °C ortamda bekletilen numunelerin, 55 °C’de kürlenene numunelerden daha yüksek kapiler su emme değerine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Kür süresine göre kapiler su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

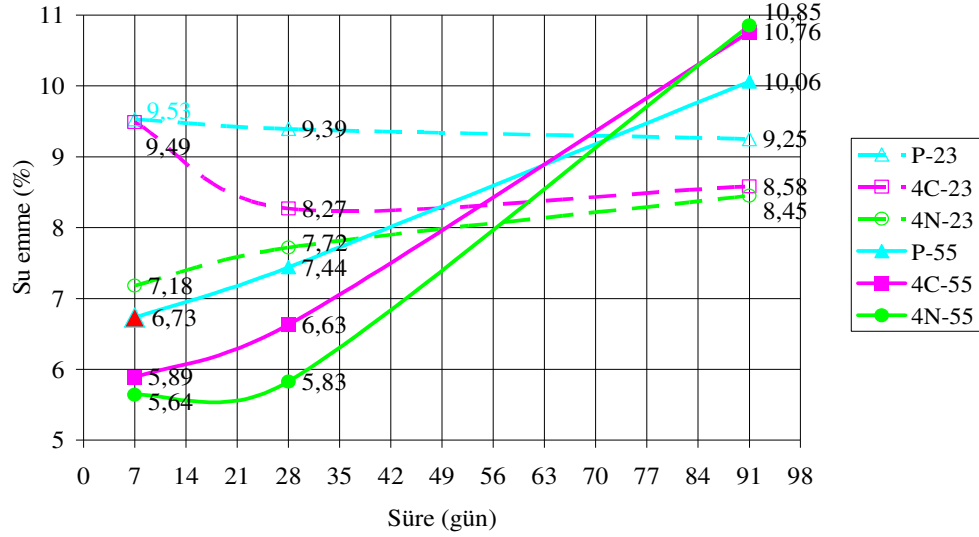
23°C’de bekletilen katkısız numunenin kapiler su emme değeriğinde 7. güne oranla 28. günde %1; 91. günde ise %5 azalma belirlenmiştir.

23 °C’de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin kapiler su emme değeriğinde 7. güne oranla 28. günde %23; 91. günde ise %57 artış görülmüştür.

23 °C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin kapiler su emme değeriğinde 7. güne oranla 28. günde %1; 91. günde ise %39 artış görülmüştür.

4.2.5. Atmosfer basıncı altında su emme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.7’de katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük su emme deneyi değeriği yer almaktadır.



Şekil 4.7: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin su emme yüzdeleri

Katkı maddelerine göre su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Referans numunesine nazaran 23 °C’de bekletilen 7 günlük katkısız numunenin su emme değerinde % 42 artış görülmektedir.

23 °C’de bekletilen numunelerde katkısız numuneye kıyasla su ve nem emici özellikleriyle bilinen kalsiyum klorür katkılı numunenin su emme değeri 7. günde % 0,4; 28. günde %12; 91. günde %7 daha düşük bulunmuştur.

23 °C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numuneler ise, 23 °C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla su emme yüzdelерinde 7 gün sonunda %25; 28 gün sonunda %18, 91 gün sonunda %9 azalmıştır.

55 °C’de kürlenен kalsiyumklorür katkılı numunelerin su emme yüzdeleri, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %12 ve 28 gün sonunda %11 azalmış; 91 gün sonunda ise %7 artmıştır.

55 °C’de kürlenен sodyumsülfat katkılı numunelerin su emme yüzdeleri ise, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %16 ve 28 gün sonunda %22 azalmış; 91 gün sonunda ise %8 artmıştır.

Kür koşullarına göre su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C de kürlenен katkısız numunelerin su emme değeri 55°C de kürlenен katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 42 ve 28 gün sonunda %26 artmış, 91 gün sonunda %8 azalmıştır.

23°C de kürlenен kalsiyumklorür katkılı numunelerin su emme değeri, 55°C de kürlenен kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 61 ve 28 gün sonunda %25 artmış, 91 gün sonunda %20 azalmıştır.

23°C de kürlenен sodyumsülfat katkılı numunelerin su emme değeri, 55°C de kürlenен sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 27 ve 28 gün sonunda %32 artmış, 91 gün sonunda %22 azalmıştır.

Katkısız ve katkılı 3 numune grubu için de 7 ve 28. günlerde 23°C de kürlenен numuneler daha yüksek su emme değeri gösterirken, 28. günden sonra bu durum değişmiş; 91. güne ulaşıldığında 55°C de kürlenен numunelerin daha yüksek su emme değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Su emme değerindeki bu yükseliş, 55°C de kürlenен numunelerde C-S-H yapılarının gelişimiyle oluşan porozite artışından kaynaklanmıştır.

Kür süresine göre su emme deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C de bekletilen katkısız numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %1; 91. günde ise %3 azalma görülmüştür.

23°C de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %13; 91. günde ise %10 azalma görülmüştür.

23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %8, 91. günde ise %18 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen katkısız numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %11, 91. günde ise %50 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %13, 91. günde ise %89 artış görülmüştür.

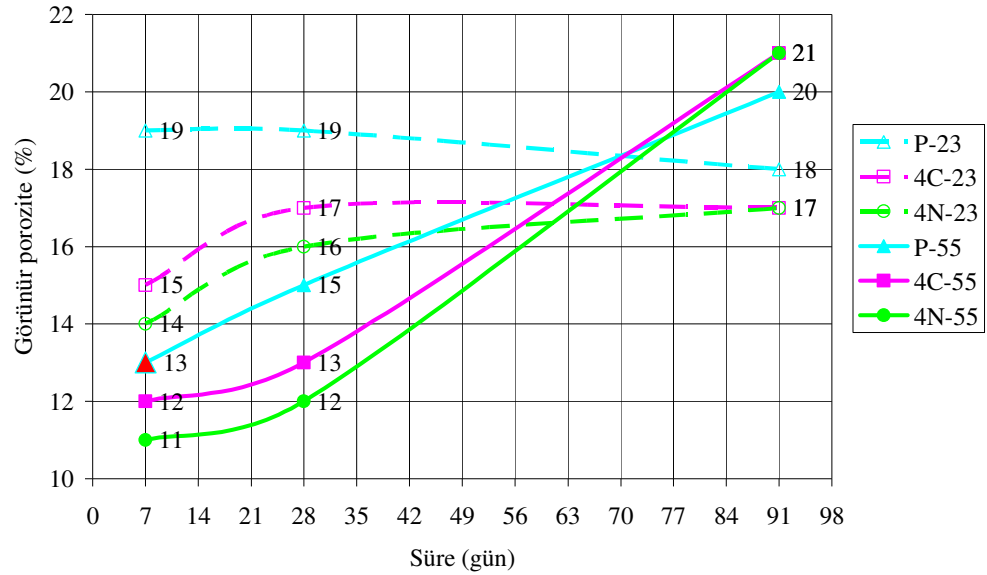
55°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %3, 91. günde ise %92 artış görülmüştür.

Katkı maddelerine göre hacimsel su emme (görünür porozite) deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Şekil 4.8’de katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük hacimsel su emme deneyi değerleri yer almaktadır.

Her iki kürleme koşulunda da 7 ve 28. günlerin sonunda hacimsel su emme değerlerinde değer sıralaması katkısız, kalsiyumklorür katkılı ve sodyumsülfat katkılı olarak belirlenmiştir.

Referans numunesine nazaran 23°C’de bekletilen 7 günlük katkısız numunenin hacimsel su emme değerinde % 46 artış görülmektedir.



Şekil 4.8: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin hacimsel su emme (görünür porozite) yüzdeleri

23°C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla kalsiyum klorür katkılı numunede hacimsel su emme değeri 7. günde %21; 28. günde %11; 91.günde %6 daha düşüktür.

23°C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla sodyumsülfat katkılı numunede hacimsel su emme değeri 7. günde %26; 28. günde %16; 91.günde %6 daha düşük bulunmuştur.

55°C’de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelerin hacimsel su emme yüzdeleri, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %7 ve 28 gün sonunda %13 düşük iken; 91 gün sonunda %5 artmıştır.

55°C’de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelerin hacimsel su emme yüzdeleri ise, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %15 ve 28 gün sonunda %20 düşük iken, 91 gün sonunda ise %5 artmıştır.

Kür koşullarına göre hacimsel su emme (görünür porozite) deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Katkısız ve katkılı 3 numune grubu için de 7 ve 28. günlerde 23°C de kürlenene numuneler daha yüksek su emme değeri gösterirken, 28. günden sonra bu durum değişmiş; 91. güne ulaşıldığında 55°C de kürlenene numunelerin daha yüksek hacimsel su emme değerleri gösterdiği belirlenmiştir.

23°C de kürlenene katkısız numunelerin hacimsel su emme değeri 55°C de kürlenene katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 46 ve 28 gün sonunda %27 artmış; 91 gün sonunda ise %10 azalmıştır.

23°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelerin hacimsel su emme değeri, 55°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 25 ve 28 gün sonunda %31 artmış, 91 gün sonunda %19 azalmıştır.

23°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelerin hacimsel su emme değeri, 55°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 27 ve 28 gün sonunda %33 artmış, 91 gün sonunda %19 azalmıştır.

Kür süresine göre hacimsel su emme (görünür porozite) deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Genel olarak her iki kür koşulunda da katkılı ve katkısız tüm numunelerin hacimsel su emme değerlerinde artış belirlenmiştir.

23°C de bekletilen katkısız numunelerin hacimsel su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde değişim görülmezken, 91. günde %5 azalma görülmüştür.

23°C de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin hacimsel su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %13 oranında bir artış belirlenmiş, bu oran 91. güne kadar sabit kalmıştır.

23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin hacimsel su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %15, 91. günde ise %21 artış görülmüştür.

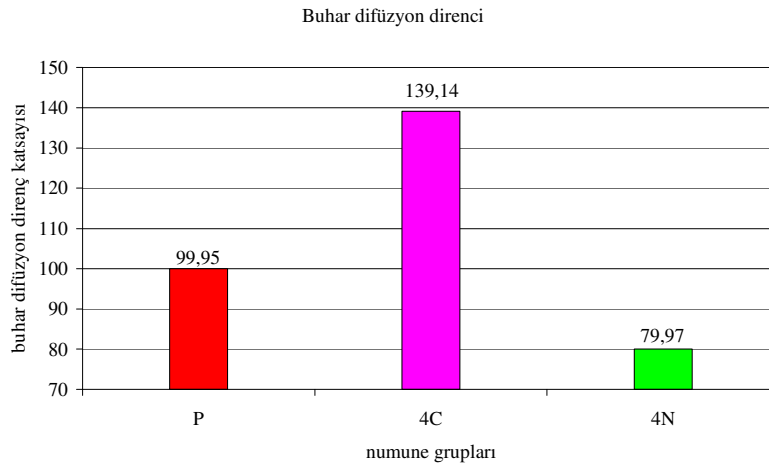
55°C de bekletilen katkısız numunelerin hacimsel su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %15, 91. günde ise %54 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen kalsiyum klorür katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %8, 91. günde ise %75 artış görülmüştür.

55°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin su emme değerlerinde 7. güne oranla 28. günde %9, 91. günde ise %100 artış görülmüştür.

4.2.6. Buhar geçirgenlik deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.9'da, 55°C de 7 gün kürlenene katkısız ve katkılı numunelerin buhar geçirgenlik deneyi sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.9: Buhar difüzyon direnç katsayıları

Referans numunesi kıyasla sodyumsülfat katkılı numunenin porozite değeri %11 yüksek ve buhar geçirgenlik direnç faktörü ise %20 düşüktür.

4.2.7. Donma-çözülme deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

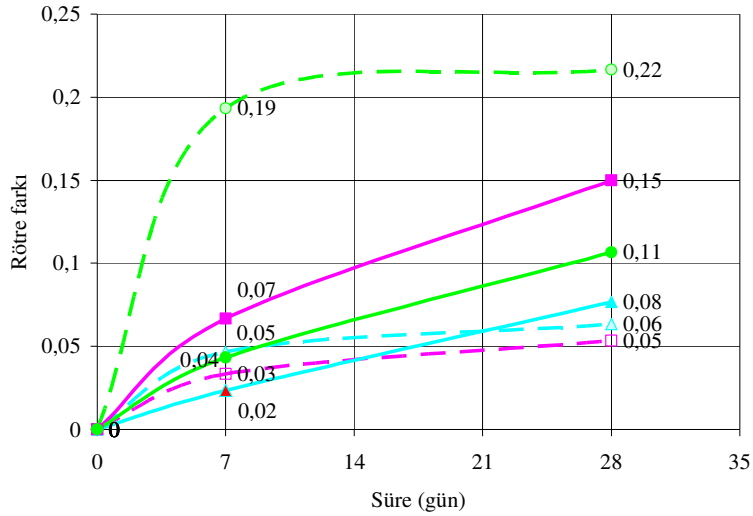
23°C'de bekletilen 7 ve 28 günlük numunelerin kolay ve erken dağılımları nedeniyle, yalnızca 91 günlüklere bu deney uygulanmıştır. Katkısız numune grubu 5

donma-çözülme çevrimi sonunda dağılmaya başlamıştır. Kalsiyumklorür katkılı numuneler 8. donma-çözülme çevriminden itibaren dağılmaya başlamış, deneye 17. çevrime kadar devam edilebilmiştir. Bununla birlikte kalsiyumklorür katkılı numuneler, 23°C’de bekletilen numuneler içinde donma çözünme deneyine en dayanımlı grup olmuştur. Sodyumsülfat katkılı numunelerde ise 6. donma-çözülme çevriminden itibaren parça kopması, 9.çevrim sonunda ise dağılma gözlenmiştir.

55°C’de kürlenene numune 7,28 ve 91 günlük tüm zamanlarda en dayanıklı numune grubunun kalsiyumklorür katkılı numuneler; en az dayanıklı olanın ise sodyumsülfat katkılı numuneler olduğu görülmüştür.

Donma-çözülme deneyi değerlendirmesi için sonuçlar Ek **Tablo A.4**’te verilmiştir.

4.2.8. Rötire deneyi sonuçlarının perlitin puzalanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi



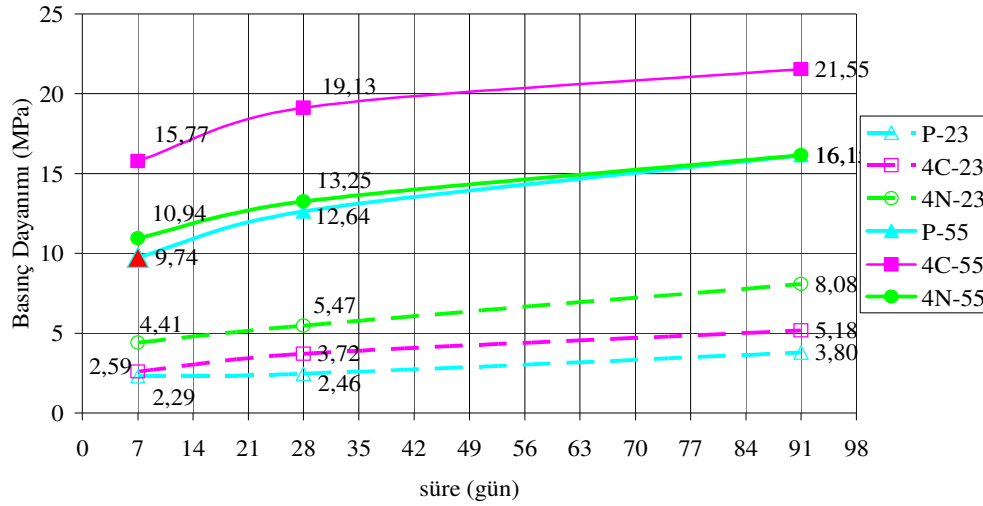
Şekil 4.10: Farklı kür koşullarında 7- gün kürlenene numunelerin sonraki 7 ve 28. günlerdeki rötire kaybı

Tüm numuneler mukayese edildiğinde, **Şekil 4.10**’a göre, 23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numuneler, en yüksek; kalsiyumklorür katkısı ise, en az rötire farkı vermiştir.

55°C’de kürlenene numuneler içinde kalsiyumklorür katkılı numuneler en yüksek, sodyumsülfat katkılı numuneler ikinci yüksek rötire farkı vermiştir.

4.2.9. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.11’de katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük basınç dayanımı sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.11: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin basınç dayanımı değerleri

Katkı maddelerine göre basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Şekil 4.11’deki grafikte, referans numunesine oranla 23°C’de bekletilen katkısız numunenin basınç dayanımının %67 azaldığı görülmektedir.

23°C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla kalsiyumklorür katkılı numune ile elde edilen basınç dayanımı 7. günde %13; 28. günde %51; 91.günde %36 daha yüksektir.

23°C’de bekletilen katkısız numuneye oranla sodyumsülfat katkılı numunenin basınç dayanımı 7. günde %93; 28. günde %122; 91.günde %113 daha yüksektir.

55°C’de kürlen kalsiyumklorür katkılı numunelerin basınç dayanımları, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %62; 28 gün sonunda %51 ve 91 gün sonunda %34 yüksektir.

55°C’de kürlen sodyumsülfat katkılı numunelerin basınç dayanımları ise, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %12; 28 gün sonunda %5 daha yüksek iken, 91 gün sonunda aynı değere ulaşmışlardır.

Kür koşullarına göre basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23°C de bekletilen katkısız numunelerin basınç dayanım değeri 55°C de kürlenene katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 76, 28 gün sonunda %81, 91 gün sonunda %76 daha az değeri göstermiştir.

23°C de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin basınç dayanım değeri, 55°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 84, 28 gün sonunda %81, 91 gün sonunda %76 daha az değeri göstermiştir.

23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin basınç dayanım değeri, 55°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda %60, 28 gün sonunda %59, 91 gün sonunda %50 daha az değeri göstermiştir.

Kür süresine göre basınç dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

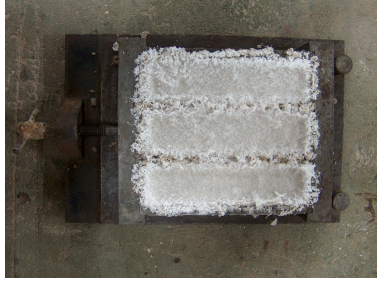
Katkılı ve katkısız tüm numune gruplarında, her iki kür sıcaklığında, süre ile basınç dayanımlarının artması harçtaki tepkimelerin devam etmesini göstermektedir.

23°C ortam koşullarında bekletilen katkısız ve katkılı numunelerden 7 ve 28 günlükler için tam bir kuruma sağlanamamıştır. 23 °C ortam koşullarında kürlenene 7, 28 ve 91 günlük numuneler el ve göz ile muayenede gevşek, kenarlarından kolayca dağılılabılır bulunmuştur. Ayrıca,

23°C’de 7 gün bekletilen katkısız numuneye oranla 28 gün kürlenene katkısız numunenin basınç dayanımında %7, 91 gün kürlenene katkısız numunenin dayanımında yaklaşık olarak %66 artış kaydedilmiştir.

23°C’de 7 gün bekletilen kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin basınç dayanımında %44 civarında bir artış gözlenirken, 91 gün kürlenene numunenin dayanımında %100 artış kaydedilmiştir.

23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin kurumaya başlamasıyla beraber üçüncü günden itibaren üst yüzeylerinde glamber tuzu oluşumu görülmüştür (**Şekil 4.12**). 23°C’de 28 gün kürlenene sodyum sülfat katkılı numune 7 gün kürlenene numuneye oranla basınç dayanımında %24 civarında bir artış gözlenirken, 91 gün kürlenene numunenin dayanımında yaklaşık olarak %83 artış kaydedilmiştir.



Şekil 4.12:Sodyumsülfat katkılı numunede glamber tuzu oluşumu

55°C’de kürlenene katkısız ve katkılı numuneler, 23°C ortam koşullarındakilerin aksine gevşek olmayıp, kolay dağılmamıştır.

55°C’de 7 gün kürlenene katkısız numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin basınç dayanımında %30, 91 gün kürlenene numunenin dayanımında yaklaşık olarak %65 artış kaydedilmiştir.

55°C’de 7 gün kürlenene kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin basınç dayanımında %21, 91 gün kürlenene numunenin dayanımında yaklaşık olarak %37 artış kaydedilmiştir.

55°C’de kürlenene sodyumsülfat katkılı numuneler, her süre ve sıcaklık grubu için katkısızlara oranla daha beyaz görünümündedir. 55°C’de 7 gün kürlenene sodyumsülfat katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin basınç dayanımında %21, 91 gün kürlenene numunenin basınç dayanımında ise %48 artış kaydedilmiştir.

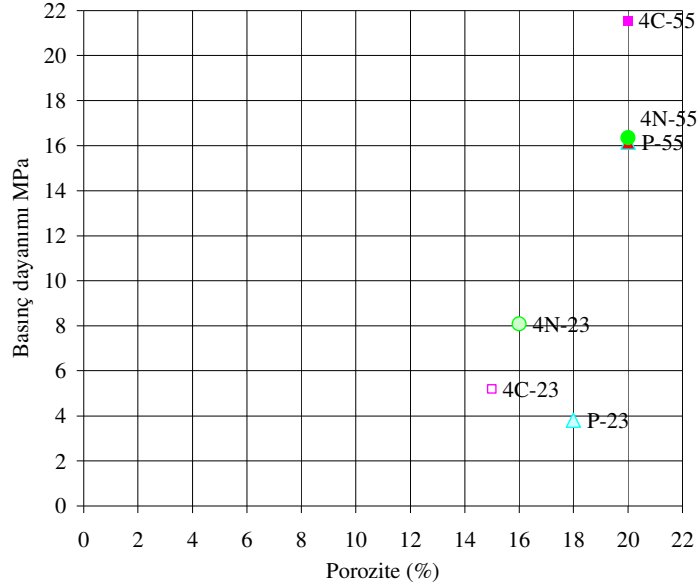
Basınç-porozite ilişkisinin değerlendirilmesi:

Şekil 4.13’te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 91 gün sonundaki basınç dayanımları ve porozite değerleri ilişkisi yer almaktadır. Numunelerin basınç-porozite ilişkileri değerlendirilirken süreil nasıl geliştiklerinin de basınç ve porozite gelişim grafiklerinden bakılması yararlı olacaktır.

23°C’de bekletilen katkısız numune grubunun 7,28 ve 91. günlerde basınç dayanımı ve porozite grafikleri birlikte değerlendirildiğinde, basınç dayanımı zamanla gelişme gösterirken porozite değerinin sabit kaldığı görülmüştür. 91. gün sonunda hem porozite hem de basınç dayanımı için en düşük değeri bu numuneler göstermiştir.

23°C’de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numune grubunun 7,28 ve 91. günlerde basınç dayanımı gelişme gösterirken porozite değeri azalmıştır.

23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numune grubunun 7 ve 28. günlerde hem basınç dayanımında hem de porozitede artış gösterirken 91. günde porozite değeri sabit kalıp basınç dayanımı artmıştır.



