**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Kübra EKİZ BARIŞ**

**Mimarlık Anabilim Dalı**

**Yapı Bilimleri Programı**

**ŞUBAT 2022**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

# DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ

**DOKTORA TEZİ**

**Kübra EKİZ BARIŞ**
**(502162408)**

**Mimarlık Anabilim Dalı**

**Yapı Bilimleri Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Leyla TANAÇAN**

**ŞUBAT 2022**

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502162408 numaralı Doktora Öğrencisi Kübra EKİZ BARIŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

| | | |
|---|---|---|
| **Tez Danışmanı :** | **Prof. Dr. Leyla TANAÇAN**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyeleri :** | **Prof. Dr. Gül KOÇLAR ORAL**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| | **Dr. Öğr. Üyesi Halet Almıla BÜYÜKTAŞKIN**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ..... |
| | **Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY**<br>Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi | ..... |
| | **Prof. Dr. Mustafa Erkan KARAGÜLER**<br>İstanbul Üniversitesi | ..... |

**Teslim Tarihi : 30 Aralık 2021**
**Savunma Tarihi : 4 Şubat 2022**

***Kıymetli Aileme,***

## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca yakın ilgi ve desteğini gördüğüm danışmanım Sayın Prof. Dr. Leyla TANAÇAN'a;

Bilgi ve görüşlerinden yararlandığım jüri üyelerim Sayın Prof. Dr. Halit Yaşa ERSOY ve Sayın Dr. Öğretim Üyesi Halet Almıla BÜYÜKTAŞKIN'a;

Deney sürecinde yardımını esirgemeyen, İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvar görevlisi Sayın Öğretim Görevlisi Dr. Erman Yiğit TUNCEL ve laboratuvar teknikeri Sayın İbrahim ÖZTÜRK'e;

İnce kesit hazırlanması konusunda yardımlarını esirgemeyen İTÜ Jeoloji Fakültesi İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı sorumlusu Sayın Prof. Dr. Emin ÇİFTÇİ ve laboratuvar teknikeri Sayın Mehmet Ali ORAL'a;

Isı iletkenlik katsayısının tayini konusunda destek olan İTÜ Makine Fakültesi Isı ve Kütle Geçişi Laboratuvarı sorumlusu Sayın Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR ve asistanı Sayın Araş. Gör. Ali Murat BİNARK'a;

Kimyasal ve minerolojik incelemelerde destek olan Sayın Prof. Dr. Mustafa KUMRAL'a;

Deneylerde kullanılan puzolanın öğütülmesinde ve özgül yüzey alanının tayininde yardımcı olan Akçansa Çimento'ya;

Deneylerde kullanılan alüminyum tozu ve silis kumunun temininde destek olan Ytong Sanayi A.Ş.'e;

Doktora çalışmam boyunca her koşulda beni destekleyen kıymetli eşime ve biricik oğluma;

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2022

Kübra Ekiz BARIŞ
(Yüksek Mimar)

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ..... **vii**
**İÇİNDEKİLER** ..... **ix**
**KISALTMALAR** ..... **xiii**
**SEMBOLLER** ..... **xv**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **xvii**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **xix**
**ÖZET** ..... **xxiii**
**SUMMARY** ..... **xxvii**
**1. GİRİŞ……..1**
1.1 Tezin Konusu ve Amacı ..... 3
1.2 Kapsam ..... 3
1.3 Yaygın Etki ..... 4
1.4 Yöntem ..... 5
**2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI…...……...7**
2.1 Jeopolimer ..... 7
2.1.1 Tarihsel arka plan ..... 8
2.1.2 Reaksiyon mekanizması ..... 10
2.1.2.1 Yüksek kalsiyum içeren maddelerin reaksiyon mekanizması ..... 11
2.1.2.2 Düşük kalsiyum içeren maddelerin reaksiyon mekanizması ..... 12
2.1.3 Jeopolimer malzemelerin özeliklerini etkileyen etkenler ..... 16
2.1.3.1 Kullanılan alüminosilikat kaynağının özelikleri ..... 16
2.1.3.2 Alkali aktivatör türü ve molar konsantrasyonu ..... 18
2.1.3.3 Kür koşulları ..... 20
2.1.4 Jeopolimerin avantajları ve dezavantajları ..... 21
2.1.5 Jeopolimerin yapı sektöründe kullanım alanları ..... 23
2