Şekil 4.13: Farklı koşullarında 91 günlük numunelerin basınç-porozite ilişkisi

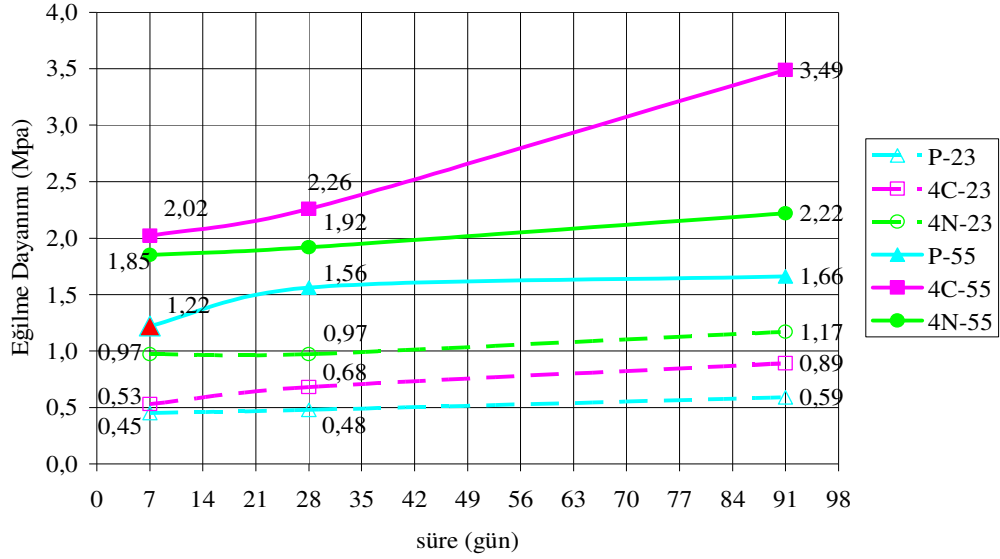
55°C’de kürlenmiş katkısız ve sodyumsülfat katkılı numunelerin 7, 28 ve 91. günlerde basınç ve porozite değerleri artış göstermişlerdir.

55°C’de kürlenmiş kalsiyumklorür katkılı numunenin 7-28. günlerde basınç dayanımı artarken ve porozite azalma göstermiş; 28-91. günlerde hem basınç hem de porozite değerleri artmıştır.

Basınç-porozite grafiğinden anlaşıldığı üzere, 55°C’de kürlenmiş numunelerde zamanla porozite ve basınç dayanımında artış saptanmıştır. Bu numunelerde oluşan C-S-H yapıları basınç dayanımını artırırken bu yapıların oluşturdukları porozite de porozite yüzdesini artırmaktadır.

4.2.10. Eğilme dayanımı deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.14’te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük eğilme dayanımı sonuçları yer almaktadır.



Şekil 4.14: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Katkı maddelerine göre eğilme dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Referans numunesine oranla 23°C’de bekletilen 7 günlük katkısız numunenin eğilme dayanımının %63 azaldığı görülmektedir.

23°C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla kalsiyumklorür katkılı numunelerin eğilme dayanımı 7. günde %16; 28. günde %42; 91.günde %51 daha yüksektir.

23°C’de bekletilen katkısız numuneye kıyasla sodyumsülfat katkılı numunelerin eğilme dayanımı 7. günde %113; 28. günde %102; 91.günde %98 daha yüksektir.

55 °C’de kürlen kalsiyumklorür katkılı numunelerin eğilme dayanımları, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %67; 28 gün sonunda %45 ve 91 gün sonunda %110 yüksektir.

55 °C’de kürlen sodyumsülfat katkılı numunelerin eğilme dayanımları, aynı koşullarda kürlenmiş katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %52; 28 gün sonunda %23 ve 91 gün sonunda %25 yüksektir.

Kür koşullarına göre eğilme dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

23 °C de bekletilen katkısız numunelerin eğilme dayanım değeri 55°C de kürlen kalsiyumklorür katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 63, 28 gün sonunda %69, 91 gün sonunda ise %64 daha az değer göstermiştir.

23°C de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin basınç dayanım değeri, 55°C de kürlen kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda % 74, 28 gün sonunda %70, 91 gün sonunda ise %75 daha az değeri göstermiştir.

23°C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin basınç dayanım değeri, 55°C de kürlen sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda %48, 28 gün sonunda %49, 91 gün sonunda %47 daha az değeri göstermiştir.

Kür süresine göre eğilme dayanımı deneyi sonuçlarının değerlendirilmesi:

Numunelerin, her iki kür koşulunda süre ile eğilme dayanımlarının artması, harçtaki tepkimelerin devam ettiğinin göstergesidir.

23°C’de 7 gün kürlen katkısız numuneye oranla 28 gün kürlen numunenin eğilme dayanımında %7, 91 gün kürlen numunenin dayanımında yaklaşık olarak %31 artış kaydedilmiştir.

23°C’de 7 gün kürlen kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlen numunenin eğilme dayanımında %30, 91 gün kürlen numunenin dayanımında %68 artış kaydedilmiştir.

23°C’de 7 gün kürlen sodyumsülfat katkılı numuneye oranla 28 gün kürlen numunenin eğilme dayanımında yaklaşık %1 artış olurken, 91 gün kürlen numunenin dayanımında %21 civarında artış kaydedilmiştir.

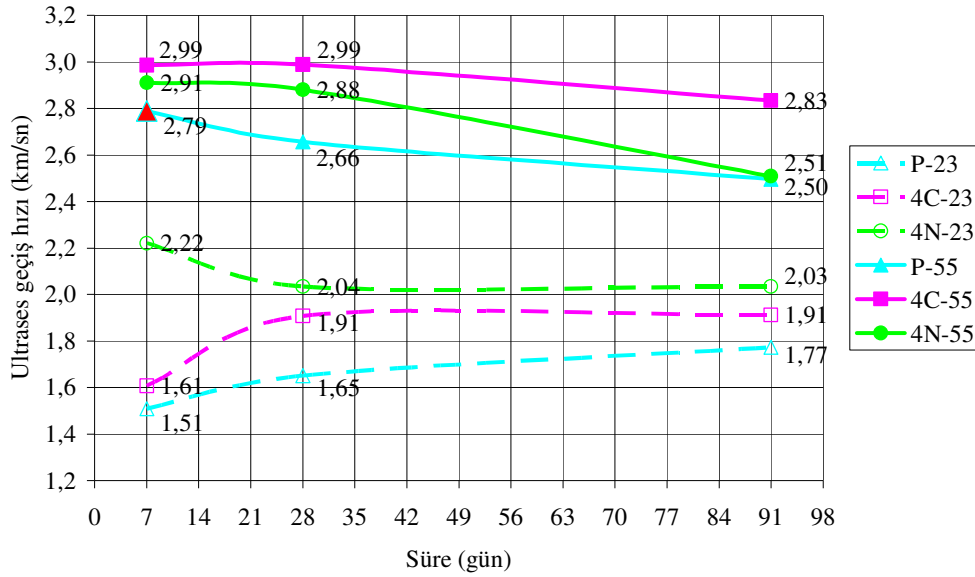
55°C’de 7 gün kürlen katkısız numuneye oranla 28 gün kürlen katkısız numunenin eğilme dayanımında %25, 91 gün kürlen numunenin dayanımında yaklaşık olarak %37 artış kaydedilmiştir.

55°C’de 7 gün kürlen kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlen numunenin eğilme dayanımında %15, 91 gün kürlen numunenin dayanımında yaklaşık olarak %72 artış kaydedilmiştir.

55°C’de 7 gün kürlen sodyumsülfat katkılı numuneye oranla 28 gün kürlen numunenin eğilme dayanımında %4 artış gözlenirken, 91 gün kürlen numunenin dayanım değerinde gelişme görülmemiştir.

4.2.11. Ultrases hızı ve elastiklik modülü deneyi sonuçlarının perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

Şekil 4.15'te katkısız ve katkılı numunelerin, farklı koşullarda 7, 28 ve 91 günlük ultrases hızı sonuçları yer almaktadır. Bu sonuçlar kullanılarak hesapbedilen dinamik elastiklik modülü sonuçları Şekil 4.16'da yer almaktadır. Verilerin birbirlerine bağımlı ve paralel olmaları nedeniyle ultrases geçiş hızı sonuçları değerlendirilmesi verilmemiş olup, dinamik elastiklik modülü sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 4.15: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin ultrases hızı değerleri

Katkı maddelerine göre dinamik elastiklik modülü sonuçlarının değerlendirilmesi:

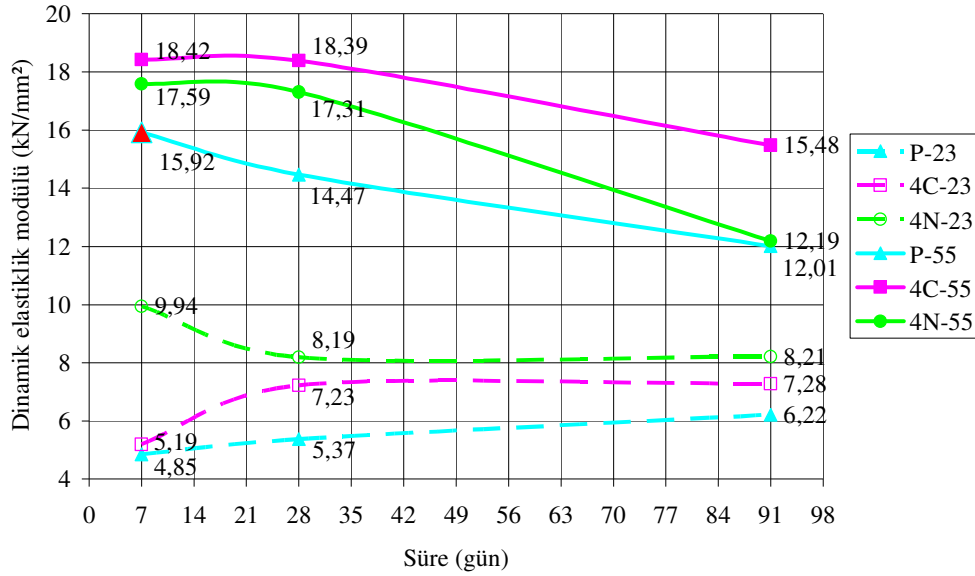
Referans numuneye kıyasla 23°C'de bekletilen katkısız numunenin elastiklik modülü %70 civarında azalma göstermiştir.

23°C'de bekletilen katkısız numuneye kıyasla kalsiyumklorür katkılı numunelerin elastiklik modülü 7. günde %7, 28. günde %35; 91.günde %17 daha yüksektir.

23°C'de bekletilen katkısız numuneye kıyasla sodyumsülfat katkılı numunelerin elastiklik modülü 7. günde %105; 28. günde %51; 91.günde %32 daha yüksektir.

55 °C'de kürlen numuneye kıyasla kalsiyumklorür katkılı numunelerin elastiklik modülü 7. günde %16, 28. günde %27; 91.günde %29 daha yüksektir.

55 °C'de kürlenene katkısız numuneye kıyasla sodyumsülfat katkılı numune ile elde edilen elastiklik modülü 7. günde %10, 28. günde %20; 91.günde %2 daha yüksektir.



Şekil 4.16: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük numunelerin elastiklik modülü değerleri

Kür koşullarına göre dinamik elastiklik modülü sonuçlarının değerlendirilmesi

23 °C de bekletilen katkısız numunelerin elastiklik modülü 55°C de kürlenene katkısız numunelere kıyasla 7 gün sonunda %70, 28 gün sonunda %63, 91 gün sonunda %48 daha az değer göstermiştir.

23 °C de bekletilen kalsiyumklorür katkılı numunelerin elastiklik modülü 55°C de kürlenene kalsiyumklorür katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda %72, 28 gün sonunda %61, 91 gün sonunda %53 daha az değer göstermiştir.

23 °C de bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerin elastiklik modülü 55°C de kürlenene sodyumsülfat katkılı numunelere kıyasla 7 gün sonunda %43, 28 gün sonunda %53, 91 gün sonunda %33 daha az değer göstermiştir.

Kür süresine göre dinamik elastiklik modülü sonuçlarının değerlendirilmesi:

23 °C'de 7 gün kürlenene katkısız numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %11, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde yaklaşık olarak %28 artış kaydedilmiştir.

23 °C'de 7 gün kürlenene kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene

numunenin elastiklik modülünde %39 artış kaydedilmiş olup, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %40 artış kaydedilmiştir.

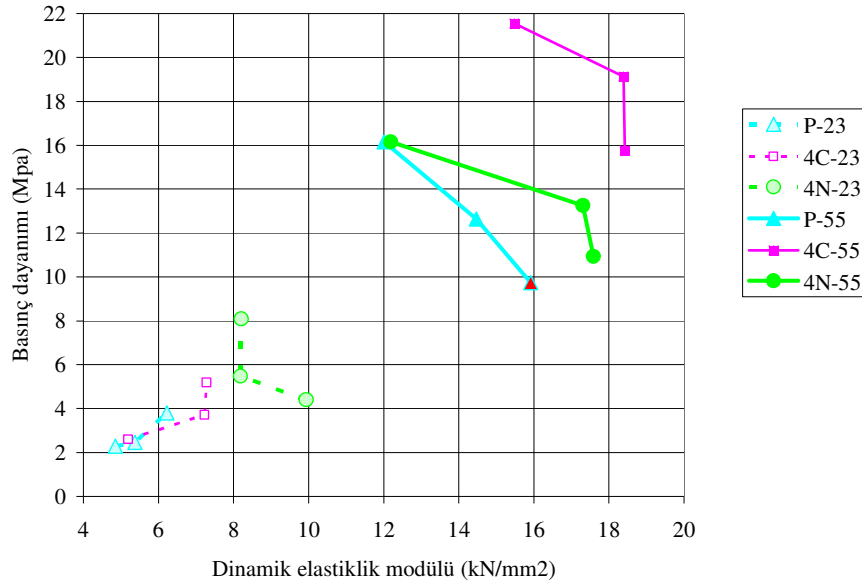
23 °C’de 7 gün kürlenene sodyumsülfat katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %18, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %17 azalma belirlenmiştir.

55 °C’de 7 gün kürlenene katkısız numuneye oranla 28 gün kürlenene katkısız numunenin elastiklik modülünde %9, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %25 azalma kaydedilmiştir.

55 °C’de 7 gün kürlenene kalsiyumklorür katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %0,2, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %16 azalma belirlenmiştir.

55 °C’de 7 gün kürlenene sodyumsülfat katkılı numuneye oranla 28 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %2, 91 gün kürlenene numunenin elastiklik modülünde %31 azalma görülmüştür.

Basınç dayanımı-dinamik elastiklik modülü ilişkisinin değerlendirilmesi:



Şekil 4.17: Farklı kür koşullarında 7-28 ve 91 günlük katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanımı-elastiklik modülü ilişkisi

Şekil 4.17'de farklı kürlenme koşullarında 7, 28 ve 91 gün kürlenmiş katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanımları ve elastiklik modülü ilişkisi gösterilmiştir.

23°C'de bekletilmiş olan katkısız ve kalsiyumklorür katkılı numunelerde basınç-elastiklik modülü arasında doğru orantı belirlenmiş; süre ile artan basınç dayanımı beraberinde elastiklik modülü de artmıştır.

Ancak, 23°C'de bekletilen sodyumsülfat katkılı numune ile 55°C'de kürlenmiş katkısız ve katkılı 3 grup numunede süre ile artan basınç dayanımına karşı elastiklik modülü gerileme göstermiştir.

4.2.12. Mineralojik yapı deneylerinin perlitin puzolanik özelliklerinin gelişimi açısından değerlendirilmesi

4.2.12.1. X Işınları difraktometrisi

Numunelerin X ışınları analizinde ortaya çıkan piklerin karakterizasyonu için, öncelikle harcı oluşturan hammaddelerin ayrı ayrı XRD'leri çekilmiştir. Böylece, numune XRD analizinde elde edilen piklerin hangi hammaddeden kaynaklandığı ve bu hammaddelerin kimyasal içerikleri nedeniyle oluşturabilecekleri muhtemel bileşikler ve fazlar için ön liste oluşturulmuştur.

Numunelerden elde edilen ve Ek **Şekil B.1, 2, 3, 4, 5'**te grafik halinde sunulan XRD pikleri, bu listede yer alan bileşik ve fazların pikleri ile karşılaştırılmıştır. Piklerin uyuşması durumunda, numunedeki bileşik ve fazlar da saptanmıştır. Ayrıca, daha önce “2.2.4. Kireç-Puzolan Harçlarında Puzolanik Aktivitenin Kimyasal Yapısı” başlığında ele alınan, literatürde genel olarak kireç-puzolan tepkimelerinde belirlenmiş olan bileşik ve fazlar da aranmıştır. Bu bileşik ve fazlar şunlardır:

- Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H);
- Aft ya da etrenjit (etrenjit) ($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$);
- Hidrate tetra kalsiyum alüminat (C_4AH_x);
- AFm ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$);
- Hidrate gehlenit (C_2ASH_8);
- Hidrate kalsiyum karboalüminat ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$)

Genel olarak numunelerde, Aft ya da etrenjit (ettringite) yapılarına, hidrate tetra kalsiyum alüminat fazlarına rastlanmamış; sülfatlı yapı tespit edilemediğinden, AFm de bulunamamıştır.

Yapılan mineralojik analizler sonucunda, tüm numune grupları için temel reaksiyonun puzolan-silis tepkimesi olduğu anlaşılmıştır.

Numune analizlerinde tespit edilen kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yapılar için literatürde bulunan tüm bileşik ve fazlar incelenmiş; sonuçta, farklı kristal yapılar (monoklinik-ortorombik) ile karşılaşıldığından, genel olarak C-S-H olarak isimlendirilmiştir.

Bu çalışmada üretilmiş olan numunelerde, yukarıda formüle edilmiş olan hidrate gehlenit yapıdan atom sayıları itibarıyla farklılık gösteren ve farklı gehlenit stokiyometrisinde C-S-A-H fazları belirlenmiştir.

Hammadde içeriğinde mevcut olmasına karşın, genel olarak numune analizlerinde Al_2O_3 pikine rastlanmamıştır. Bu durum mevcut Al_2O_3 ün amorf yapıda olması ve/veya tepkimeye katılarak C-S-A-H oluşturması şeklinde yorumlanabilir.

Hidrate kalsiyum karboalüminat ($C_3A \cdot CaCO_3 \cdot 12H_2O$) ise, çok küçük miktarlarda olmak üzere $55^\circ C$ 'de 7 gün kürlenmiş katkısız numune (P-55-7) analizinde tespit edilmiştir.

Harca katkı maddelerinden dahil olan Na^{+2} ve Ca^{+2} iyonlarının silis ile tepkime verme eğilimi (afinite) diğer alkali tuzlara kıyasla daha yüksek olduğundan, katkı maddelerinin numunelere mukavemeti artırıcı yapıların oluşması yönünden katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

$55^\circ C$ 'de 7 gün kürlenmiş katkısız numunelerin analizinde 70° ve 80° civarında serbest, yani Al_2O_3 , CaO ya da harç karışımı bünyesindeki diğer bileşikler ile henüz tepkimeye girmemiş SiO_2 belirlenmiştir.

Aynı harcın 28 ve 91 gün kürlenmiş numunelerinde 70° de C-S-H ve 80° deki serbest SiO_2 miktarında azalma ve zamana bağlı olarak C-S-H oluşumları yanı sıra, $Ca(OH)_2$ miktarında azalma ve C-A-S-H yapılarında artma görülmektedir.

$55^\circ C$ 'de kürlenmiş katkısız numunelerin kürlenme sürelerinin artışıyla elde edilmiş olan P-55-7, P-55-28 ve P-55-91 numuneleri XRD analizi karşılaştırmasında farklı

bir bileşik ya da faz oluşumu görülmemiş; aynı yapıların oluşumlarının gelişim süreçleri belirlenmiştir.

55°C’de 28 gün kürlenmiş CaCl_2 katkılı numuneler (C-55-28) ile 55°C’de 28 gün kürlenmiş katkısız numunelerin (P-55-28) XRD analizi kıyaslamasında, farklı - yeni bir faz ya da bileşik oluşumu bulunamamıştır.

55°C’de 28 gün kürlenmiş Na_2SO_4 katkılı numunelerin (N-55-28) XRD analizinde, sülfatlı, bünyesinde Na ve Al içeren hidratlı, alçı benzeri bir bileşik tespit edilmiştir.

23°C’de 28 gün kürlenmiş katkısız numunelerin (P-23-28) XRD analizinde, serbest $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tespit edilmiştir. 23°C’de 28 gün kürlenmiş katkılı numunelere (C-23-28 ve N-23-28) kıyasla bu numune grubunda CaCO_3 tespit edildi.

C-23-28 kod no’lu numunenin analizinde, P-23-28’e kıyasla kristal simetri artmış, küçük pikler yok olmuştur.

Glauber tuzu oluşumundan kaynaklanan pikler belirlenmiştir. Bu pikleri şiddetleri küçük olmakla beraber, diğer reaksiyon piklerinin şiddetlerini de düşürmüştür.

4.2.12.2. Termogravimetrik analiz (DTA)

Ek Şekil B.6, 7, 8, 9, 10, 11’de yer alan termogravimetrik analiz (Differential Thermal Analysis) grafiklerinde mavi çizgi, DTA sinyallerini; siyah çizgi, sinyalleri ile elde edilen değerlerin türevini; kırmızı çizgi, ağırlık kaybını temsil etmektedir.

İncelenen 6 farklı numune grubu için genellenebilecek DTA analiz sonuçları şöyledir:

- 100-200°C’ arasında herhangi bir reaksiyon tespit edilememiştir;
- 400 °C’de kuvvetli bir endotermik reaksiyon belirlenmiştir;
- 900°C civarı müllit benzeri üçlü yeni bileşiklerin oluşumu belirlenmiştir.

400°C civarı, küçük oranlı endotermik C-S-H dehidratasyon reaksiyonu kaydedilmiştir. 600 °C civarı kaydedilen ikinci pik, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ parçalanmasıdır. 900°C civarı müllit benzeri üçlü yeni bileşiklerin oluşumu görülmektedir. Diğer numune DTA grafiklerinde de görülen bu oluşum P-55-28 kod’lu numunede en belirgin piki göstermektedir.

55°C’de 28 gün kürlenlen CaCl_2 katkılı, C-55-28 kod no’lu numune DTA grafiğinde 250-300 °C arasında iki adet endotermik reaksiyon belirlenmiştir.

280-310 °C civarı küçük endotermik dehidratasyon pikleri var. Bunlara karşı TG eğrisinde çok küçük ağırlık değişikliği görülmektedir.

350°C civarındaki endotermik reaksiyon piki C-S-H parçalanmasını; 400°C’deki endotermik reaksiyon piki C-S-H dehidratasyonu göstermektedir.

550°C’den sonraki endotermik reaksiyon piki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dehidratasyonunu gösterirken, bunu takip eden çizgi ise (ki bütün numune grafiklerinde görülmüştür) ekzotermik bir reaksiyon değildir.

800°C civarında görülen endotermik pik, CaCO_3 parçalanmasını göstermektedir; bu pik yalnızca bu numunede tespit edilmiştir. Bu reaksiyondan ötürü 700-800 °C arasındaki ağırlık kaybı oranı artmıştır.

55°C’de 28 gün kürlenlen Na_2SO_4 katkılı, N-55-28 kod’lu numunelerin DTA analizinde, 400°C’de C-S-H dehidratasyonu nedeniyle endotermik reaksiyon piki belirlenmiştir; bu reaksiyon, ağırlık değişimi olmadan yalnızca endotermik bir pik ile görülmektedir.

700°C’de bütün numunelerde görülen dehidrate C-S-H ayrışmasından endotermik reaksiyon piki görülmektedir.

Bu numunenin DTA analizinde, aynı katkılı ancak 23°C’de bekletilmiş olan N-23-28 kodlu numunelerde görülen 400 °C’deki glamber tuzu ve C-S-H parçalanma reaksiyonları pikleri görülmemektedir.

Katkısız, 23°C’de 28 gün bekletilen P-23-28 kodlu numunelerin DTA analizinde, 400°C civarı çift pik tespit edilmiştir. Bunlardan birincisi, XRD ile tam olarak tespit edilememesine rağmen sistemden gelen kükürtten kaynaklanan sülfat parçalanması; ikincisi ise, C-S-H dehidratasyonu olarak belirlenmiştir.

600°C civarı, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ parçalanması nedeniyle; 700 °C civarı ise dehidrate C-S-H ayrışması nedeniyle oluşan endotermik reaksiyon pikleri görülmektedir.

Bu numunede 900°C civarındaki müllit fazları çok az görülmektedir.

CaCl₂ katkılı, 23°C’de 28 gün bekletilen C-23-28 kodlu numuneler için, 800°C’de CaCO₃ parçalanma reaksiyonu, DTA piki net elde edilememesine rağmen ağırlık düşüşü ile anlaşılmaktadır.

Na₂SO₄ katkılı, 23°C’de 28 gün bekletilen N-23-28 kodlu numunelerde, 400°C civarında görülen birinci endotermik reaksiyon glamber tuzu (Na₂SO₄) parçalanması ve ikinci endotermik reaksiyon C-S-H parçalanması olarak belirlenmiştir. Bu iki reaksiyon sonucunda çok yüksek oranda ağırlık düşüşü görülmektedir. Ayrıca bu iki reaksiyon, aynı karışım özelliğinde ancak 55°C de kürlen (P-55-28) numunenin DTA grafiğinde görülmemiştir.

4.3. Deney Sonuçlarının İrdelenmesi

Bu başlık altında, yapılan taze harç ve sertleşmiş harç deneylerinin sonuçlarından yola çıkılarak neden-sonuç ilişkileri konu edilmiştir. Sertleşmiş harç deney sonuçları, malzemenin yapıda kullanılabilirliğinin belirlenmesi için boyutsal kararlılık, boşluk özellikleri ve dayanım özellikleri başlıkları altında incelenmiştir.

4.3.1. Taze harç deneyleri sonuçlarının irdelemesi

Taze harçta katkıların birim hacim ağırlığını katkısız harca oranla artırdığı; harcı kuru plastik kıvamdan daha plastik kıvama yaklaştırdığı belirlenmiştir. Dolayısıyla, katkılı harçların işlenebilme ve aderans özellikleri katkısız harca göre artmıştır.

Daha önce **Tablo 4.1**’de verilen taze harç kıvam değerleri, **Tablo 4.2**’de yeralan harç kıvamları değerlendirmesine göre, kuru-plastik niteliktedir. Bu kıvam değerleri ile tüm numune gruplarının iyi işlenebilir oldukları söylenebilir.

Tablo 4.2: Harç kıvamları ve akıcılık değerleri (Erdoğan, 2003)

harç kıvamı	akıcılık değeri (%)
aşırı kuru	...
çok kuru	...
kuru	0-20
kuru-plastik	20-60
plastik	60-90
akıcı	90-120

4.3.2. Sertleşmiş harç deneyleri sonuçlarının irdelenmesi

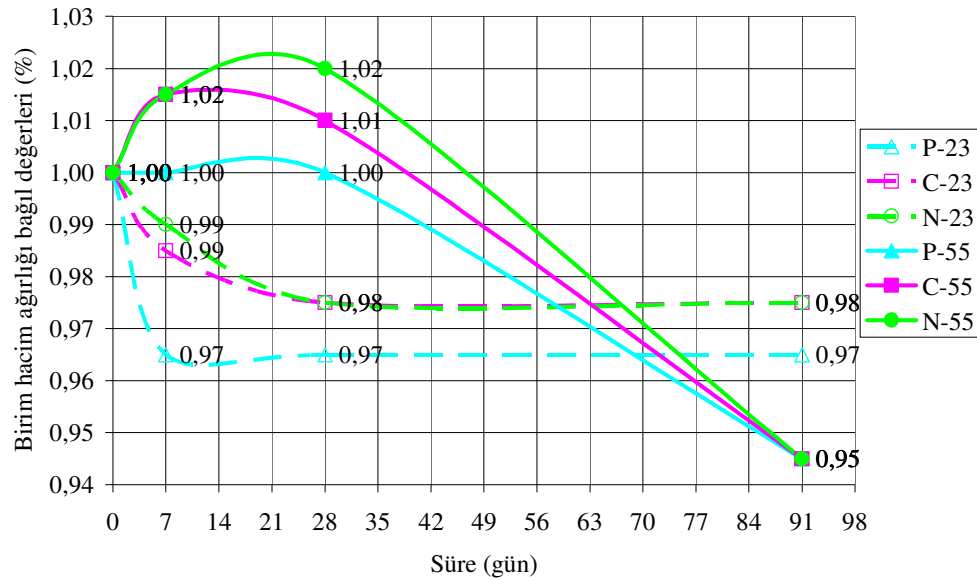
Sertleşmiş harç deneylerinin irdelenmesinde öncelikle boşluk durumunu belirleyici birim hacim ağırlığı, özgül ağırlık, porozite, su emme ve donma-çözülme deneyleri; ardından kararlılık durumuna ilişkin rötre; dayanım değişimini belirleyici basınç, ultrases dayanımları ve elastiklik modülü ile mikroyapıya ilişkin nitelikler ele alınacaktır.

4.3.2.1. Boşluk özellikleri

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, birim hacim ağırlığı her iki kürleme koşulunda da ilerleyen zamanla azalma eğilimindedir.

Kirecin karbondioksit ile tepkimeye girerek ürün olarak karbonatlaşma yanında su üretmesi ve ortaya çıkan suyun bünyeden uzaklaşmasıyla porozite oluşmaktadır. Diğer yandan, C-S-H jellerinin poroz yapı meydana getirmesi sonucunda birim hacim ağırlığında azalma görülmektedir.

Tüm deney numuneleri verileri **Tablo 4.3**’te yer alan malzemeler ile kıyaslandığında, birim hacim değerleri bakımında beton ile aynı değer aralığına; özgül ağırlık bakımından ise, tuğla ve yumuşak taşlardan daha düşük değerlere tekabül etmiştir.



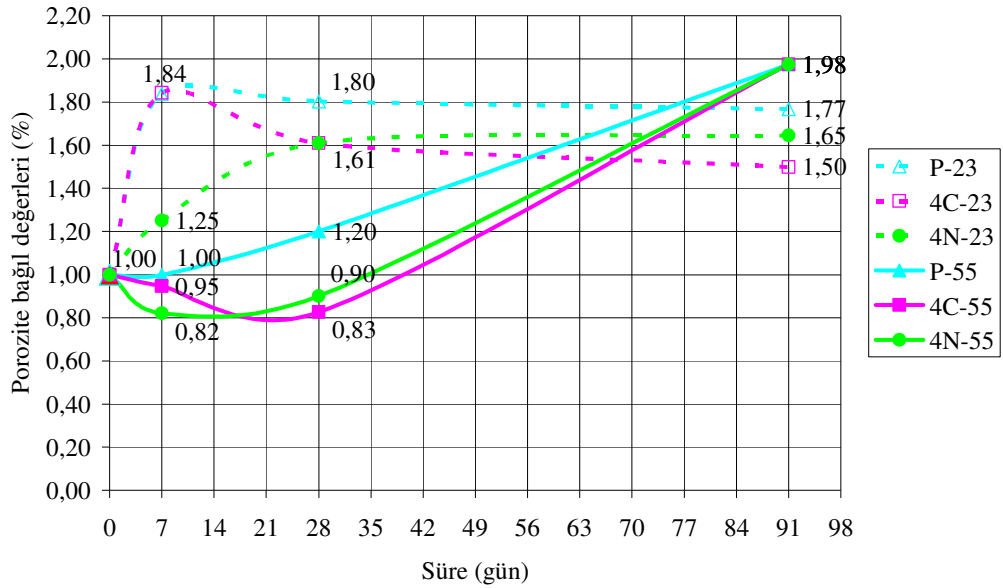
Şekil 4.18: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin birim hacim ağırlığı bağlı değerleri

Tablo 4.3: Bazı yapı malzemelerinin birim ve özgül ağırlıkları ile su emme değerleri (Kocataşkın, 2000)

malzeme	birim ağırlık (gr/cm ³)	özgül ağırlık (gr/cm ³)	su emme (%)
tuğla	1,2 - 1,8	2,5 - 2,7	8 - 18
sert taşlar	2,5 - 2,7	2,5 - 3,0	0 - 1
yumuşak taşlar	2,0 - 2,5	2,5 - 2,7	1 - 3
beton	1,8 - 2,4	[*]	1 - 8
ahşap	0,4 - 0,8	1,54	çok fazla
çelik	7,9	7,9	0

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi 55°C de kürlenen ve 23 °C ortam koşullarında bekletilen numunelerin porozite değerleri gelişiminde oransal olarak farklılıklar belirlenmiştir.

CaOH ın bir kısmı Puzolan ile reaksiyona girerken diğer bir kısmı ise karbonatlaşarak CaCO₃ meydana getirir. 55 C de polietilen bir muhafaza ile yalıtılarak kürlenen numunelere oranla 23 C de ortamda bekletilen numunelerin CO₂ ile tepkimeye girmeleri kolaylaşmıştır.



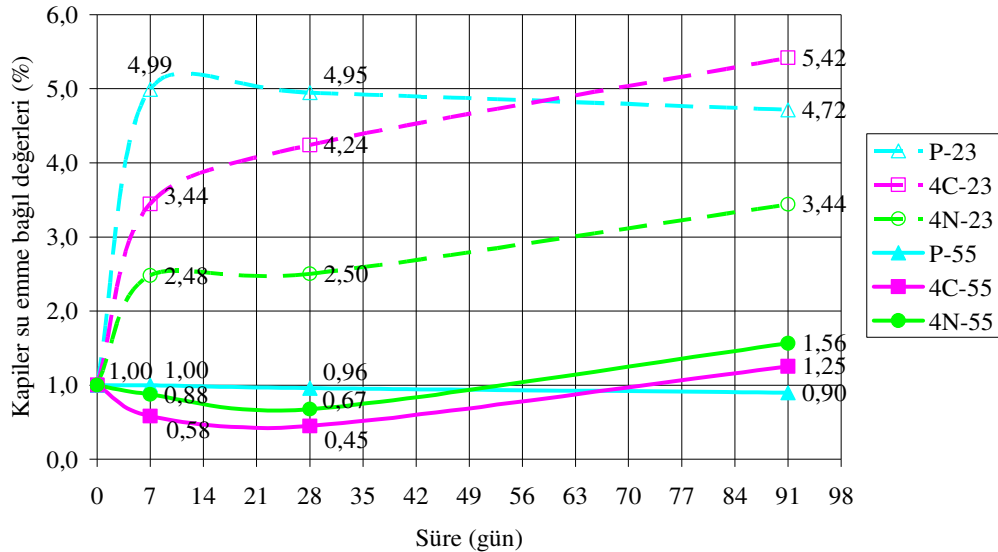
Şekil 4.19: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin porozite yüzdelilerinin bağlı değerleri

Arandigoyen ve diğ. (2006)'ne göre, karbonatlaşmayla birlikte malzemenin gerek gözenekliliği gerekse gözenek yapısı değişime uğrar. Gözenek boyutu 0,03 mikrondan küçük olan gözeneklerde bir azalma olur. Bu da kireç harçlarının özgül yüzey alanını düşürür. Porozite %10 civarında azalırken, gözenek boyu dağılımı daha küçük gözeneklere doğru değişim gösterir. Gözenek hacmi ile karbonatlaşan kalsiyum hidroksit oranı doğru orantılıdır.

Diğer yandan, **Cerny (2006)**, puzolanik tepkimenin ürünleri olan C-S-H jellerinin poroz karakterli olduğunu söylemektedir. Dolayısıyla, ilerleyen süre ile gelişen puzolanik tepkime porozite değerinde artışa neden olmuştur.

Katkı durumları aynı olan 23 °C ortamda bekletilen numunelerin, 55 °C'de kürlenmiş numunelerden daha yüksek kapiler su emme değerine sahip oldukları tespit edilmiştir (**Şekil 4.20**).

Mavi (2000)'ye göre, bağlayıcı/agrega oranı 1125/2700 olan katkısız kireç harcının kapilarite değeri ortalama 0,053 cm/ $\sqrt{\text{dk}}$ olduğu göz önüne alındığında 55°C de kürlenmiş numunelerin bu değerin altında olduğu görülmektedir. Bu çalışmada üretilen numunelerin Ek **Tablo A.1**'de verilmiş olan kapilarite katsayıları, **Tablo 4.4**'teki değerler ile karşılaştırıldığında yüksek oldukları görülmektedir.



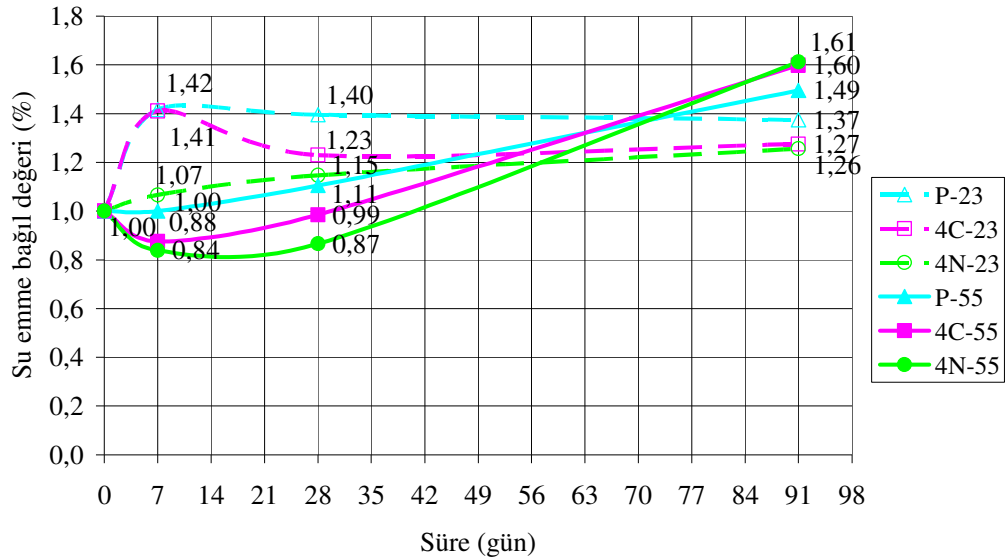
Şekil 4.20: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin kapiler su emme değerleri

Tablo 4.4: Bazı malzemelerin kapilarite katsayıları (Kocataşkın, 2000)

malzeme cinsi	geçirimlilik katsayısı (cm/sn)	kapilarite katsayısı (cm ² /sn)
taşlar	10 ⁻⁹ - 10 ⁻¹²	10 ⁻⁶ - 10 ⁻⁷
çimento hamuru	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶
beton	10 ⁻⁷	10 ⁻⁵
tuğla	-	10 ⁻⁴

Duvar bloğu için kapilaritenin yüksek olması, zemin suyunun çok yükseklerle çıkmasına neden olabilir; keza bina cephesinden yağmur sularının emilmesi ve uzun süre duvarların nemli kalmasında etkili olur. Kapiler suyun buharlaşması çiçeklenmeye (effloresans) neden olur.

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi, 91. gün sonunda 55°C de kürlen numunelerin 23 °C ortamda bekletilenlerden daha yüksek su emme özelliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Kapiler su emme deneyinde ise bu durumun tersi sözkonusudur. O halde, 23 °C ortamda bekletilen numunelerin boşluk hacimlerinin 55°C de kürlen numunelerden daha küçük olduğu ve kapiler basıncın yüksek olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.21: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkı numunelerin su emme değerleri

Su emme deneyi sonucunda her iki kürlleme koşulunda da sodyums lfatlı numunelerin gözle muayenede dağılma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

Her iki k r koşulundaki katkısız ve katkılı numunelerin zamanla su emme ve porozite gelişimi benzer eğilimg stermiştir. Birim hacim ağırlığının da zamanla düşmesi, numune bünyesindeki boşluk gelişimi ile orantılıdır.

Katkısız ve katkılı 3 numune grubu için de 7 ve 28. günlerde 23  C de kürlenen numuneler daha yüksek su emme değeri gösterirken, 28. günden sonra bu durum değişmiş; 91. güne ulaşıldığında 55 C de kürlenen numunelerin daha yüksek su emme değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Su emme değerindeki bu yükseliş, 55 C de kürlenen numunelerde C-S-H yapılarının gelişimiyle oluşan porozite artışından kaynaklanmıştır.

Donma- z lme deneyinde de su emme deneyinde olduğu gibi sodyumsülfat katkılı numuneler her koşul ve sürede en az dayanıklılığı göstermiştir. Kalsiyum klorür ise katkısız numuneye kıyasla, daha düşük su emme katsayısı ve donma- z lme deneylerinde daha geç dağılmıştır.

Bilindiği gibi hacimsel su emme (görünür porozite) değerinin poroziteye oranı, cismin doyma derecesini gösterir. Doyma derecesi, numune içerisindeki boşlukların dışarıya açık ya da kapalı olmasına dair bilgi verir. Doyma derecesinin %80 ve altında olması durumunda, numune boşluklarına giren su, donduktan sonra %10 oranında genişlese dahi malzemede bozulma olmaz. Ancak, bu hesaplamalar ışığında, bu çalışmada üretilen numunelerin %80'den büyük olduğu görüldü. Nitekim yapılan donma- z nme deneyi sonuçlarında donmaya dayanıklı numune olmamıştır.

Bilindiği gibi, numunelerin buhar geçirgenlik direnç faktörü porozite-kompasite ile yani malzemenin boşluk-doluluk oranıyla ilişkilidir. Malzemelerin porozite oranı arttıka buhar geçirgenlik direnç faktör değeri azalır. Deney numuneleri içinden kalsiyum klorür katkılı numune, en yüksek buhar difüzyon direnç katsayısını vermiştir. Bu durumda, katkı olarak kullanılan kalsiyum klorürün nem tutucu özelliğinin etkili olabileceği d ş n lmektedir.

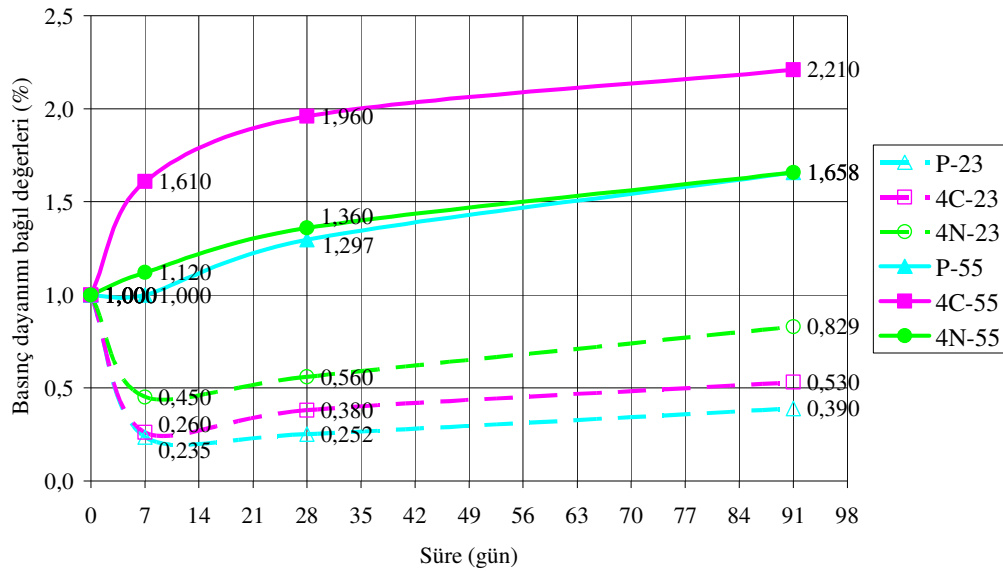
4.3.2.2.Kararlılık

Rötre değerleri irdelendiğinde, tüm numune türlerinde rötre olduğu belirlenmiştir. Rötre ölçümlerinin yapıldığı tüm zamanlarda bütün numune grupları içinde en yüksek rötreyi 23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numuneler göstermiştir.

28. günün sonunda, 55°C’de kürlenene katkısız, kalsiyumklorür katkılı ve sodyumsülfat katkılı numunelerin rötre değerleri, 23°C’de bekletilen katkısız ve kalsiyumklorür katkılı numunelerden yüksek çıkmıştır. Bu çalışmadaki rötre değerleri, **Mavi (2000)**’nin çalışmalarında katkısız kireç harcı rötre değerleri ile kıyaslandığında, 23°C’de bekletilen sodyumsülfat katkılı numune diğer tüm numunelerin daha az rötre yaptığı görülmüştür.

4.3.2.3. Dayanım özellikleri

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi, 23°C’de bekletilen numunelerde 7-28 ve 91 günlük tüm kür sürelerinde sodyumsülfat katkılı numuneler en yüksek, kalsiyum karbonat katkılı numuneler ise ikinci yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Alkali katkıları bu numunelerde kirecin higroskopik, nem emici özeliğini artırıp karbonatlaşmasını kolaylaştırmıştır.



Şekil 4.22: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanımı bağıl değerleri

Cerny ve diğerlerinin (2006) tamir harçları üzerine yaptığı çalışmada kireç harcının basınç dayanımı 7 gün sonunda 0,97 MPa, 28 gün sonunda 1,11 MPa bulunmuştur. Bu çalışmada elde edilen 23°C’de bekletilmiş katkısız ve katkılı numunelerin basınç dayanım değerleri bahsi geçen çalışmadan daha yüksek bulunmuştur.

Maravelaki ve diğerlerinin (2005) tamir harçları üzerine yaptığı çalışmada geliştirdikleri puzolanik tamir harcının basınç dayanımı 1 ay sonunda 3,48 N/mm² ve 1 yıl sonunda 5,67 N/mm² olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada kalsiyumklorür ve sodyumsülfat katkılı numune gruplarının 28 ve 91 günlük basınç dayanımlarının bahsi geçen çalışmadan daha yüksek sonuçlar verdiği, ancak katkısız numune grubunun daha düşük sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Tarihi yapıların onarımında ve konservasyon çalışmalarında, orijinaline en benzer bileşimde harçların kullanılması ve orijinal uygulama yöntemine uyulması gerekliliğiyle birlikte, bu çalışmada üretilmiş olan katkısız, kalsiyumklorür katkılı ve sodyumsülfat katkılı harçların restorasyon amaçlı tamir harcı olarak kullanılmalarının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

55°C kürlemede ise, 7-28 ve 91 günlük tüm kür sürelerinde kalsiyumklorür katkılı numuneler en yüksek basınç dayanımını sağlarken sodyumsülfat katkısı 7 ve 28. günlerde ikinci yüksek basınç dayanımını sağlamış; 91. günde katkısız numune ile eşit değer vermiştir. Bu durumda, sodyumsülfat katkısının dayanımı artırıcı değil, ilk dayanım değerine ulaşmayı hızlandırıcı etkisi olduğu kanaatine varılmıştır.

55°C kürlemede koşullarında, su ile iyonlaşan alkaliler yani, kalsiyumklorür ve sodyumsülfat katkılarındaki Ca⁺⁺ ve Na⁺, silikat tepkimesinin silisik asit evresinde Si(OH)⁻₅ ve Si(OH)⁻₆ nın nötrleşmesi ve kalsiyum silikatların oluşmasını sağlayarak dayanımı artırmıştır.

Bu çalışmada üretilmiş numune gruplarına ait basınç dayanımlarının tuğla, doğal taş, beton blok, gaz beton ve çimento harcı ile kıyaslamaları, bu malzemenin kullanım olanaklarına dair fikir verebilir (**Tablo 4.5**). Her iki kür koşulunda da elde edilen numunelerin basınç dayanımları, kireç harcı için tanımlı asgari 0,5 MPa’dan daha yüksek bulunmuştur.

Diğer yandan, **Tablo 4.5, 6, 7, 8, 9**’da yer alan basınç dayanımı değerleri göz önüne alındığında, 23°C’de bekletilen katkısız ve katkılı numunelerin tuğla, doğal taş,

beton blok, gaz beton ve çimento harcı olarak kullanılmaları için basınç dayanımını sağlayamadığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4.5: Fabrika tuğlalarının hacim ağırlığı ve basınç dayanım değerleri (TS 705, 1985)

Tuğla sınıfı	Tipi	Tuğla Sembolleri	Basınç Dayanımı		Hacim ağırlığı (kg/m ³)		Delik oranı %
			ortalama (N/mm ²)	min. (N/mm ²)	max	min	
Dolu Tuğla	2000 kg/m ³	2,0 / 240	240 (23,5)	190 (18,6)	2000	1801	15
		2,0 / 180	180 (17,6)	145 (14,2)			
		2,0 / 120	120 (11,8)	95 (9,3)			
	1800 kg/m ³	1,8 / 220	220 (21,6)	175 (17,2)	1800	1601	
		1,8 / 150	150 (14,7)	120 (11,8)			
		1,8 / 100	100 (9,8)	80 (7,8)			
Seyrek delikli tuğla	1600 kg/m ³	1,6 / 220	220 (21,6)	175 (17,2)	1600	1401	20
		1,6 / 150	150 (14,7)	120 (11,8)			
		1,6 /100	100 (9,8)	80 (7,8)			
	1400 kg/m ³	1,4 / 200	200 (19,6)	160 (15,7)	1400	1201	25
		1,4 / 120	120 (11,8)	95 (9,3)			
		1,4 / 80	80 (7,8)	65 (6,4)			
Az delikli tuğla	1200 kg/m ³	1,2 / 150	150 (14,7)	120 (11,8)	1200	1001	35
		1,2 / 100	100 (9,8)	80 (7,8)			
		1,2 / 60	60 (5,9)	45 (4,4)			

55 °C’de kürlenene katkısız, kalsiyumklorür ve sodyumsülfat katkılı numuneler 91. günde, gaz beton yapı bloğu türleri için tanımlanmış ortalama en küçük basınç dayanım değerlerini sağlarken, beton blok ve briket için tanımlanan değerleri yalnızca kalsiyumklorür katkılı numune grubu sağlayabilmektedir. Numune gruplarının hiçbiri, tuğla ve doğal taş kagir duvar için verilen basınç dayanım değerlerini sağlayamamaktadır.

Numunelerin yapı harcı olarak değerlendirilebilmeleri amacıyla basınç dayanım değerlerinin, **Tablo 4.9**’da verilmiş olan harç çimentosu basınç dayanım değerleriyle karşılaştırılması gerekli görülmüştür. Buna göre, 23 °C ortam koşullarında kürlenene

28 günlük numunelerden en yüksek dayanım değerini veren sodyumsülfat katkılı harcın basınç dayanımı (5,47 N/mm²), harç çimentoların en düşük dayanım sınıfını oluşturan MC 5'in alt limit değeri sağlamaktadır.

Tablo 4.6: Doğal duvar taşlarının dayanım gruplarına göre en küçük basınç dayanımları (TS 2510, 1977)

Dayanım Grubu	Taş Cinsleri	En Küçük Dayanım Kgf/cm ²
I	Kireçtaşı, (kalker) traverten, kireç bağlayıcılı kumtaşı	350
II	Yoğun kireçtaşı, dolomit, bazalt	500
III	Silis bağlayıcılı kumtaşı grovak vb.	800
IV	Ganit, siyenit, diorit, melafir, diabaz vb.	1200

Tablo 4.7: Beton blok ve briket basınç mukavemeti (TS 406, 1988)

Türler	Basınç Mukavemeti Değeri	
	Ortalama (min) kgf/cm ² (N/mm ²)	En Küçük Değer (min) kgf/cm ² (N/mm ²)
BB2	25 (2,5)	20 (2,0)
BB4	50 (5,0)	40 (4,0)
BB6	75 (7,5)	60 (6,0)
BB12	150 (15,0)	120 (12,0)

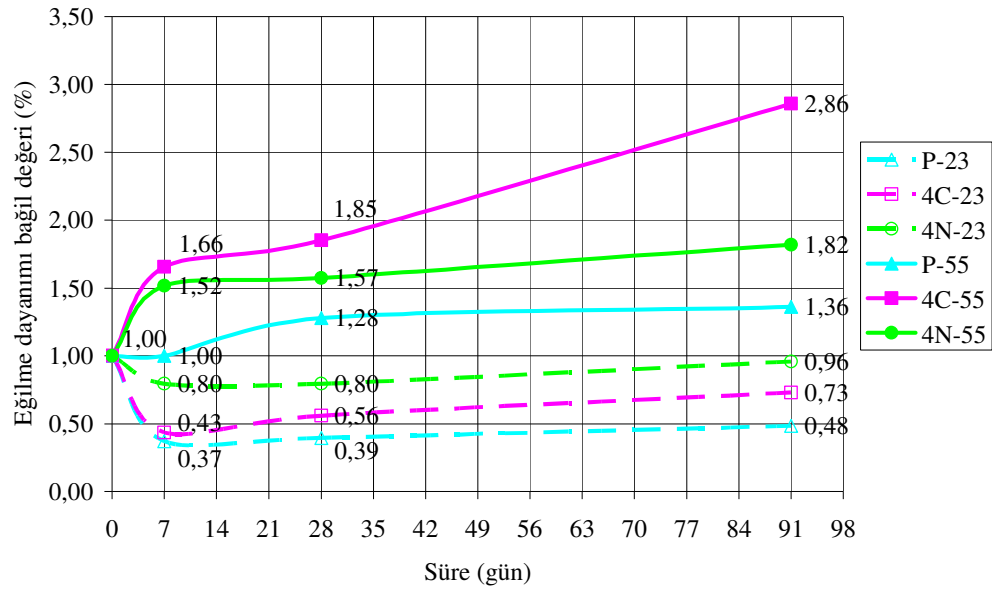
Tablo 4.8: Gazbeton yapı elemanlarının sınıflarına göre basınç dayanımları (TS 453, 1988)

Sınıfı	Ortalama en küçük basınç dayanımı değeri N/mm ²	En küçük basınç dayanımı değeri N/mm ²	Kuru yoğunluk kg/m ³	Ortamala kuru yoğunluk kg/m ³	Sınıf işareti
G2	2,5	2,0	400	310 ile 400	G 2/0,4 (G 2/400)
			500	410 ile 500	G 2/0,5 (G 2/500)
G3	3,5	3,0	500	410 ile 500	G 3/0,5 (G 3/500)
			600	510 ile 600	G 3/0,6 (G 3/600)
G4	5,0	4,0	600	510 ile 600	G 4/0,6 (G 4/600)
			700	610 ile 700	G 4/0,7 (G 4/700)
G6	7,5	6,0	700	610 ile 700	G 6/0,7 (G 6/700)
			800	710 ile 800	G 6/0,8 (G 6/800)

Tablo 4.9: Harç çimentosu basınç dayanım değerleri (TS 22-1 ENV 413-1)

Tip	7 Günlük Basınç Dayanımı N/mm2	28 Günlük Basınç Dayanımı N/mm2	
MC 5	-	≥ 5	≤ 15
MC 12,5 MC 12,5 X	≥ 7	$\geq 12,5$	$\leq 32,5$
MC 22,5	≥ 10	$\geq 22,5$	$\leq 42,5$

Şekil 4.23'te yeralan eğilme dayanımı bağıl değerleri, **Şekil 4.22**'deki basınç dayanımı bağıl değerleri ile benzerlik göstermektedir. 23°C'de bekletilen numunelerde 7-28 ve 91 günlük tüm kür sürelerinde sodyumsülfat katkılı numuneler en yüksek, kalsiyum karbonat katkılı numuneler ise ikinci yüksek basınç dayanımını göstermiştir.

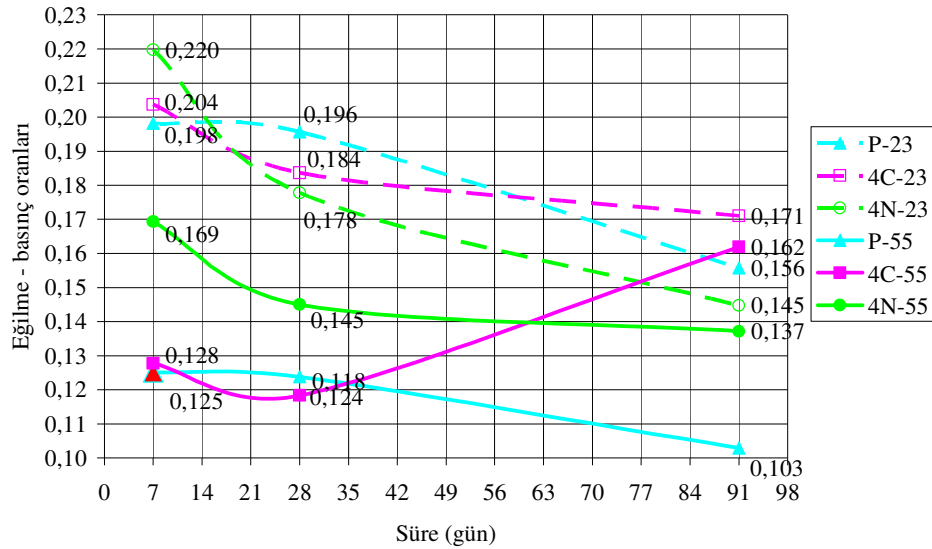


Şekil 4.23: Farklı kür koşullarında, 7-28 ve 91 günlük, katkısız ve katkılı numunelerin eğilme dayanımı bağıl değerleri

55°C kürlemede ise, 7-28 ve 91 günlük tüm kür sürelerinde kalsiyumklorür katkılı numuneler en yüksek basınç dayanımını sağlarken sodyumsülfat katkısı 7 ve 28. günlerde ikinci yüksek basınç dayanımını sağlamış; 91. günde katkısız numune ile eşit değer vermiştir.

Numunelerin eğilme dayanımı/basınç dayanımı oranı değişimi **Şekil 3.24**'te yeralmaktadır. Kırılgan malzemelerde bu oranın 0,1 olduğu göz önüne alındığında, 55°C de kürlenlen 91 günlük numunenin kırılman olduğu söylemek mümkündür.

Elastiklik modülü değerleri, 23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerden katkısız ve kalsiyumklorür katkılı numunelerin elastiklik modüllerinin zamanla artış, bu koşullarda kürlenlen sodyumsülfat katkılı numuneler ile 55°C de kürlenlen numunelerin azalma göstermiştir. Katkısız kireç harçlarının elastiklik modülü değeri 5,2-11 kN/mm² arasındadır. Buna göre 23°C ortam koşullarında bekletilen katkısız ve katkılı numuneler uygun değer göstermişlerdir. 55°C de kürlenlen numunelerin ise, daha yüksek değerlere sahip olmaları nedeniyle rijit malzeme oldukları söylenebilir. Mineralojik yapılar incelendiğinde, harca katkı maddelerinden dahil olan Na⁺ ve Ca⁺ iyonlarının silis ile tepkime verme eğilimi (afinite) diğer alkali tuzlara kıyasla daha yüksek olduğundan, katkı maddelerinin numunelere mukavemeti artırıcı kalsiyum silikat yapıların oluşması yönünden ve kirecin higroskopik, nem emici özelliğini artırıp karbonatlaşmasını kolaylaştırmıştır katkı sağladığı belirlenmiştir



Şekil 4.24: Eğilme-basınç dayanımları oranları

23 °C ortam koşullarında bekletilen sodyumsülfat katkılı numunelerde glamber tuzu; 55°C de kürlenlen sodyum sülfat katkılı numunelerde alçı benzeri bileşik oluşumu gözlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, giriş bölümünde de açıklandığı gibi, sürdürülebilirlik bağlamında kireç harcının yapısal kullanımının yaygınlaştırılması ve perlitin geliştirilmeden, puzolanik özeliğinden yararlanılarak kullanılması olanaklarının araştırılarak kullanımının yaygınlaştırılmasıdır.

Deneye dayalı bu araştırma ile elde edilen bulgular ve bu bulguların değerlendirilmesi sonucunda, amaca uygun nitelikte yapı bloğu ve harç elde edilebildiği saptanmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuç bulgular şöyledir:

Perlitin puzolanik aktivitesi, TS 25'te tanımlı deneyler gerçekleştirilerek ispatlanmıştır.

Puzolanik aktiviteyi artırma amacıyla, farklı puzolan/bağlayıcı oranı, perlit dane boyutu, su/bağlayıcı oranı ile sönmemiş kirecin bağlayıcı olarak kullanılması etkenleri araştırılmıştır. Bunun sonucunda, TS25'te tanımlı kireç/puzolan oranı olan 1:2; su/bağlayıcının %50 ve bağlayıcı olarak sönmüş kireç kullanılmasının en uygun sonucu verdiği belirlenmiştir

Kür sıcaklığının artırılıp azaltılması denenmiş, yine TS 25'te belirtilen 55°C nin en uygun kür sıcaklığı olduğu bulunmuştur.

Bu karışım özellikleri ve kür koşullarıyla harcın puzolanik aktivitesini artırmak için kalsiyum klorür ve sodyumsülfat katkılarının etkileri araştırılmış ve dayanım değerlerinde olumlu gelişmeler gözlenmiştir.

Numunelerin üretimindeki enerji girdisini azaltmak maksadıyla harç numunelerinin 23°C ortam koşullarında ulaşabilecekleri dayanım araştırılmış, katkıların bu grup üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

55°C de eğilme ve basınç dayanım değerlerine göre en iyi sonuçları veren katkısız ve katkılı numune harçları ile 23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerin su karşısındaki davranışları incelenmiştir.

55°C de kürlenmiş numunelerde 91 gün sonunda katkısız ve katkılı numunelerin aynı porozite miktarına sahip oldukları; su emme deneyi sonunda bu boşlukların açık gözenekler olduğu ve en fazla su emiciliği sodyumsülfat katkılı, ikinci olarak kalsiyumklorür katkılı numunelerin gösterdikleri, kapiler boşluk için de aynı numune sıralamasının geçerli olduğu belirlenmiştir. Numunelerin açık gözeneklerinin fazlalığı nedeniyle bünyelerine aldıkları suyun donması durumunda iç gerilmelere dayanamadıkları ancak, numuneler içinde kalsiyumklorür katkılı olanın sodyumsülfat katkılı ve katkısız oranla daha dayanıklı olduğu görülmüştür. Boyutsal kararlılıkta, sodyumsülfatın en çok, kalsiyumklorürün ikinci olarak rötre yaptıkları belirlenmiştir. Katkısız numuneye göre kalsiyumklorür katkılı numunenin daha çok, sodyumsülfat katkılı numunenin ise daha az buhar difüzyonuna olanak verdiği belirlenmiştir.

Basınç ve eğilme dayanımlarında 7 ve 28. günlerde kalsiyumklorür katkılı numuneler en yüksek, sodyumsülfat katkılı numuneler ise ikinci yüksek değerleri vermiştir. Ancak, 91. günün sonunda katkısız numune ile sodyumsülfat katkılı numunelerin basınç dayanımlarının aynı olduğu görülmüştür. Bu durumda, sodyumsülfat katkısının, dayanım artırıcılıktan ziyade, erken dayanımları artırarak geç dayanıma ulaşımı hızlandırıcı özelliği olduğu söylenebilir.

55°C de kürlenmiş numuneler ile elde edilen sonuçlar, bu numunelerin içyapı tuğlası için gerekli koşulları yerine getirdiğini göstermektedir.

23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerde öncelikle yüzeyde oluşan karbonatlaşma tepkimelerine bağlı olarak bünyedeki suyun buharlaşmasının önlenmediği düşünülmektedir. Katkısız numuneler en yüksek, sodyumsülfat katkılı numuneler ikinci yüksek porozite değerini göstermiştir. Gözenek hacmi ile karbonatlaşan kalsiyum hidroksit oranının doğru orantılı olması ve karbonatlaşmanın sonucu olarak gözenek boyu dağılımının daha küçük gözeneklere doğru değişim göstermesi nedenleriyle, 23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerde 55°C de kürlenmiş numunelerden daha yüksek kapiler su emicilik görülmüştür. 23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerde kalsiyumklorür katkılı numuneler en yüksek, katkısızlar ikinci yüksek, sodyumsülfat katkılılar ise en düşük kapiler su emme değerini göstermiştir. Yine sözü edilen karbonatlaşma tepkimesi sonuçlarıyla ilişkili olarak, su emme değerleri, 55°C de kürlenmiş numunelerden düşük bulunmuştur.

23°C ortam koşullarında bekletilen numunelerde katkısız numuneler en yüksek, kalsiyumklorür katkıları ikinci yüksek, sodyumsülfat katkıları ise en düşük su emme değerini göstermiştir.

Boyutsal kararlılıkta, sodyumsülfatın en çok, katkısız numunelerin ikinci olarak, kalsiyumklorür katkıları numunelerin ise en az rötre yaptıkları belirlenmiştir.

Basınç ve eğilme dayanımlarında sodyumsülfat katkıları numune en yüksek, kalsiyumklorür katkıları numune ikinci yüksek, katkısız numune ise düşük değerleri vermiştir. Katkılar numunelerde kirecin higroskopik, nem emici özeliğini artırıp karbonatlaşmasını kolaylaştırmıştır.

Basınç dayanımı yüksek olmasına rağmen dışa açık boşlukların kapalı boşluklardan fazla olması ve dolayısıyla su emiciliğinin yüksek olması nedeniyle donmaya karşı yeterli dayanıklılığı gösterememiştir.

Dayanım ve boşluk yapıları kıyaslaması ve değerlendirmeleri sonucunda, katkısız, kalsiyumklorür katkıları ve sodyumsülfat katkıları harçların restorasyon amaçlı tamir harcı olarak kullanılmalarının mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmadan daha ileri için öneriler şöyledir:

Bu çalışmadaki deney sonuçlarının, puzolanik aktiviteyi artırıcı diğer yöntemler (mekanik ve ısı aktivasyonu gibi) ile elde edilecek sonuçlar ile kıyaslanması araştırılabilir.

Perlitin puzolanik özeliği nedeniyle çimento katkısı olarak kullanılması durumunda, katkıların etkileri araştırılabilir.

Numunelerin ısı geçirgenlik özellikleri, su içinde kürlenmesiyle özelliklerinin gelişimi, sodyumsülfat çözeltisi içindeki gelişimi araştırılabilir.

Ayrıca, su itici ve akışkanlaştırıcı katkıların, numunelerin özelliklerini ne yönde etkileyeceği araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- ACI**, 1990. ACI Committee 226. Report, Use of Fly Ash in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, Michigan.
- ACI**, 1994. ACI Committee 232 Report, Use of Natural Pozzolans in Concrete, ACI Mater. J 91 (4) pp: 410-426, Michigan.
- Akgül, E.**, 2006. Datça Bölgesindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Akman, S.M.**,1973. Yapı Malzemesi Ders Notları; s.12-22, İstanbul Teknik Üniversitesi Baskı Atölyesi
- Akman S.M.**,1987. Yapı Malzemeleri; s.5,110; İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası
- Akman S.M.**,2003. Yapı Malzemelerinin Tarihsel Gelişimi; *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, **426**, 30-36.
- Aköz, F., Yüzer, N., Çakır, Ö., Kabay, N., Kızılkant, A. B. ve Özçiftçi N.**, 2005. Temel Yapı Malzemesi Deneyleri; Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Arandigoyen, M., Bicer-Simsir B., Alvarez, J.I. and Lange, D.A.**, 2006. Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes, *Applied Surface Science* **252**, 7562-7571.
- ASTM C-618**, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, *American Standards and Testing Methods*, US.
- Benton, E. J.**, 1962. Cement-Pozzolan Reaction, *Bulletin of Highway Research Board*, **239**, 56-65
- Boynton, R.S.**, 1980. Chemistry and Technology of Lime and Limestone, John Wiley & Sons, New York.
- Bulgu, M.**, 2003. Perlitin Çimentoda Puzolanik Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Böke, H., Akkurt, S. ve İpekoğlu, B.**, 2004. Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasa Harcı ve Sıvalarının Özellikleri; *Yapı Dergisi*, **269**, 90-95.
- Cerny, R., Kunca, A., Tydlit, V., Drchalova, J. and Rovnanikova, P.**, 2006. Effect of Pozzolan Admixtures on Mechanical, Thermal and Hygric Properties of Lime Plasters, *Construction and Building Materials*, **20**, 849-857.
- Cowper, A.D.**, 1998. Lime and Lime Mortars, Donhead Publishing, Trowbridge.

- DTP**, 1996. Çimento Hammaddeleri ve Yapı Malzemeleri, *DTP Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı Özel İhtisas Komisyonu Raporu*, **2**, 55-59, Ankara.
- Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M. and Erdoğan, T.Y.**, 2007. Use of Perlite as a Pozzolan Addition in Producing Blended Cements, *Cement & Concrete Composites*, **29**, 13-21.
- Erdoğan, T.Y.**, 2003. Beton, METU Press, Ankara.
- Eriç, M.**, 1992. Yapıda Sıva Uygulamaları ve Sorunları, *İnşaat Dergisi*, **Temmuz**, 70-73.
- Eriç, M.**, 1994. Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Ersen, A. ve Güleç, A.**, 1991. Geleneksel Harçlar Konusunda Bir Araştırma: Tahtakale Hamamı, *Taş Vakfı Yıllığı*, **1**, 56-75, İstanbul.
- Güzel, A.**, 1993. Ponza Katkılı Tuğla Üretimi ve Bu Tuğlaların Mekanik ve Boşluk Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Helmuth, R.**, 1983. Some Questions Concerning ASTM Standarts and Methods of Testing Fly Ash for Use with Portland Cement, *Cement, Concrete and Aggregate*, **5**, 103-110.
- Higginson, E.C.**, 1970. The Effect of Cement Fineness on Concrete, Fineness of Cement, **473**, American Society for Testing and Materials, 71-81.
- Hossain, K.M.A.**, 2004. Potential Use of Volcanic Pumice as a Construction Material, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, **November-December**, 573-577.
- Kocataşkın, F.**, 2000. Yapı Malzemesi Bilimi Özellikler ve Deneyler, Beşinci Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Koçu, N.**, 1997. Konya Çevresindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Larew, H.G.**, 1976. The Use of Volcanic Ash Compounds for Construction Projects in Iceland, Report No. CE-3447-101-76, pp: 14, Department of Civil Engineering, University of Virginia.
- Lea, F.M.**, 1974. The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd Edition, Edward Arnold.
- Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., and Kilikoglou, V.**, 2005. Hydraulic Lime Mortars for the Restoration of Historic Masonry in Crete, *Cement and Concrete Research*, **35**, 1577-1586.
- Massaza, F.**, 1989. Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları Semineri, 1-28, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Mavi, Ö.**, 2000. Kireç Harç ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Mazlum, F.**, 1989. Piriç Kabuğu Külünün Puzolanik Özellikleri ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri

Enstitüsü, İstanbul.

- Mehta, P.K., 1986;** Concrete- Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall Inc.
- Mielenz, R.C., Grene, K.T. and Schieltz, N.C., 1951.** Natural Pozzolans for Concrete, *Economic Geology*, **46**, 311-328.
- Mielenz, R.C., Witte, L.P. and Glantz O.J., 1949.** Effect of Calcination on Natural Pozzolans, *Proceedings of Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes*, 43-91, San Francisco.
- MTA, 1985.** Türkiye Perlit Envanteri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, **193**, 1-8, Ankara.
- Nanjing Institute of Chemical Technology (NICT), 1989.** Cement Technology, Chinese Construction Pres, Beijing.
- Neville, A. M., 1997.** Properties of Concrete, Pitman Publishing, London.
- O'Conner, T.L. and Greenberg, S.A., 1958.** The Kinetics for the Solution of Silica in Aqueous Solutions, *Journal of Physical Chemistry*, **65**, 1195-1198.
- Okucu, A., 1998.** Bigadiç ve Turnatepe (Balıkesir) Yörelerindeki Zeolitik ve Perlitik Tüflerin Puzolanik Özellikleri, *Doktora Tezi*, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Önem, Y., 2000.** Sanayi Madenleri, Kozan Ofset Mat. San. ve Tic. Ltd. Şti, Ankara, syf: 230-236
- Öz, U. ve Urhan S., 1993.** Puzolanik Malzemelerdeki Çözünmeyen Kalıntı - Puzolanik Aktivite Karşılaştırması, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, **30/ 311**, 1-3, Ankara.
- Özcan, M., 1997.** Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Beton Özelliklerine Etkisi ve Etkinlik Katsayılarının Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Papayianni, I., Stefanidou, M., 2005.** Strentgh-Porosity Relationship in Lime-Pozzolan Mortars; *Construction and Building Materials*, ?.
- Postacioğlu, B., Çakıroğlu, N. ve Ortabaşı, N., 1960.** Kayseri Puzolanları; İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Araştırmaları Kurumu, İstanbul.
- Postacioğlu, B., 1986.** Bağlayıcı Maddeler, Beton, **1**, İTÜ İnşaat Fakültesi Yayınları, İstanbul.
- Regourd, M., 1980.** Structure and Behaviour of Slag Portland Cement Hydrates, *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements*, **I**, 11-26, Paris.
- Rodriquez-Navarro, C., Hansen, E. and Ginell, W.S., 1998.** Calcium Hydroxide Crystal Evolution upon Ageing of Lime Putty, *Journal of the American Ceramic Society*, **81**, 3032-3034.
- Roy, D.M. and Idorn, G.M., 1985.** Relationships Between Strength, Pore Structure and Associated Properties of Slag-Containing Cementitious Materials, *Proceedings of Materials Research Society*, **42**, 133-142.
- Sersale, R., 1980.** Structure and Characterisation of Pozzolanas and of Fly Ashes,

Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, 4-18, Paris.

- Shi, C.**, 1992. Activation of Natural Pozzolans, Fly Ashes and Blast Furnace Slag, *PhD Thesis*; The University of Calgary, Canada.
- Shi, C. and Day, R.**, 2000. Pozzolanic Reaction in the Presence of Chemical Activators Part I Reaction Kinetics, *Cement and Concrete Research* **30**, 51-58.
- Shi, C.**, 2001. Studies on Several Factors Affecting Hydration and Properties of Lime-Pozzolan Cements, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **November-December 2001**, 441-445
- Shi, C. and Day, R.**, 2001. Comparison of Different Methods For Enhancing Reactivity of Pozzolans, *Cement and Concrete Research*, **31**, 813-818.
- Shi, C., Wu, Y., Riefler, C. and Wang, H.**, 2005. Characteristics And Pozzolanic Reactivity of Glass Powders, *Cement and Concrete Research*, **35**, 987-993.
- Smith, R. C. and Andreas, C.K.**, 1979. Materials of Construction, McGraw-Hill, New York.
- Tanaçan, L.**, 1993. Hafif Duvar Tuğlası Üretiminde Perlit ve Bazı Katkıların Etkilerinin Araştırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tanaçan, L. and Akgül E.**, 2005. The Pozzolanic Activity of Datça Earth and Perlite, *3th International Conference Ecomaterials*, Connecting Science: with The Grassroots; Cuba.
- Taşkın, C.**, ? Türkiye Çimento Hammaddesi Kaynakları, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara.
- Tonak, T., Atay, Y. ve Ertürk, F.**, 1989. Traslarda Kimyasal Metodlarla Süratli Puzolanik Aktivite Tayini, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*; **26/ 261**, Mart; Ankara.
- Tonak, T., Atay, Y. ve Ertürk, F.**, 1991. Diatomit Atıklarının Çimento Endüstrisinde Kullanılabilirliği ve Sağladığı Tasarruflar, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, **28/291**, Eylül; Ankara.
- Toydemir, N.**, 1978. Pişmiş Toprak Yapı Malzemesinin Rasyonel Üretim Olanaklarının Araştırılması, *Doçentlik Tezi*, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi, İstanbul.
- Toydemir, N., Gürdal, E. ve Tanaçan, L.**, 2000. Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme, Birinci Baskı, Literatür Yayınları, İstanbul.
- Turanlı, L., Uzal, B. and Bektaş, F.**, 2004. Effect of Material Characteristics on the Properties of Blended Cements Containing High Volumes of Natural Poozolans, *Cement and Concrete Research*, **34**, 2277-2282.
- Türkel, S. and Alabas, V.**, 2005. The Effect of Excessive Steam Curing on Portland Composite Cement Concrete, *Cement and Concrete Research*, **35**,

- Urhan, S.**, 1991. Silisin Alkali Ortamda Çözünmesine Etki Eden Faktörler, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, **28/286**, 15-21, Ankara.
- Urhan, S.**, 1994. Puzolanik Tepkimelerin Kimyası, *Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento Bülteni*, **31/326**, 10-15, Ankara.
- Uzal, B. and Turanlı, L.**, 2003. Studies on Blended Cements Containing a High Volume of Natural Puzzolan, *Cement and Concrete Research* **33**, 1777-1781.
- Yu, L.H., Ou, H. and Lee, L.L.**, 2003. Investigation on Pozzolanic Effect of Perlite Powder in Concrete; *Cement and Concrete Research* **33**, 73-76.
- TS 22-1 ENV 413-1**, 1998. Türk Standardı, Çimento-Harç Çimentosu-Bölüm 1: Özellikler, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 24**, 1985. Çimentoların Fiziki ve Mekanik Test Metotları, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 25**, 1975. Tras, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 26**, 1992. Çimento-Traslı Çimento, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 406**, 1988. Beton Bloklar-Briketler-Duvarlar İçin, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 453**, 2006. Önyapımlı (Prefabrike), Donatılı Gazbeton Yapı Elemanları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 639**, 1975. Uçucu Küller, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 699**, 1987. Tabii Yapı Taşları - Muayene ve Deney Metotları, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 705**, 1985. Fabrika Tuğlaları - Duvarlar İçin Dolu ve düşey Delikli, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 2510**, 1977. Kargir Duvarlar Hesap ve Yapım Kuralları; *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 2823**, 1986. Bims Betondan Mamul Yapı Elemanları, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 10156**, 1992. Çimento - Katkılı Çimento, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 196-1**, 2002. Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 196-6**, 2000. Çimento Deney Metotları - Bölüm 6: İncelik Tayini, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 197-1**, 2002. Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri; *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 459-1**, 2005. Yapı Kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk

Kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12390-3, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tespiti, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12390-5, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tespiti, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12350-5, 2001. Beton-Taze Beton Deneyleri - Bölüm 5: Yayılma Tablası Deneyi, Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

Van Balen, K. and Van Gemert, D., 1994. Modelling Lime Mortar Carbonation, *Materials and Structures*, **27**, 393-398.

Yalın, S., 1983. Etibank, İnşaat Sektöründe Genleştirilmiş Perlit Kullanımı, 9-10, Etibank Matbaası, Ankara,

url 1 www.buildinglime.org/as of June 2007

url.2 www.usgs.gov Bolen, W.P, 2007. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries;

EKLER

Tablo A.1: Kapiler su emme deneyi sonuçları

	P-23-7-7		P-23-7-8		P-23-7-9		4C-23-7-7		4C-23-7-8		4C-23-7-9		4N-23-7-7		4N-23-7-8		4N-23-7-9	
taban alanı (cm ²)	16,57		16,67		16,42		16,05		15,98		16,03		16,22		16,45		16,15	
ortam nemi ağırlığı (gr)	514,09		508,39		502,26		498,37		499,50		498,14		501,98		505,56		497,09	
ilk ağırlık (gr)	514,98		509,27		502,95		498,83		499,96		498,51		502,61		506,32		497,78	
4 dk ağırlığı (gr)	522,18	0,21728	516,12	0,20542	509,36	0,19518	503,24	0,13740	504,61	0,14550	503,36	0,15123	506,89	0,13195	510,71	0,13343	502,24	0,13805
9 dk ağırlığı (gr)	524,39	0,18932	518,63	0,18713	511,81	0,17985	504,75	0,12296	506,10	0,12808	504,97	0,13429	507,90	0,10872	511,71	0,10921	503,29	0,11370
16 dk ağırlığı (gr)	526,79	0,17820	521,08	0,17708	514,22	0,17158	506,20	0,11481	507,50	0,11797	506,51	0,12473	508,69	0,09372	512,55	0,09468	504,18	0,09905
25 dk ağırlığı (gr)	528,68	0,16538	522,50	0,15870	515,69	0,15517	507,31	0,10568	508,61	0,10827	507,83	0,11625	509,29	0,08238	513,30	0,08486	504,96	0,08889
36 dk ağırlığı (gr)	531,35	0,16467	525,67	0,16394	518,72	0,16006	509,27	0,10842	510,50	0,10994	509,84	0,11776	510,40	0,08005	514,42	0,08206	506,16	0,08646
49 dk ağırlığı (gr)	534,08	0,16469	528,83	0,16759	521,68	0,16295	511,21	0,11021	512,36	0,11086	511,88	0,11912	511,44	0,07778	515,51	0,07980	507,29	0,08410
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	536,85	0,16500	531,60	0,16741	524,32	0,16267	512,96	0,11006	513,98	0,10967	513,66	0,11810	512,29	0,07461	516,44	0,07690	508,25	0,08102
1saat 21dk ağırlığı (gr)	539,37	0,16357	534,36	0,16720	526,96	0,16246	514,70	0,10988	515,64	0,10903	515,46	0,11745	513,12	0,07200	517,26	0,07389	509,18	0,07841
1saat 40dk ağırlığı (gr)	542,06	0,16345	536,97	0,16614	529,50	0,16168	516,50	0,11011	517,36	0,10889	517,30	0,11718	513,93	0,06980	518,20	0,07221	510,06	0,07602
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	544,55	0,16225	539,38	0,16417	531,82	0,15983	518,14	0,10939	518,96	0,10810	519,05	0,11645	514,61	0,06726	519,12	0,07073	510,85	0,07355
2saat 24dk ağırlığı (gr)	546,96	0,16085	541,80	0,16259	534,18	0,15849	519,88	0,10931	520,68	0,10806	520,97	0,11673	515,33	0,06536	519,96	0,06909	511,75	0,07207
2saat 49dk ağırlığı (gr)	549,39	0,15976	543,98	0,16014	536,20	0,15576	521,56	0,10895	522,38	0,10793	522,89	0,11696	515,95	0,06327	520,76	0,06752	512,51	0,07014
3saat 16dk ağırlığı (gr)	551,63	0,15800	546,12	0,15787	538,28	0,15368	523,04	0,10776	523,79	0,10652	524,50	0,11577	516,54	0,06135	521,54	0,06608	513,25	0,06840
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,17019		0,16965		0,16457		0,11269		0,11376		0,12169		0,08063		0,08311		0,08691
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,16813						0,11605						0,08355					

	P-23-28-7		P-23-28-8		P-23-28-9		4C-23-28-7		4C-23-28-8		4C-23-28-9		4N-23-28-7		4N-23-28-8		4N-23-28-9	
taban alanı (cm ²)	16,60		16,87		16,68		16,77		16,84		16,53		16,17		16,43		1671,67	
ortam nemi ağırlığı (gr)	508,46		514,46		512,82		519,86		519,54		512,30		508,68		512,12		521,24	
ilk ağırlık (gr)	508,72		514,75		513,08		520,21		519,81		512,43		509,14		512,49		521,64	
4 dk ağırlığı (gr)	513,91	0,15629	519,99	0,15533	518,89	0,17413	524,97	0,14190	524,97	0,15324	516,68	0,12854	514,47	0,16479	518,35	0,17828	526,48	0,00145
9 dk ağırlığı (gr)	516,88	0,16382	523,06	0,16422	521,89	0,17603	527,21	0,13912	527,35	0,14928	519,27	0,13792	516,31	0,14779	520,12	0,15476	528,40	0,00135
16 dk ağırlığı (gr)	519,87	0,16788	526,07	0,16778	525,03	0,17908	529,61	0,14011	529,70	0,14685	521,73	0,14064	518,12	0,13882	521,87	0,14269	530,24	0,00129
25 dk ağırlığı (gr)	521,04	0,14840	527,41	0,15011	525,90	0,15369	530,70	0,12509	530,68	0,12912	522,33	0,11977	519,19	0,12429	522,87	0,12632	531,26	0,00115
36 dk ağırlığı (gr)	524,61	0,15950	531,11	0,16165	529,54	0,16444	533,85	0,13554	533,94	0,13987	526,12	0,13802	521,12	0,12346	524,92	0,12606	533,18	0,00115
49 dk ağırlığı (gr)	528,15	0,16717	534,77	0,16956	533,17	0,17203	536,84	0,14164	536,97	0,14560	529,20	0,14491	523,01	0,12252	527,00	0,12613	535,03	0,00114
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	531,14	0,16879	537,82	0,17097	536,26	0,17368	539,42	0,14317	539,55	0,14656	531,82	0,14661	524,58	0,11934	528,75	0,12367	536,61	0,00112
1saat 21dk ağırlığı (gr)	533,98	0,16904	540,69	0,17088	539,23	0,17416	541,94	0,14395	542,07	0,14690	534,39	0,14759	526,09	0,11646	530,42	0,12122	538,01	0,00109
1saat 40dk ağırlığı (gr)	536,81	0,16918	543,58	0,17092	542,18	0,17443	544,41	0,14428	544,58	0,14712	537,01	0,14868	527,52	0,11365	532,04	0,11896	539,36	0,00106
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	539,49	0,16847	546,30	0,17004	544,95	0,17367	546,82	0,14423	546,99	0,14676	539,54	0,14908	528,86	0,11085	533,49	0,11616	540,55	0,00103
2saat 24dk ağırlığı (gr)	542,00	0,16703	548,81	0,16827	547,53	0,17208	549,20	0,14404	549,45	0,14671	542,20	0,15006	530,12	0,10811	534,92	0,11374	541,69	0,00100
2saat 49dk ağırlığı (gr)	544,25	0,16461	551,04	0,16550	549,85	0,16954	551,46	0,14332	551,75	0,14593	544,63	0,14983	531,27	0,10526	536,18	0,11088	542,71	0,00097
3saat 16dk ağırlığı (gr)	546,40	0,16210	553,13	0,16253	552,04	0,16681	553,71	0,14267	554,07	0,14535	547,15	0,15001	532,27	0,10216	537,37	0,10814	543,67	0,00094
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,16402		0,16521		0,17106		0,14070		0,14533		0,14244		0,12288		0,12823		0,00113
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,16676						0,14282						0,08408					

	P-23-91-7		P-23-91-8		P-23-91-9		4C-23-91-7		4C-23-91-8		4C-23-91-9		4N-23-91-7		4N-23-91-8		4N-23-91-9	
taban alanı (cm ²)	16,84		16,63		16,80		16,28		16,49		16,06		16,62		16,62			
ortam nemi ağırlığı (gr)	518,67		515,49		512,35		504,68		509,72		500,82		514,21		505,35			
ilk ağırlık (gr)	519,01		515,72		512,76		504,98		509,96		501,08		514,73		505,81			
4 dk ağırlığı (gr)	525,03	0,17874	521,36	0,16957	518,95	0,18423	512,11	0,21898	517,16	0,21831	507,56	0,20174	520,12	0,16215	512,03	0,18712		
9 dk ağırlığı (gr)	527,79	0,17379	523,88	0,16356	521,66	0,17659	514,50	0,19492	519,67	0,19628	509,77	0,18037	521,55	0,13678	513,59	0,15604		
16 dk ağırlığı (gr)	530,67	0,17310	526,57	0,16311	524,52	0,17500	517,06	0,18550	522,60	0,19163	512,25	0,17388	523,07	0,12545	515,28	0,14245		
25 dk ağırlığı (gr)	533,41	0,17102	529,33	0,16368	527,37	0,17393	519,94	0,18378	525,93	0,19369	515,10	0,17460	524,79	0,12106	517,15	0,13646		
36 dk ağırlığı (gr)	535,96	0,16776	531,92	0,16236	529,89	0,16994	522,40	0,17834	528,81	0,19052	517,56	0,17103	526,17	0,11472	518,60	0,12826		
49 dk ağırlığı (gr)	538,33	0,16390	534,33	0,15987	532,24	0,16565	525,18	0,17726	532,05	0,19137	520,43	0,17212	527,60	0,11062	520,20	0,12369		
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	540,51	0,15959	536,60	0,15695	534,42	0,16116	527,78	0,17506	535,06	0,19027	523,06	0,17108	528,74	0,10537	521,48	0,11785		
1saat 21dk ağırlığı (gr)	542,69	0,15624	538,89	0,15481	536,56	0,15741	530,49	0,17411	538,17	0,19008	525,79	0,17096	529,82	0,10088	522,71	0,11298		
1saat 40dk ağırlığı (gr)	544,76	0,15291	541,03	0,15219	538,52	0,15333	533,29	0,17389	541,30	0,19005	528,55	0,17105	530,75	0,09639	523,77	0,10806		
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	546,68	0,14937	542,99	0,14907	540,30	0,14903	535,95	0,17294	544,25	0,18904	531,16	0,17027	531,52	0,09184	524,63	0,10294		
2saat 24dk ağırlığı (gr)	548,59	0,14638	545,05	0,14697	542,12	0,14563	538,73	0,17276	547,31	0,18875	533,92	0,17040	532,25	0,08785	525,38	0,09812		
2saat 49dk ağırlığı (gr)	550,38	0,14329	546,94	0,14441	543,75	0,14190	541,38	0,17199	550,19	0,18767	536,57	0,16999	532,82	0,08373	526,00	0,09345		
3saat 16dk ağırlığı (gr)	552,09	0,14031	548,73	0,14178	545,39	0,13873	544,04	0,17138	552,89	0,18596	539,18	0,16945	533,35	0,08002	526,55	0,08914		
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,15972		0,15603		0,16096		0,18084		0,19259		0,17438		0,10899		0,12281		
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,15890						0,18260						0,11590					

	P-55-7-7		P-55-7-8		P-55-7-9		4C-55-7-7		4C-55-7-8		4C-55-7-9		4N-55-7-7		4N-55-7-8		4N-55-7-9	
taban alanı (cm ²)	16,78		16,92		16,76		16,65		16,57		16,59		16,92		16,61		16,83	
ortam nemi ağırlığı (gr)	521,26		522,88		521,25		521,33		529,12		529,02		532,59		526,16		532,32	
ilk ağırlık (gr)	521,48		523,06		521,45		521,47		529,28		529,21		532,86		526,47		532,56	
4 dk ağırlığı (gr)	523,38	0,05662	524,81	0,05171	523,08	0,04863	522,37	0,02703	530,19	0,02746	530,23	0,03074	534,96	0,06206	528,54	0,06231	534,06	0,04456
9 dk ağırlığı (gr)	524,11	0,05224	525,53	0,04866	523,56	0,04196	522,67	0,02402	530,50	0,02454	530,41	0,02411	535,27	0,04748	528,87	0,04816	534,89	0,04615
16 dk ağırlığı (gr)	524,54	0,04559	525,89	0,04181	523,97	0,03759	522,91	0,02162	530,73	0,02188	530,61	0,02110	535,50	0,03901	529,13	0,04004	535,12	0,03803
25 dk ağırlığı (gr)	524,96	0,04148	526,25	0,03771	524,34	0,03449	523,24	0,02126	530,99	0,02064	530,86	0,01989	535,73	0,03392	529,38	0,03504	535,34	0,03304
36 dk ağırlığı (gr)	525,34	0,03834	526,60	0,03487	524,69	0,03222	523,52	0,02052	531,26	0,01992	531,07	0,01869	535,92	0,03014	529,60	0,03141	535,54	0,02951
49 dk ağırlığı (gr)	525,68	0,03576	526,95	0,03284	525,00	0,03026	523,84	0,02033	531,52	0,01931	531,31	0,01808	536,09	0,02727	529,83	0,02890	535,71	0,02674
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	525,98	0,03352	527,24	0,03088	525,32	0,02886	524,11	0,01982	531,77	0,01878	531,50	0,01725	536,23	0,02490	530,01	0,02664	535,87	0,02458
1saat 21dk ağırlığı (gr)	526,23	0,03145	527,50	0,02916	525,55	0,02718	524,38	0,01942	531,98	0,01811	531,74	0,01694	536,40	0,02325	530,19	0,02488	536,03	0,02291
1saat 40dk ağırlığı (gr)	526,52	0,03004	527,78	0,02790	525,83	0,02613	524,64	0,01904	532,20	0,01762	531,95	0,01652	536,54	0,02175	530,35	0,02336	536,17	0,02145
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	526,79	0,02877	528,04	0,02676	526,08	0,02511	524,87	0,01856	532,40	0,01712	532,12	0,01595	536,67	0,02047	530,53	0,02222	536,30	0,02020
2saat 24dk ağırlığı (gr)	527,05	0,02766	528,29	0,02576	526,31	0,02416	525,09	0,01812	532,58	0,01660	532,28	0,01542	536,80	0,01941	530,68	0,02112	536,22	0,01812
2saat 49dk ağırlığı (gr)	527,30	0,02668	528,57	0,02505	526,58	0,02355	525,35	0,01793	532,81	0,01639	532,54	0,01544	536,94	0,01855	530,85	0,02028	536,58	0,01837
3saat 16dk ağırlığı (gr)	527,55	0,02584	528,81	0,02427	526,80	0,02280	525,56	0,01755	532,97	0,01591	532,69	0,01498	537,06	0,01773	530,98	0,01939	536,70	0,01757
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,03646		0,03364		0,03100		0,02040		0,01956		0,01886		0,02969		0,03106		0,02779
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,03370						0,01961						0,02951					

	P-55-28-7		P-55-28-8		P-55-28-9		4C-55-28-7		4C-55-28-8		4C-55-28-9		4N-55-28-7		4N-55-28-8		4N-55-28-9	
taban alanı (cm ²)	16,61		16,59		16,55		16,89		16,50		16,57		16,89		16,76		16,83	
ortam nemi ağırlığı (gr)	519,82		521,44		510,60		505,81		513,87		517,83		536,94		539,80		533,40	
ilk ağırlık (gr)	520,06		521,66		510,84		505,93		513,99		517,96		537,17		539,98		533,62	
4 dk ağırlığı (gr)	521,49	0,04305	523,11	0,04370	512,32	0,04471	506,51	0,01717	514,59	0,01818	518,60	0,01931	537,96	0,02339	540,72	0,02208	534,43	0,02406
9 dk ağırlığı (gr)	522,15	0,04194	523,78	0,04260	512,86	0,04068	506,87	0,01855	514,81	0,01657	518,84	0,01770	539,02	0,03651	541,74	0,03500	535,46	0,03644
16 dk ağırlığı (gr)	522,70	0,03974	524,24	0,03888	513,31	0,03731	507,09	0,01717	515,04	0,01591	519,07	0,01675	539,28	0,03123	542,01	0,03028	535,72	0,03119
25 dk ağırlığı (gr)	523,18	0,03757	524,43	0,03339	513,87	0,03662	507,34	0,01670	515,28	0,01564	519,26	0,01569	539,53	0,02795	542,27	0,02733	535,97	0,02793
36 dk ağırlığı (gr)	523,57	0,03522	524,86	0,03215	514,24	0,03424	507,59	0,01638	515,49	0,01515	519,48	0,01529	539,74	0,02536	542,52	0,02526	536,21	0,02565
49 dk ağırlığı (gr)	523,91	0,03311	525,64	0,03427	514,78	0,03401	507,79	0,01573	515,70	0,01481	519,71	0,01509	539,95	0,02351	542,77	0,02378	536,39	0,02351
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	524,19	0,03108	525,78	0,03104	515,01	0,03150	508,01	0,01539	515,89	0,01439	519,91	0,01471	540,11	0,02176	542,81	0,02111	536,55	0,02176
1saat 21dk ağırlığı (gr)	524,47	0,02950	526,02	0,02920	515,26	0,02967	508,21	0,01500	516,08	0,01407	520,10	0,01435	540,25	0,02026	543,03	0,02022	536,69	0,02027
1saat 40dk ağırlığı (gr)	524,73	0,02812	526,38	0,02845	515,71	0,02943	508,43	0,01480	516,27	0,01382	520,31	0,01418	540,39	0,01906	543,16	0,01897	536,85	0,01919
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	524,96	0,02682	526,62	0,02718	515,89	0,02774	508,61	0,01442	516,45	0,01355	520,51	0,01399	540,51	0,01798	543,34	0,01823	536,99	0,01820
2saat 24dk ağırlığı (gr)	525,21	0,02584	526,87	0,02617	516,22	0,02709	508,79	0,01411	516,58	0,01308	520,70	0,01378	540,62	0,01702	543,41	0,01705	537,05	0,01698
2saat 49dk ağırlığı (gr)	525,52	0,02529	527,12	0,02532	516,49	0,02626	508,97	0,01385	516,75	0,01287	520,85	0,01342	540,70	0,01608	543,53	0,01629	537,29	0,01677
3saat 16dk ağırlığı (gr)	525,65	0,02404	527,53	0,02527	516,86	0,02598	509,16	0,01366	516,92	0,01268	521,04	0,01328	540,80	0,01535	543,73	0,01598	537,47	0,01634
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,03241		0,03212		0,03271		0,01561		0,01467		0,01519		0,02273		0,02243		0,02295
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,03241						0,01516						0,02270					

	P-55-91-7		P-55-91-8		P-55-91-9		4C-55-91-7		4C-55-91-8		4C-55-91-9		4N-55-91-7		4N-55-91-8		4N-55-91-9	
taban alanı (cm ²)	16,57		16,90		16,45		17,07		16,93		16,71		17,14		17,67		17,62	
ortam nemi ağırlığı (gr)	505,46		523,95		492,51		517,13		508,47		503,99		517,11		532,16		523,21	
ilk ağırlık (gr)	506,43		524,90		494,10		517,26		508,64		504,21		517,43		532,39		523,52	
4 dk ağırlığı (gr)	507,91	0,04466	525,80	0,02663	495,81	0,05198	518,66	0,04101	510,25	0,04755	505,65	0,04309	519,51	0,06068	534,40	0,05688	525,40	0,05335
9 dk ağırlığı (gr)	508,25	0,03661	526,14	0,02446	496,81	0,05491	519,33	0,04042	510,95	0,04548	506,32	0,04209	520,35	0,05679	535,32	0,05527	526,22	0,05108
16 dk ağırlığı (gr)	508,61	0,03289	526,50	0,02362	497,14	0,04620	520,08	0,04130	511,72	0,04548	507,07	0,04279	521,22	0,05528	536,46	0,05758	527,28	0,05335
25 dk ağırlığı (gr)	508,99	0,03090	526,88	0,02343	497,51	0,04146	520,89	0,04253	512,44	0,04489	507,82	0,04321	522,07	0,05414	537,53	0,05818	528,27	0,05392
36 dk ağırlığı (gr)	509,42	0,03007	527,32	0,02387	497,96	0,03911	521,51	0,04150	513,16	0,04450	508,55	0,04329	522,86	0,05280	538,53	0,05791	529,18	0,05354
49 dk ağırlığı (gr)	509,77	0,02880	527,72	0,02384	498,04	0,03422	522,17	0,04109	513,88	0,04422	509,25	0,04309	523,59	0,05134	539,45	0,05708	530,01	0,05262
1saat 4 dk ağırlığı (gr)	510,18	0,02829	528,14	0,02396	498,41	0,03275	522,78	0,04042	514,54	0,04356	509,91	0,04264	524,29	0,05003	540,31	0,05603	530,88	0,05221
1saat 21dk ağırlığı (gr)	510,53	0,02749	528,52	0,02380	498,57	0,03019	523,39	0,03990	515,21	0,04312	510,60	0,04249	524,99	0,04901	541,14	0,05502	531,71	0,05165
1saat 40dk ağırlığı (gr)	510,90	0,02698	528,91	0,02373	499,11	0,03046	524,01	0,03954	515,90	0,04288	511,31	0,04249	525,70	0,04825	541,97	0,05422	532,55	0,05125
2saat 1 dk ağırlığı (gr)	511,29	0,02666	529,31	0,02372	499,46	0,02962	524,59	0,03904	516,55	0,04247	512,01	0,04244	526,42	0,04768	542,73	0,05320	533,30	0,05046
2saat 24dk ağırlığı (gr)	511,67	0,02635	529,69	0,02362	499,75	0,02862	525,19	0,03871	517,24	0,04233	512,72	0,04244	527,20	0,04750	543,54	0,05258	534,07	0,04990
2saat 49dk ağırlığı (gr)	512,02	0,02595	530,07	0,02353	500,18	0,02843	525,79	0,03844	517,91	0,04212	513,42	0,04240	527,95	0,04721	544,26	0,05167	534,78	0,04916
3saat 16dk ağırlığı (gr)	512,38	0,02565	530,46	0,02350	500,54	0,02796	526,38	0,03816	518,56	0,04185	514,12	0,04236	528,68	0,04688	544,93	0,05069	535,48	0,04848
Nort (cm ³ /cm ² √dk)		0,03010		0,02398		0,03661		0,04016		0,04388		0,04268		0,05135		0,05510		0,05161
Nort (cm ³ /cm ² √dk)	0,03023						0,04224						0,05269					

Tablo A.2: Ağırlıkça su emme - hacimce su emme (görünür porozite)

23 °C'de Katkısız Numuneler									
	P-23-7-7	P-23-7-8	P-23-7-9	P-23-28-7	P-23-28-8	P-23-28-9	P-23-91-7	P-23-91-8	P-23-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	514,09	508,39	502,26	508,46	514,46	512,82	518,67	515,49	512,35
suya doymuş ağırlık (gr)	564,34	555,85	549,84	556,05	562,68	561,23	565,72	563,02	560,80
su içindeki ağırlık (gr)	300,30	295,50	293,00	297,70	302,00	301,00	304,80	303,30	300,20
su emme (%)	9,77	9,34	9,47	9,36	9,37	9,44	9,07	9,22	9,46
su emme ort. (%)	9,53			9,39			9,25		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,36			2,35			2,34		
görünür porozite (%)	0,190312	0,1822931	0,1852515	0,1842075	0,1849778	0,1860277	0,1803235	0,1830048	0,1859171
görünür porozite ort.(%)	19			19			18		

23 °C'de Kalsiyumklorür Katkılı Numuneler									
	4C-23-7-7	4C-23-7-8	4C-23-7-9	4C-23-28-7	4C-23-28-8	4C-23-28-9	4C-23-91-7	4C-23-91-8	4C-23-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	498,37	499,50	498,14	519,86	519,54	512,30	504,68	509,72	500,82
suya doymuş ağırlık (gr)	563,60	537,28	537,08	562,50	563,09	554,49	548,21	553,76	543,25
su içindeki ağırlık (gr)	284,50	285,40	285,00	302,50	302,30	297,40	293,50	297,40	291,80
su emme (%)	13,09	7,56	7,82	8,20	8,38	8,24	8,63	8,64	8,47
su emme ort. (%)	9,49			8,27			8,58		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,41			2,32			2,29		
görünür porozite (%)	0,233716	0,1499921	0,1544748	0,164	0,1669926	0,164106	0,1709002	0,1717897	0,1687413
görünür porozite ort.(%)	15			17			17		

23 °C'de Sodyumsülfat Katkılı Numuneler									
	4N-23-7-7	4N-23-7-8	4N-23-7-9	4N-23-28-7	4N-23-28-8	4N-23-28-9	4N-23-91-7	4N-23-91-8	4N-23-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	501,98	505,56	497,09	508,68	512,12	521,24	514,21	505,35	506,87
suya doymuş ağırlık (gr)	536,87	541,67	534,14	547,89	552,39	560,75	557,72	547,99	549,73
su içindeki ağırlık (gr)	284,00	287,00	283,30	297,00	298,40	302,40	299,90	292,70	294,60
su emme (%)	6,95	7,14	7,45	7,71	7,86	7,58	8,46	8,44	8,46
su emme ort. (%)	7,18			7,72			8,45		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,26			2,32			2,33		
görünür porozite (%)	0,137976	0,1417913	0,1477037	0,1562836	0,1585495	0,1529321	0,1687612	0,1670257	0,1679928
görünür porozite (%)	14			16			17		

55 °C'de Katkısız Numuneler									
	P-55-7-7	P-55-7-8	P-55-7-9	P-55-28-7	P-55-28-8	P-55-28-9	P-55-91-7	P-55-91-8	P-55-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	521,26	522,88	521,25	519,82	521,44	510,60	505,46	523,95	492,51
suya doymuş ağırlık (gr)	557,40	556,98	556,35	556,21	557,90	553,15	555,70	575,98	543,34
su içindeki ağırlık (gr)	295,30	294,30	294,80	294,60	295,20	292,30	295,10	310,10	285,90
su emme (%)	6,93	6,52	6,73	7,00	6,99	8,33	9,94	9,93	10,32
su emme ort. (%)	6,73			7,44			10,06		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,22			2,27			2,35		
görünür porozite (%)	0,137886	0,1298157	0,1342	0,1391002	0,1387895	0,1631206	0,1927859	0,1956898	0,1974441
görünür porozite ort.(%)	13			15			20		

55 °C'de Kalsiyumklorür Katkılı Numuneler									
	4C-55-7-7	4C-55-7-8	4C-55-7-9	4C-55-28-7	4C-55-28-8	4C-55-28-9	4C-55-91-7	4C-55-91-8	4C-55-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	521,33	529,12	529,02	505,81	513,87	517,83	517,13	508,47	503,99
suya doymuş ağırlık (gr)	554,89	558,87	558,76	541,85	546,26	551,30	571,00	563,32	559,75
su içindeki ağırlık (gr)	292,20	294,80	295,40	284,50	286,30	290,10	302,80	297,10	296,10
su emme (%)	6,44	5,62	5,62	7,13	6,30	6,46	10,42	10,79	11,06
su emme ort. (%)	5,89			6,63			10,76		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,24			2,20			2,35		
görünür porozite (%)	0,127755	0,1126595	0,1129253	0,1400427	0,1245961	0,1281394	0,2008576	0,2060326	0,2114925
görünür porozite ort(%)	12			13			21		

55 °C'de Sodyumsülfat Katkılı Numuneler									
	4N-55-7-7	4N-55-7-8	4N-55-7-9	4N-55-28-7	4N-55-28-8	4N-55-28-9	4N-55-91-7	4N-55-91-8	4N-55-91-9
Ortam nem ağırlığı (gr)	532,59	526,16	532,32	536,94	539,80	533,40	517,11	532,16	523,21
suya doymuş ağırlık (gr)	562,58	556,63	561,66	568,26	569,16	566,53	574,13	589,37	579,59
su içindeki ağırlık (gr)	296,70	292,90	295,80	301,20	302,70	300,00	306,80	315,20	308,90
su emme (%)	5,63	5,79	5,51	5,83	5,44	6,21	11,03	10,75	10,78
su emme ort. (%)	5,64			5,83			10,85		
özgül ağırlık ort.(gr/cm³)	2,21			2,24			2,35		
görünür porozite (%)	0,112795	0,1155348	0,1103588	0,117277	0,1101854	0,1243012	0,2132944	0,2086662	0,2082825
görünür porozite ort.(%)	11			12			21		

Tablo A.3: Buhar geçirirnilik

numune	ort. sıcaklık °C	ort. nem değeri %	ilk ağırlık (gr)	son ağırlık (gr)	d ort (m)	h (m)	alan (m²)	P (N/m²) = pascal	P(0) N/m²	T °K	Rb	δ_h	P1 N/m²	P2 N/m²	G kg/saat	μ	
P-55-1	24	53	178,54	178,87	0,0171	0,0150	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000020	72,8638	99,9500
P-55-2	24	53	119,89	120,21	0,0116	0,0180	0,0037	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000019	106,8880	
P-55-3	24	53	175,04	175,30	0,0125	0,0150	0,0036	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000015	120,0982	
4C-55-1	24	53	184,56	184,71	0,0168	0,0160	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000009	164,1748	141,9999
4C-55-2	24	53	164,42	164,72	0,0145	0,0130	0,0037	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000018	92,2459	
4C-55-3	24	53	189,57	189,72	0,0163	0,0100	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000009	169,5789	
4N-55-1	24	53	174,70	175,03	0,0173	0,0110	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000020	72,2526	79,9699
4N-55-2	24	53	196,25	196,57	0,0171	0,0100	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000019	75,4606	
4N-55-3	24	53	179,66	179,94	0,0160	0,0110	0,0038	100843,42	10336	297	462	0,00000041	1582	0	0,0000017	92,1965	

Tablo A.4: Donma-çözülme

sıcaklık		55 °C																											23 °C											
süre		7 gün									28 gün									91 gün									91 gün											
numune kodu		P			4C			4N			P			4C			4N			P			4C			4N			P			4C			4N					
		7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9			
çevrim sayısı	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	6	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	7	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
	10	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	+	0	+	+	0					+		+	+							
	11	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0					+		+	+						
	12	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0					+		+	+						
	13	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0					Ø		+	+						
	14	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0							+	+						
	15	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0							Ø	+						
	16	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0								+						
	17	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	0	+	+	0								Ø						
	18	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+	Ø	+	+	0														
	19	+	+	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	+		+	+	0														
	20	+	0	+	+	+	+	0	0	0	+	+	0	+	+	+	0	0	0	0	0	+		+	+	0														
	21	+	0	0	+	+	+	0	0	0	+	+	0	+	+	+	0	0	0	0	0	+		+	+	0														
	22	0	0	0	+	+	+	0	0	0	+	+	0	+	+	+	0	0	0	0	0	+		+	+	0														
	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+		+	+	0														
	24	0	0	0	0	0	0	Ø	Ø	Ø	0	+	0	0	0	0	Ø	Ø	Ø	0	0		+	+	0															
	25	0	0	0	0	0	0				0	0	0	0	0	0				0	0		+	+	0															

- (+) sorunsuz
 O parça kopması
 Ø dağılma
 (-) kılcal çatlak, parça kopmasız
 * kılcal çatlak, parça kopmalı

Tablo A.5: Rötre

Şüre (gün)	P-23-1	Fark	P-23-2	Fark	P-23-3	Fark	4C-23-1	Fark	4C-23-2	Fark	4C-23-3	Fark	4N-23-1	Fark	4N-23-2	Fark	4N-23-3	Fark
0	3,19		3,76		2,85		2,26		2,52		1,96		3,62		3,54		2,78	
1	3,17	0,02	3,73	0,03	2,82	0,03	2,24	0,02	2,49	0,03	1,94	0,02	3,51	0,11	3,44	0,10	2,57	0,21
2	3,16	0,03	3,72	0,04	2,81	0,04	2,24	0,02	2,48	0,04	1,94	0,02	3,46	0,16	3,39	0,15	2,57	0,21
3	3,15	0,04	3,71	0,05	2,81	0,04	2,23	0,03	2,48	0,04	1,94	0,02	3,44	0,18	3,39	0,15	2,55	0,23
4	3,15	0,04	3,71	0,05	2,81	0,04	2,23	0,03	2,47	0,05	1,94	0,02	3,44	0,18	3,38	0,16	2,55	0,23
5																		
6																		
7	3,15	0,04	3,71	0,05	2,80	0,05	2,23	0,03	2,47	0,05	1,94	0,02	3,43	0,19	3,38	0,16	2,55	0,23
8																		
9																		
10	3,14	0,05	3,70	0,06	2,80	0,05	2,22	0,04	2,47	0,05	1,94	0,02	3,43	0,19	3,38	0,16	2,54	0,24
11	3,14	0,05	3,70	0,06	2,80	0,05	2,22	0,04	2,47	0,05	1,94	0,02	3,43	0,19	3,38	0,16	2,54	0,24
12																		
13																		
14	3,14	0,05	3,70	0,06	2,80	0,05	2,23	0,03	2,47	0,05	1,94	0,02	3,42	0,20	3,37	0,17	2,54	0,24
15	3,14	0,05	3,70	0,06	2,80	0,05	2,23	0,03	2,47	0,05	1,94	0,02	3,42	0,20	3,37	0,17	2,53	0,25
16																		
17	3,14	0,05	3,70	0,06	2,80	0,05	2,22	0,04	2,46	0,06	1,94	0,02	3,40	0,22	3,37	0,17	2,53	0,25
18																		
19																		
20																		
21	3,14	0,05	3,70	0,06	2,79	0,06	2,21	0,05	2,45	0,07	1,94	0,02	3,40	0,22	3,36	0,18	2,53	0,25
22																		
23	3,14	0,05	3,70	0,06	2,79	0,06	2,21	0,05	2,45	0,07	1,94	0,02	3,40	0,22	3,36	0,18	2,53	0,25
24																		
25																		
26																		
27																		
28	3,13	0,06	3,69	0,07	2,79	0,06	2,19	0,07	2,45	0,07	1,94	0,02	3,40	0,22	3,36	0,18	2,53	0,25
29																		
30																		
31	3,13	0,06	3,69	0,07	2,79	0,06	2,20	0,06	2,45	0,07	1,94	0,02	3,37	0,25	3,36	0,18	2,53	0,25
32																		
33	3,13	0,06	3,67	0,09	2,79	0,06	2,20	0,06	2,45	0,07	1,94	0,02	3,37	0,25	3,36	0,18	2,53	0,25

Süre (gün)	P-55-1	Fark	P-55-2	Fark	P-55-3	Fark	4C-55-1	Fark	4C-55-2	Fark	4C-55-3	Fark	4N-55-1	Fark	4N-55-2	Fark	4N-55-3	Fark
0	2,89		3,33		3,27		2,23		3,25		2,76		3,82		2,61		3,37	
1	2,89	0,00	3,33	0,00	3,27	0,00	2,21	0,02	3,23	0,02	2,73	0,03	3,80	0,02	2,59	0,02	3,35	0,02
2	2,87	0,02	3,32	0,01	3,27	0,00	2,19	0,04	3,22	0,03	2,71	0,05	3,79	0,03	2,59	0,02	3,35	0,02
3																		
4																		
5																		
6																		
7	2,85	0,04	3,30	0,03	3,27	0,00	2,16	0,07	3,20	0,05	2,68	0,08	3,77	0,05	2,57	0,04	3,33	0,04
8	2,85	0,04	3,30	0,03	3,27	0,00	2,16	0,07	3,20	0,05	2,68	0,08	3,76	0,06	2,57	0,04	3,33	0,04
9																		
10																		
11	2,85	0,04	3,30	0,03	3,26	0,01	2,15	0,08	3,17	0,08	2,67	0,09	3,75	0,07	2,57	0,04	3,32	0,05
12	2,85	0,04	3,30	0,03	3,26	0,01	2,15	0,08	3,17	0,08	2,67	0,09	3,75	0,07	2,57	0,04	3,32	0,05
13																		
14	2,85	0,04	3,30	0,03	3,25	0,02	2,15	0,08	3,17	0,08	2,67	0,09	3,73	0,09	2,56	0,05	3,31	0,06
15																		
16																		
17																		
18	2,84	0,05	3,29	0,04	3,23	0,04	2,13	0,10	3,14	0,11	2,64	0,12	3,71	0,11	2,56	0,05	3,30	0,07
19																		
20	2,83	0,06	3,29	0,04	3,23	0,04	2,12	0,11	3,13	0,12	2,63	0,13	3,71	0,11	2,55	0,06	3,30	0,07
21																		
22																		
23																		
24																		
25	2,83	0,06	3,27	0,06	3,21	0,06	2,12	0,11	3,12	0,13	2,62	0,14	3,70	0,12	2,54	0,07	3,29	0,08
26																		
27																		
28	2,81	0,08	3,26	0,07	3,19	0,08	2,09	0,14	3,10	0,15	2,60	0,16	3,69	0,13	2,52	0,09	3,27	0,10
29																		
30																		
31	2,80	0,09	3,24	0,09	3,17	0,10	2,07	0,16	3,08	0,17	2,59	0,17	3,68	0,14	2,48	0,13	3,26	0,11
32																		
33																		

Tablo A.6: Basınç ve eğilme dayanımları

	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort. (N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort. (N/mm ²)
P-23-7	P-23-7-1	200	196	10,21	0,41	0,46	0,45	4150	3810,417	424,27	0,80	2,50	2,29
								4500			1,63	2,71	
	P-23-7-2	200			0,41	0,45		3990			0,42	2,40	
								3350			-1,09	2,01	
	P-23-7-3	200			0,41	0,45		3840			0,07	2,31	
								3520			-0,68	2,12	
	P-23-7-4	175			-2,04			3150			-1,56	1,91	
								3170			-1,51	1,92	
	P-23-7-5	200			0,41	0,45		4100			0,68	2,45	
								4000			0,45	2,39	
P-23-28	P-23-28-1	150	216	40,55	-1,62	0,33	0,48	4180	4235,417	351,34	-0,16	2,46	2,46
								3700			-1,52	2,18	
	P-23-28-2	185			-0,76	0,40		4175			-0,17	2,43	
								3910			-0,93	2,27	
	P-23-28-3	250			0,84	0,55		4500			0,75	2,65	
								4130			-0,30	2,43	
	P-23-28-4	250			0,84	0,57		4250			0,04	2,58	
								5100			2,46		
	P-23-28-5	220			0,10	0,50		4500			0,75	2,69	
								4000			-0,67	2,39	
P-23-91	P-23-91-3	190	260	41,11	-1,70	0,44	0,59	5000	6285	664,65	-1,93	3,06	3,80
								6600			0,47	4,04	
	P-23-91-4	280			0,49	0,63		6680			0,59	4,00	
								5840			-0,67	3,50	
	P-23-91-5	295			0,85	0,66		6080			-0,31	3,62	
								7120			1,26	4,24	
	P-23-91-6	300			0,97	0,70		6700			0,62	4,09	
								7120			1,26	4,35	
	P-23-91-8	250			-0,24	0,57		6320			0,05	3,87	
								5360			-1,39	3,28	
P-23-91-9		245			-0,36	0,55		5920			-0,55	3,56	
								6680			0,59	4,02	

	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort.(N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort.(N/mm ²)
4C-23-7	4C-23-7-1	230	203	20,92	1,31	0,53	0,53	4480	4212,5	278,90	0,96	2,74	2,59
								4630			1,50	2,83	
	4C-23-7-2	210			0,36	0,49		3880			-1,19	2,41	
								4560			1,25	2,84	
	4C-23-7-3	210			0,36	0,49		4120			-0,33	2,57	
								3900			-1,12	2,44	
	4C-23-7-4	210			0,36	0,48		4500			1,03	2,74	
								3950			-0,94	2,41	
	4C-23-7-5	180			-1,08	0,42		3870			-1,23	2,36	
								4220			0,03	2,58	
	4C-23-7-6	175			-1,31	0,40		4260			0,17	2,63	
								4180			-0,12	2,58	
4C-23-28	4C-23-28-1	240	303	49,17	-1,27	0,55	0,68	5400	6314,167	756,38	-1,21	3,30	3,72
								6250			-0,08	3,82	
	4C-23-28-2	300			-0,05	0,69		6450			0,18	3,92	
								5980			-0,44	3,64	
	4C-23-28-3	250			-1,07	0,56		6560			0,33	3,94	
								5620			-0,92	3,38	
	4C-23-28-4	365			1,27	0,82		5370			-1,25	3,23	
								6080			-0,31	3,66	
	4C-23-28-5	330			0,56	0,74		6100			-0,28	3,66	
								7400			1,44	4,44	
	4C-23-28-6	330			0,56	0,74		6670			0,47	3,98	
								7890			2,08		
4C-23-91	4C-23-91-3	360	391	49,64	-0,62	0,83	0,89	8000	8609,167	974,54	-0,63	4,87	5,18
								6980			-1,67	4,25	
	4C-23-91-4	350			-0,82	0,80		9150			0,55	5,57	
								7400			-1,24	4,50	
	4C-23-91-5	445			1,09	1,00		9720			1,14	5,78	
								9600			1,02	5,71	
	4C-23-91-6	430			0,79	0,97		9380			0,79	5,62	
								9380			0,79	5,62	
	4C-23-91-7	330			-1,23	0,75		7600			-1,04	4,59	
								8300			-0,32	5,01	
	4C-23-91-8	430			0,79	0,97		8200			-0,42	4,90	
								9600			1,02	5,73	

	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort.(N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort.(N/mm ²)
4N-23-7	4N-23-7-1	420	445	45,93	-0,54	0,97	0,97	7320	7272,5	437,06	0,11	4,45	4,41
								6920			-0,81	4,20	
	4N-23-7-2	510			1,42	1,16		7390			0,27	4,45	
								8280			2,31		
	4N-23-7-3	480			0,76	1,10		7750			1,09	4,72	
								7340			0,15	4,47	
	4N-23-7-4	380			-1,42	0,90		7240			-0,07	4,52	
								6920			-0,81	4,32	
	4N-23-7-5	450			0,11	1,04		6850			-0,97	4,23	
								7520			0,57	4,64	
	4N-23-7-6	430			-0,33	1,01		6760			-1,17	4,19	
								6980			-0,67	4,33	
4N-23-28	4N-23-28-1	400	398	66,16	0,03	0,92	0,97	8700	8885	571,83	-0,32	5,26	5,47
								9020			0,24	5,45	
	4N-23-28-2	270			-1,94			8900			0,03	5,34	
								7500			-2,42		
	4N-23-28-3	410			0,18	0,94		9240			0,62	5,63	
								8540			-0,60	5,20	
	4N-23-28-4	460			0,93	1,06		8900			0,03	5,45	
								9300			0,73	5,69	
	4N-23-28-5	420			0,33	0,96		8480			-0,71	5,17	
								9800			1,60	5,97	
	4N-23-28-6	430			0,48	0,98		9340			0,80	5,64	
								8900			0,03	5,37	
4N-23-91	4N-23-91-4	490	510	40,12	-0,50	1,12	1,17	13200	13312,5	1042,75	-0,11	8,00	8,08
								12800			-0,49	7,76	
	4N-23-91-5	485			-0,62	1,13		13300			-0,01	8,21	
								13000			-0,30	8,02	
	4N-23-91-6	495			-0,37	1,13		13100			-0,20	7,96	
								11650			-1,59	7,08	
	4N-23-91-7	550			1,00	1,25		15200			1,81	9,14	
								15000			1,62	9,02	
	4N-23-91-8	470			-1,00	1,09		12600			-0,68	7,68	
								13700			0,37	8,35	
	4N-23-91-9	570			1,50	1,30		14000			0,66	8,42	
								12200			-1,07	7,34	

	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort.(N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort.(N/mm ²)
P-55-7	P-55-7-1	350	546	123,87	-1,58	0,80	1,22	16950	16650	885,23	0,34	10,01	9,74
								15500			-1,30	9,15	
	P-55-7-2	630			0,68	1,42		16700			0,06	9,88	
								16700			0,06	9,88	
	P-55-7-3	640			0,76	1,44		16250			-0,45	9,52	
								16000			-0,73	9,37	
	P-55-7-4	650			0,84	1,42		15850			-0,90	9,32	
								16950			0,34	9,97	
	P-55-7-5	440			-0,85	0,97		16350			-0,34	9,81	
								16050			-0,68	9,63	
	P-55-7-6	565			0,15	1,27		18650			2,26		
								17850			1,36	10,63	
P-55-28	P-55-28-1	755	692	60,06	1,05	1,72	1,56	21800	21166,67	824,71	0,77	13,22	12,64
								21600			0,53	13,10	
	P-55-28-2	670			-0,36	1,50		21550			0,46	13,03	
								21400			0,28	12,94	
	P-55-28-3	640			-0,86	1,45		20300			-1,05	12,19	
								20150			-1,23	12,10	
	P-55-28-4	655			-0,61	1,49		21400			0,28	12,54	
								21600			0,53	12,66	
	P-55-28-5	650			-0,69	1,46		20100			-1,29	11,83	
								19900			-1,54	11,71	
	P-55-28-6	780			1,47	1,78		22400			1,50	13,36	
								21800			0,77	13,00	
P-55-91	P-55-91-1	610	737	106,71	-1,19	1,33	1,66	25600	26200	2436,09	-0,25	15,51	16,15
								27000			0,33	16,36	
	P-55-91-2	600			-1,28	1,34		26500			0,12	15,81	
								28800			1,07	17,18	
	P-55-91-3	850			1,06	1,91		27000			0,33	16,19	
								24900			-0,53	14,93	
	P-55-91-4	820			0,78	1,91		28500			0,94	17,39	
								25400			-0,33	15,50	
	P-55-91-5	780			0,41	1,75		29100			1,19	17,48	
								24800			-0,57	14,90	
	P-55-91-6	760			0,03	1,73		26800			0,25	16,38	
								20000			-2,55		

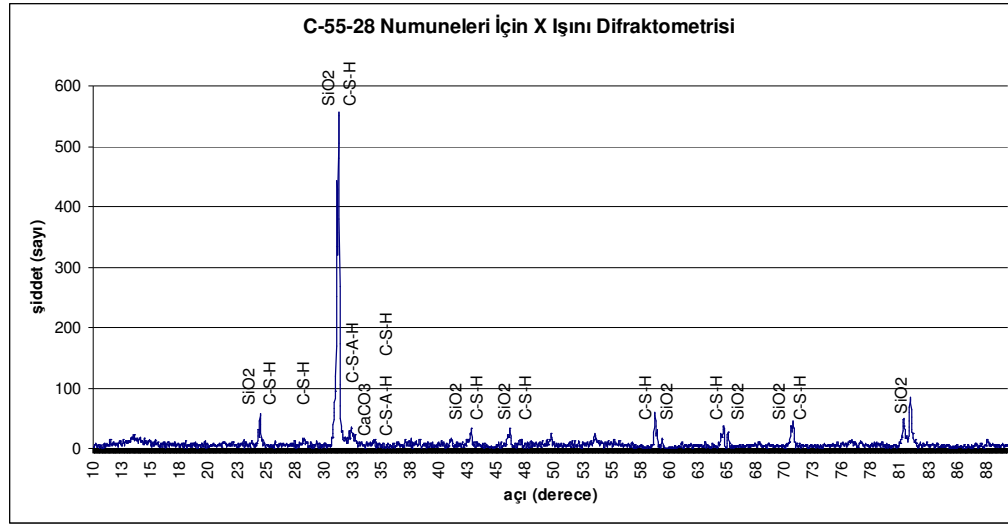
	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort.(N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort.(N/mm ²)
4C-55-7	4C-55-7-1	910	905	40,87	0,12	2,05	2,02	24500	26079,17	2200,56	-0,72	14,47	15,77
								23200			-1,31	13,70	
	4C-55-7-2	860			-1,10	1,92		23000			-1,40	13,75	
								26750			0,30	15,99	
	4C-55-7-3	940			0,86	2,16		27100			0,46	16,25	
								27100			0,46	16,25	
	4C-55-7-4	900			-0,12	1,99		28300			1,01	17,61	
								27800			0,78	17,30	
	4C-55-7-5	960			1,35	2,09		25900			-0,08	15,70	
								28100			0,92	17,03	
4C-55-28	4C-55-7-6	860			-1,10	1,88		28600			1,15	17,44	
								22600			-1,58	13,78	
	4C-55-28-1	1040	1058	78,34	-0,22	2,26	2,26	32600	32150	2166,17	0,21	19,63	19,13
								28700			-1,59	17,28	
	4C-55-28-2	960			-1,24	2,08		30800			-0,62	18,52	
								34450			1,06	20,71	
	4C-55-28-3	1155			1,24	2,49		32900			0,35	20,07	
								32900			0,35	20,07	
	4C-55-28-4	1140			1,05	2,44		30600			-0,72	18,07	
								32900			0,35	19,43	
	4C-55-28-5	990			-0,86	2,13		33600			0,67	19,56	
								33550			0,65	19,53	
4C-55-91	4C-55-28-6	1060			0,03	2,24		28000			-1,92	16,35	
								34800			1,22	20,32	
	4C-55-91-1	1410	1628	230,17	-0,95	3,07	3,49	37500	37483,33	1890,09	0,01	21,76	21,55
								39500			1,07	22,92	
	4C-55-91-2	1390			-1,04	2,98		36200			-0,68	20,85	
								39500			1,07	22,76	
	4C-55-91-3	1460			-0,73	3,12		34700			-1,47	20,11	
								36600			-0,47	21,22	
	4C-55-91-4	1830			0,88	3,92		40700			1,70	23,29	
								38200			0,38	21,86	
	4C-55-91-5	1870			1,05	4,03		35400			-1,10	20,35	
								37000			-0,26	21,27	
4C-55-91	4C-55-91-6	1810			0,79	3,82		35600			-1,00	20,18	
								38900			0,75	22,05	

	harç kodları	eğilme (N)	eğilme ort.(N)	eğilme için standart sapma	$ z > 1,73$	eğilme dayanımı (N/mm ²)	eğilme dayanımı ort.(N/mm ²)	basınç (N)	basınç ort (N)	basınç standart sapma	$ z > 2,02$	basınç dayanımı (N/mm ²)	basınç dayanımı ort.(N/mm ²)
4N-55-7	4N-55-7-1	780	845	91,65	-0,71	1,70	1,85	17600	18645,83	1214,77	-0,86	10,22	10,94
								18700			0,04	10,85	
	4N-55-7-2	850			0,05	1,82		18500			-0,12	10,61	
								19150			0,42	10,98	
	4N-55-7-3	925			0,87	1,98		18250			-0,33	10,45	
								17600			-0,86	10,08	
	4N-55-7-4	810			-0,38	1,82		19400			0,62	11,61	
								18050			-0,49	10,80	
	4N-55-7-5	975			1,42	2,17		19200			0,46	11,43	
								20500			1,53	12,20	
	4N-55-7-6	730			-1,25	1,64		16300			-1,93	9,79	
								20500			1,53	12,31	
4N-55-28	4N-55-28-1	985	869	85,35	1,36	2,19	1,92	22000	22380	2331,98	-0,16	13,08	13,25
								23800			0,61	14,15	
	4N-55-28-2	930			0,71	2,05		21600			-0,33	12,73	
								23700			0,57	13,97	
	4N-55-28-3	880			0,13	1,94		24100			0,74	14,28	
								25200			1,21	14,93	
	4N-55-28-4	820			-0,58	1,83		19400			-1,28	11,57	
								26700			1,85	15,93	
	4N-55-28-5	860			-0,11	1,90		20040			-1,00	11,89	
								20020			-1,01	11,88	
	4N-55-28-6	740			-1,51	1,62		22000			-0,16	12,89	
								20000			-1,02	11,71	
4N-55-91	4N-55-91-1	1020	1007	26,58	0,50	2,28	2,22	26700	26325	1760,75	0,21	15,88	16,15
								24200			-1,21	14,39	
	4N-55-91-2	1010			0,13	2,23		25200			-0,64	14,87	
								25800			-0,30	15,23	
	4N-55-91-3	1020			0,50	2,25		28800			1,41	16,96	
								29200			1,63	17,20	
	4N-55-91-4	980			-1,00	2,17		27000			0,38	15,97	
								28000			0,95	16,56	
	4N-55-91-5	1040			1,25	2,25		26000			-0,18	15,15	
								25800			-0,30	15,03	
	4N-55-91-6	970			-1,38	2,11		23200			-1,77	13,61	
								26000			-0,18	15,25	

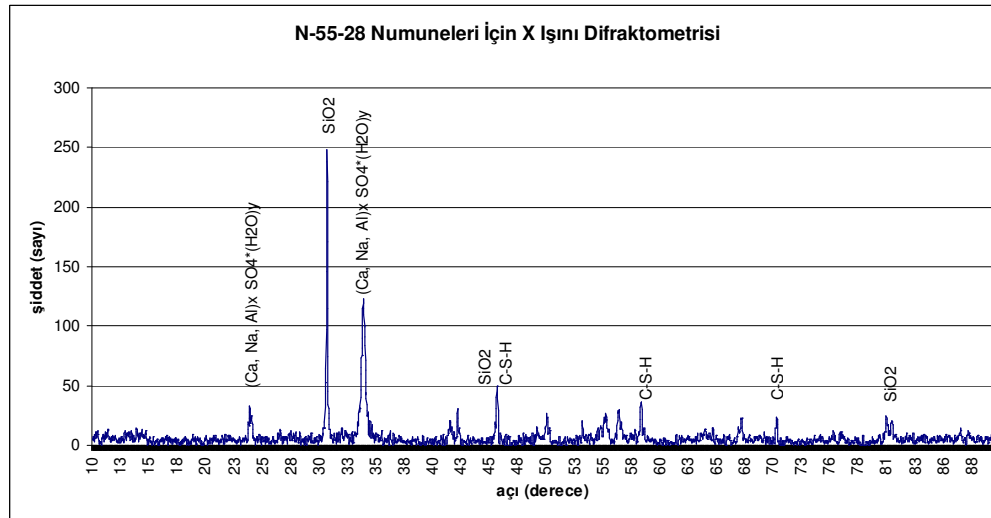
Tablo A.7: Elastiklik modülü

	numune kodu	ultrases hızı (mm/sn)	b.h. ağırlığı (kg/mm ³)	g (mm/sn ²)	e-modülü (kN/mm ²)	e-modülü ort. (kN/mm ²)
P-23-7	P-23-7-1	1557059	0,00000193	9810	4,77	4,85
	P-23-7-2	1573762	0,00000193	9810	4,86	
	P-23-7-3	1574554	0,00000192	9810	4,85	
	P-23-7-4	1553922	0,00000195	9810	4,80	
	P-23-7-5	1569109	0,00000195	9810	4,89	
	P-23-7-6	1585000	0,00000193	9810	4,95	
P-23-28	P-23-28-1	1644433	0,00000189	9810	5,21	5,37
	P-23-28-2	1492150	0,00000192	9810	4,36	
	P-23-28-3	1593900	0,00000191	9810	4,96	
	P-23-28-4	1679579	0,00000194	9810	5,57	
	P-23-28-5	1771333	0,00000194	9810	6,21	
	P-23-28-6	1731848	0,00000193	9810	5,89	
P-23-91	P-23-91-3	1715161	0,00000192	9810	5,76	6,22
	P-23-91-4	1809659	0,00000194	9810	6,49	
	P-23-91-5	1749780	0,00000194	9810	6,04	
	P-23-91-6	1806932	0,00000195	9810	6,48	
	P-23-91-8	1833333	0,00000195	9810	6,68	
	P-23-91-9	1730217	0,00000193	9810	5,88	
4C-23-7	4C-23-7-1	1607172	0,00000195	9810	5,14	5,19
	4C-23-7-2	1559902	0,00000197	9810	4,89	
	4C-23-7-3	1607677	0,00000198	9810	5,20	
	4C-23-7-4	1666979	0,00000197	9810	5,59	
	4C-23-7-5	1611818	0,00000198	9810	5,23	
	4C-23-7-6	1594000	0,00000196	9810	5,08	
4C-23-28	4C-23-28-1	1857209	0,00000195	9810	6,86	7,23
	4C-23-28-2	1875882	0,00000195	9810	7,01	
	4C-23-28-3	1876471	0,00000193	9810	6,94	
	4C-23-28-4	1938415	0,00000195	9810	7,46	
	4C-23-28-5	1939512	0,00000195	9810	7,48	
	4C-23-28-6	1963704	0,00000194	9810	7,63	
4C-23-91	4C-23-91-3	1867294	0,00000193	9810	6,87	7,28
	4C-23-91-4	1893690	0,00000196	9810	7,16	
	4C-23-91-5	1961852	0,00000194	9810	7,61	
	4C-23-91-6	1965062	0,00000196	9810	7,73	
	4C-23-91-7	1852442	0,00000196	9810	6,87	
	4C-23-91-8	1935854	0,00000195	9810	7,43	
4N-23-7	4N-23-7-1	2260857	0,00000197	9810	10,26	9,94
	4N-23-7-2	2260571	0,00000199	9810	10,35	
	4N-23-7-3	2199583	0,00000197	9810	9,73	
	4N-23-7-4	2170274	0,00000198	9810	9,50	
	4N-23-7-5	2169589	0,00000196	9810	9,42	
	4N-23-7-6	2265571	0,00000198	9810	10,37	
4N-23-28	4N-23-28-1	2026667	0,00000193	9810	8,07	8,19
	4N-23-28-2	2029103	0,00000191	9810	8,01	
	4N-23-28-3	2055844	0,00000196	9810	8,43	
	4N-23-28-4	2063506	0,00000197	9810	8,56	
	4N-23-28-5	2018608	0,00000194	9810	8,06	
	4N-23-28-6	2015823	0,00000193	9810	7,99	
4N-23-91	4N-23-91-4	1988375	0,00000192	9810	7,74	8,21
	4N-23-91-5	2088684	0,00000196	9810	8,72	
	4N-23-91-6	1986500	0,00000193	9810	7,77	
	4N-23-91-7	2031795	0,00000196	9810	8,26	
	4N-23-91-8	2023590	0,00000196	9810	8,17	
	4N-23-91-9	2083421	0,00000194	9810	8,60	

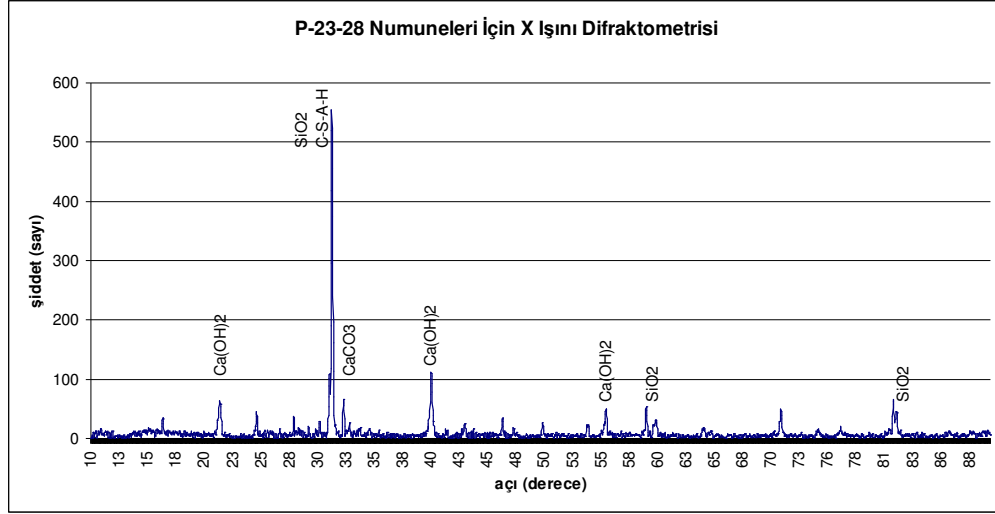
	numune kodu	ultrases hızı (mm/sn)	b.h. ağırlığı (kg/mm ³)	g (mm/sn ²)	e-modülü (kN/mm ²)	e-modülü ort.
P-55-7	P-55-7-1	2813860	0,00000199	9810	16,08	15,92
	P-55-7-2	2718305	0,00000202	9810	15,22	
	P-55-7-3	2808421	0,00000199	9810	16,00	
	P-55-7-4	2758621	0,00000198	9810	15,38	
	P-55-7-5	2723898	0,00000202	9810	15,27	
	P-55-7-6	2912727	0,00000203	9810	17,56	
P-55-28	P-55-28-1	2627869	0,00000200	9810	14,05	14,47
	P-55-28-2	2670333	0,00000203	9810	14,78	
	P-55-28-3	2808246	0,00000202	9810	16,23	
	P-55-28-4	2665667	0,00000200	9810	14,51	
	P-55-28-5	2499688	0,00000196	9810	12,48	
	P-55-28-6	2669500	0,00000203	9810	14,75	
P-55-91	P-55-91-1	2392090	0,00000192	9810	11,18	12,01
	P-55-91-2	2463846	0,00000191	9810	11,82	
	P-55-91-3	2581935	0,00000188	9810	12,77	
	P-55-91-4	2544127	0,00000191	9810	12,58	
	P-55-91-5	2538730	0,00000186	9810	12,24	
	P-55-91-6	2457692	0,00000186	9810	11,47	
4C-55-7	4C-55-7-1	2966852	0,00000199	9810	17,88	18,42
	4C-55-7-2	2914182	0,00000204	9810	17,65	
	4C-55-7-3	3081923	0,00000203	9810	19,64	
	4C-55-7-4	3023396	0,00000203	9810	18,96	
	4C-55-7-5	2964444	0,00000202	9810	18,06	
	4C-55-7-6	2964444	0,00000205	9810	18,32	
4C-55-28	4C-55-28-1	2965926	0,00000202	9810	18,15	18,39
	4C-55-28-2	2967778	0,00000203	9810	18,26	
	4C-55-28-3	2966667	0,00000200	9810	17,90	
	4C-55-28-4	3005849	0,00000205	9810	18,84	
	4C-55-28-5	3009057	0,00000200	9810	18,47	
	4C-55-28-6	3013208	0,00000202	9810	18,74	
4C-55-91	4C-55-91-1	2710847	0,00000188	9810	14,10	15,48
	4C-55-91-2	2802982	0,00000189	9810	15,10	
	4C-55-91-3	2803158	0,00000189	9810	15,16	
	4C-55-91-4	2843929	0,00000191	9810	15,73	
	4C-55-91-5	2946481	0,00000190	9810	16,79	
	4C-55-91-6	2897455	0,00000187	9810	16,00	
4N-55-7	4N-55-7-1	2912182	0,00000204	9810	17,66	17,59
	4N-55-7-2	3021321	0,00000203	9810	18,84	
	4N-55-7-3	2974074	0,00000203	9810	18,34	
	4N-55-7-4	2864643	0,00000205	9810	17,11	
	4N-55-7-5	2969074	0,00000205	9810	18,43	
	4N-55-7-6	2717458	0,00000201	9810	15,15	
4N-55-28	4N-55-28-1	2914364	0,00000205	9810	17,75	17,31
	4N-55-28-2	2914909	0,00000205	9810	17,77	
	4N-55-28-3	2863214	0,00000208	9810	17,35	
	4N-55-28-4	2861250	0,00000205	9810	17,08	
	4N-55-28-5	2913273	0,00000205	9810	17,73	
	4N-55-28-6	2811228	0,00000201	9810	16,16	
4N-55-91	4N-55-91-1	2358529	0,00000190	9810	10,76	12,19
	4N-55-91-2	2538730	0,00000189	9810	12,40	
	4N-55-91-3	2621311	0,00000191	9810	13,39	
	4N-55-91-4	2630328	0,00000192	9810	13,52	
	4N-55-91-5	2396866	0,00000189	9810	11,07	
	4N-55-91-6	2510625	0,00000187	9810	12,02	



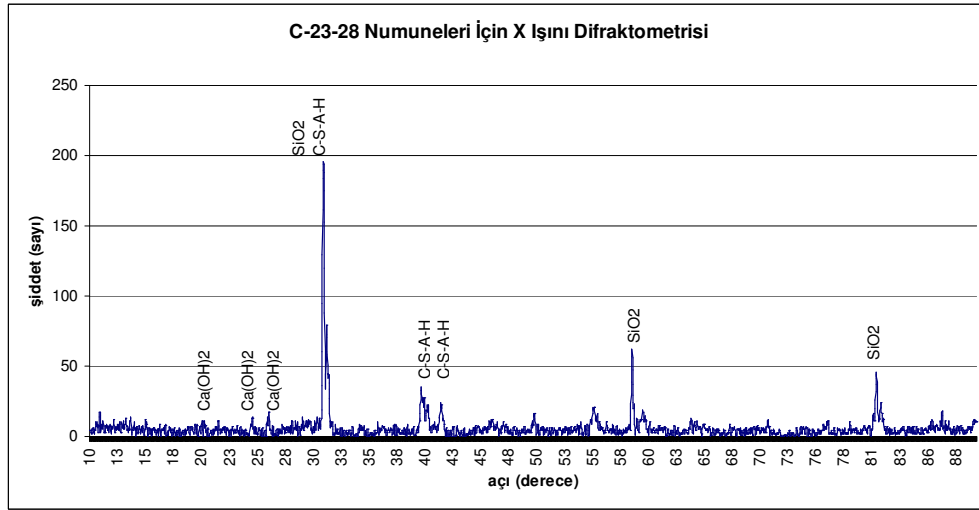
Şekil B.1: 55°C’de 28 gün kürlenene CaCl_2 katkılı numunelerin (C-55-28) XRD analizi



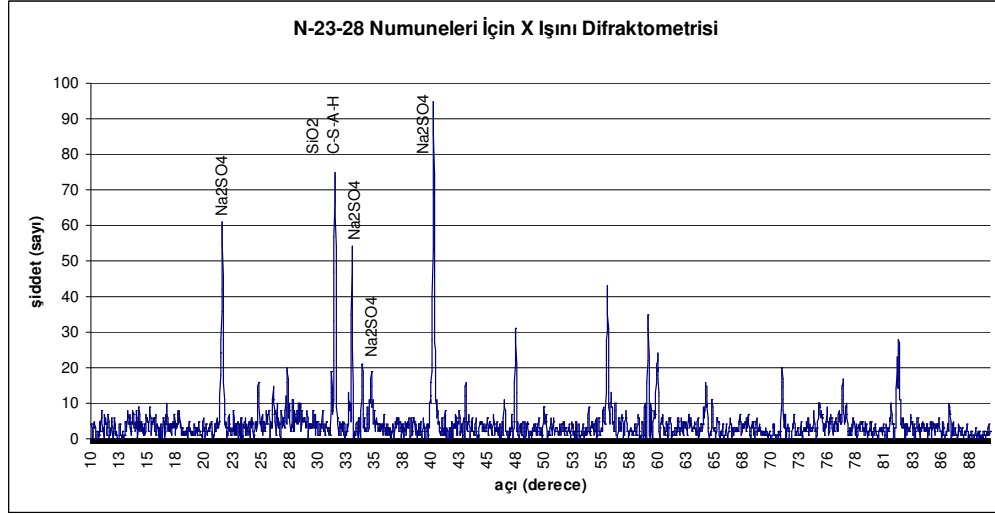
Şekil B.2: 55°C’de 28 gün kürlenene Na_2SO_4 katkılı numunelerin (N-55-28) XRD analizi



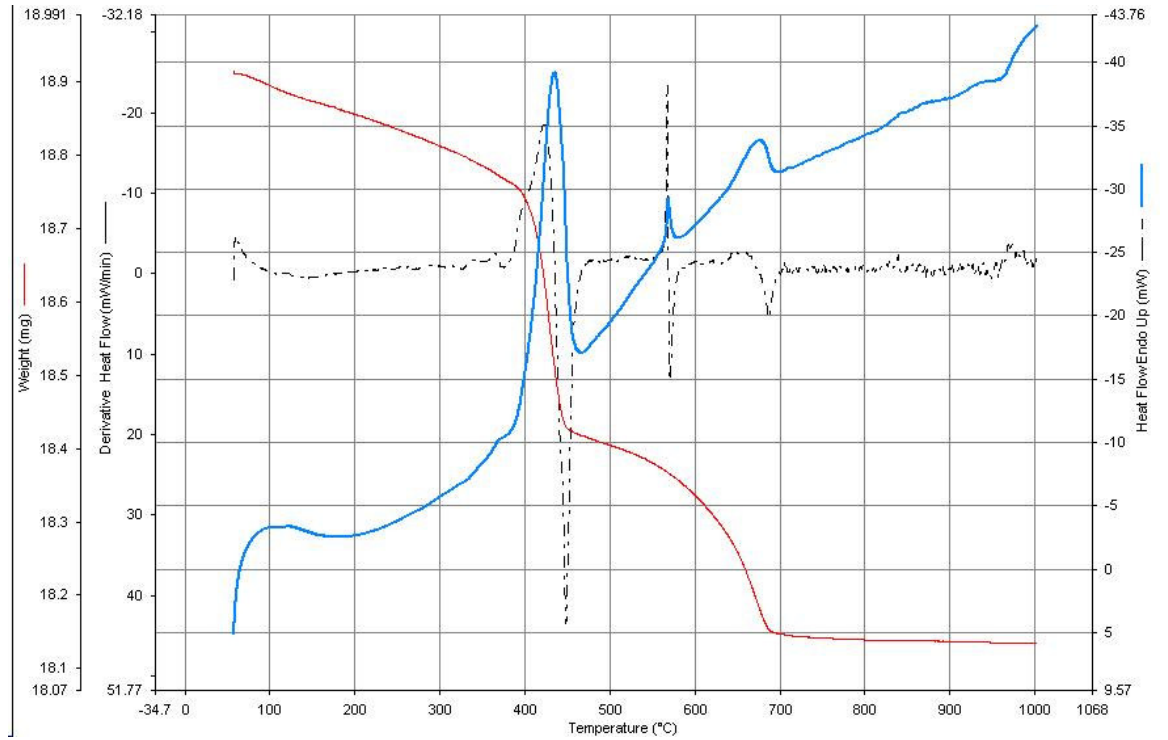
Şekil B.3: 23°C’de 28 gün kürlenlen katkısız numunelerin (P-23-28) XRD analizi



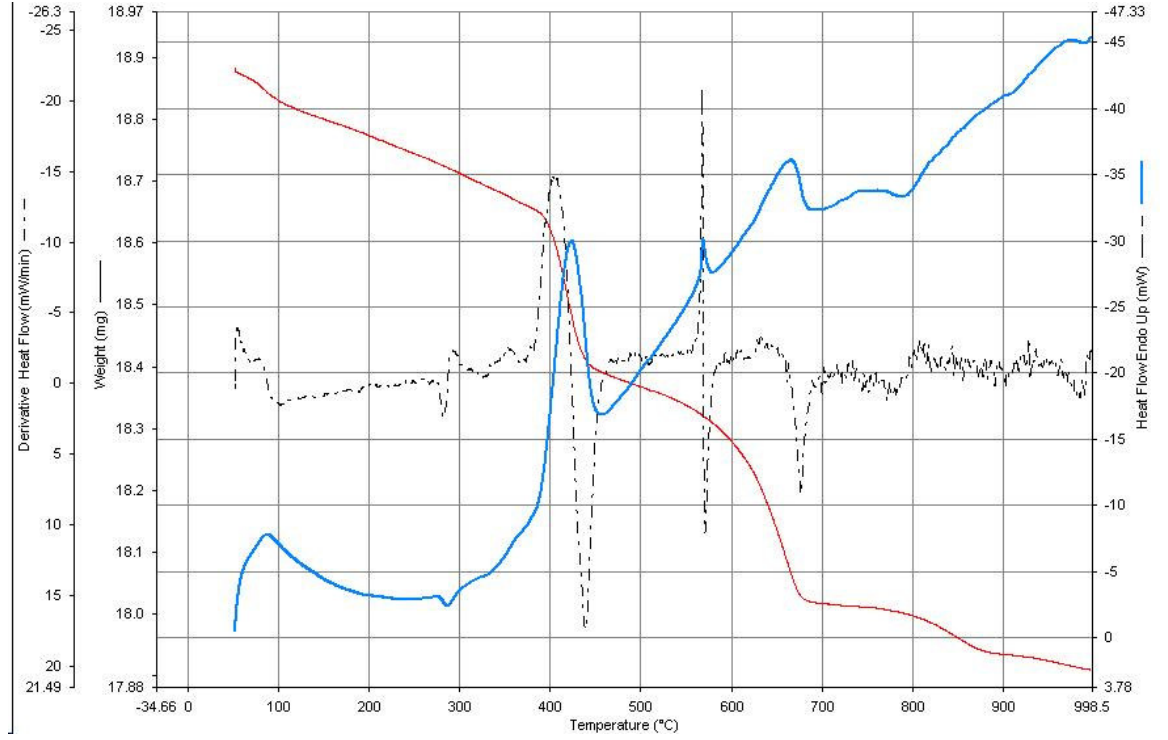
Şekil B.4: 23°C’de 28 gün kürlenlen CaCl₂ katkılı numunelerin (C-23-28) XRD analizi



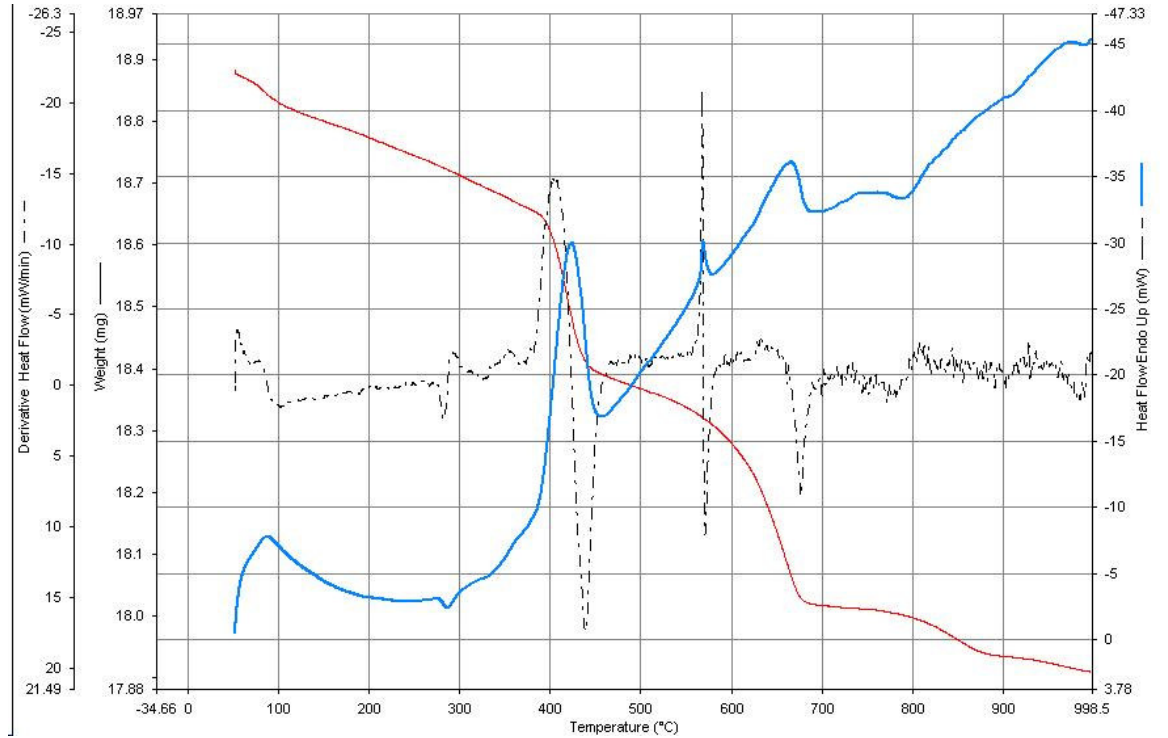
Şekil B.5: 23°C’de 28 gün kürlenene Na₂SO₄ katkılı numunelerin (N-23-28) XRD analizi



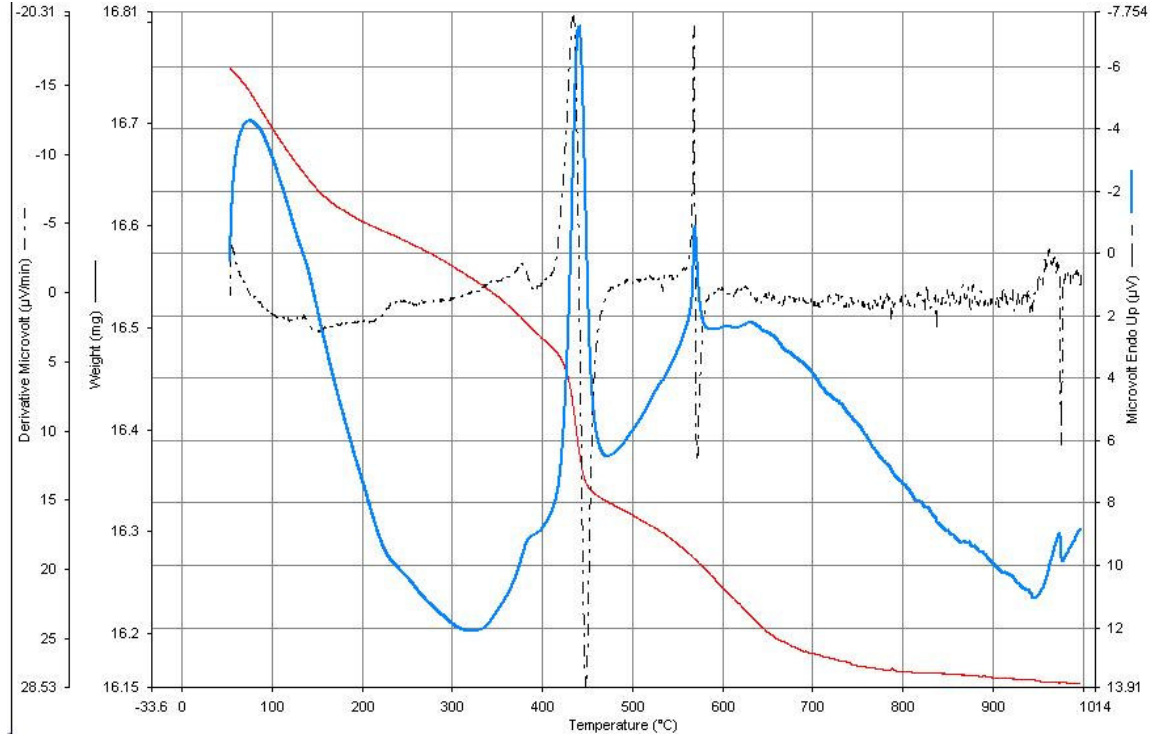
Şekil B.6: 23°C’de 28 gün kürlenene katkısız numunelerin (P-23-28) DTA analizi



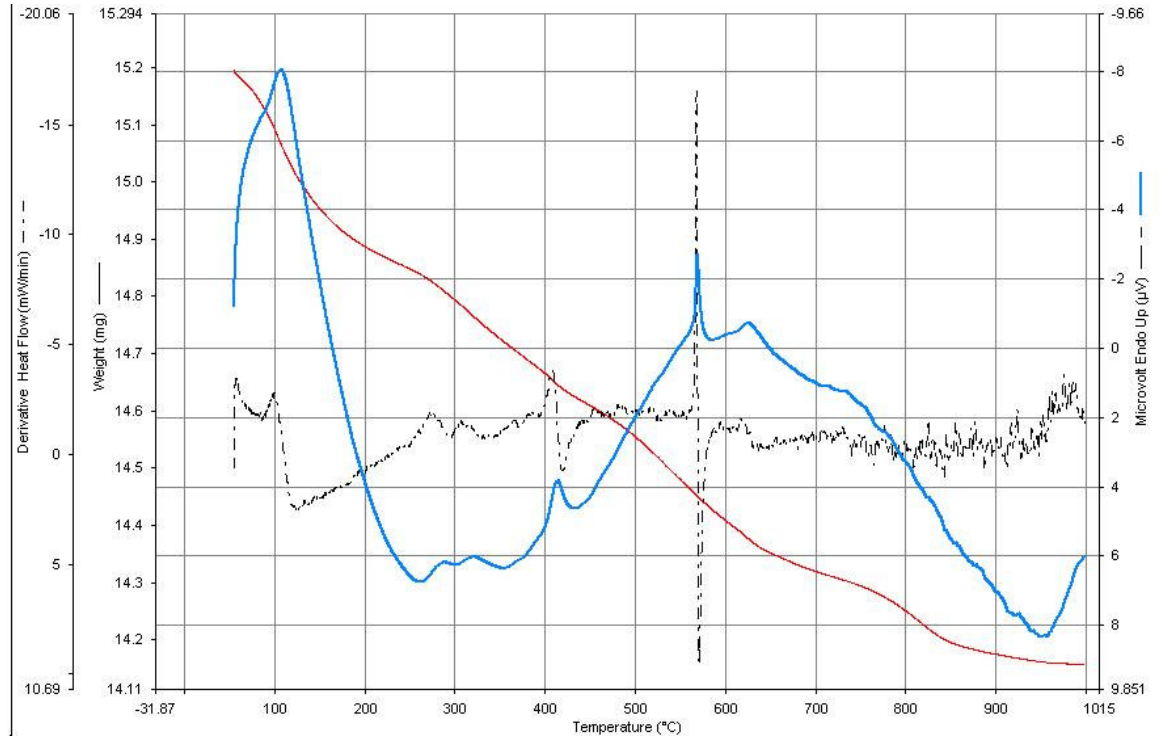
Şekil B.7: 23°C’de 28 gün kürlenmiş CaCl_2 katkılı numunelerin (C-23-28) mineralojik analizi



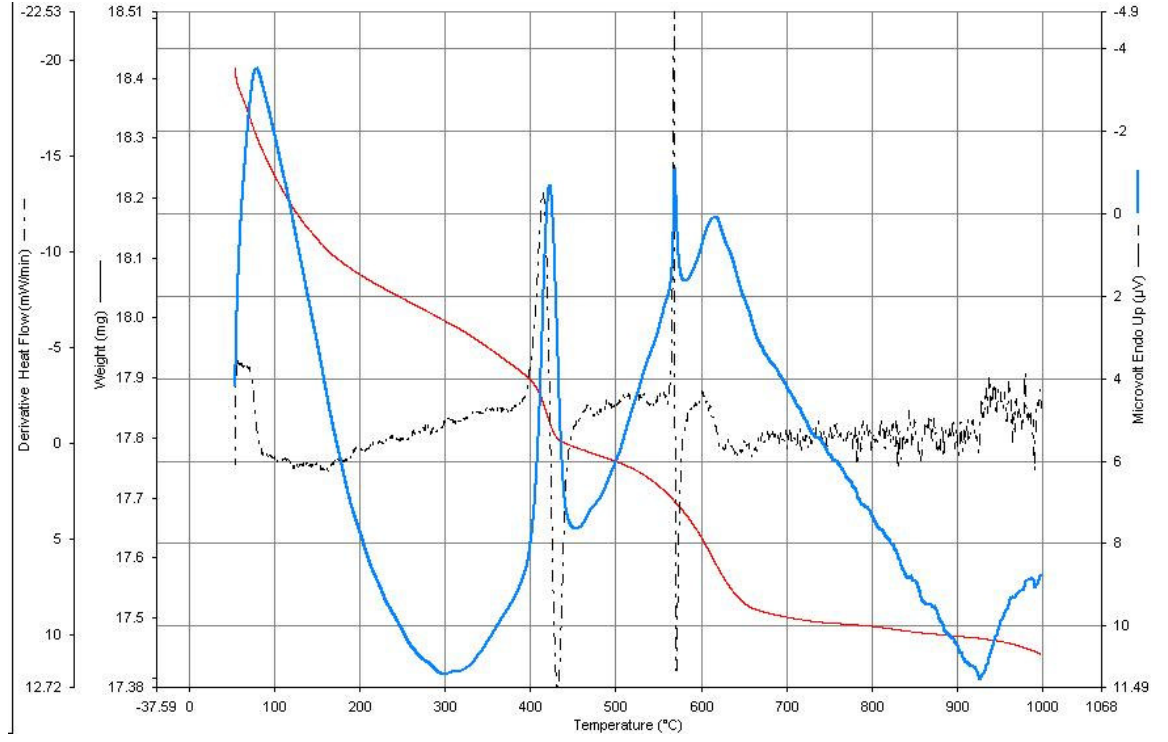
Şekil B.8: 23°C’de 28 gün kürlenmiş Na_2SO_4 katkılı numunelerin (N-23-28) DTA analizi



Şekil B.9: 55°C’de 28 gün kürlenene katkısız numunelerin (P-55-28) DTA analizi



Şekil B.10: 55°C’de 28 gün kürlenene CaCl_2 katkılı numunelerin (C-55-28) DTA analizi



Şekil B.11: 55°C'de 28 gün kürlenmiş Na_2SO_4 katkılı numunelerin (N-55-28) DTA analizi

ÖZGEÇMİŞ

1975 İstanbul doğumludur. 1992 yılında 50. Yıl Çağlayan Lisesi’nden; 1997 yılında, ÖSYM burslusu olarak eğitim gördüğü Lefkoşa, Yakın Doğu Üniversitesi Mimarlık Bölümü’nden mezun oldu. 2001 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı’nda “Pencere Doğramalarının Gelişimi - Ahşap ve Polimer (PVC) Pencere Doğramalarında Tasarım, Üretim ve Uygulama Hataları” konulu yüksek lisans çalışmasını tamamladı. Aynı yıl, Mersin Üniversitesi Mimarlık Fakültesi’ne araştırma görevlisi olarak kabul edildi. Doktora çalışmaları nedeniyle İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’nde görevlendirildi. Mimarlık Anabilim dalında doktora çalışmalarına başladı. Prof. Dr. Nihat Toydemir ile hazırladığı “Çatılar” kitabının ilk baskısı 2004 yılında çıktı. Halen İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalında doktora çalışmalarını sürdürmektedir.Ü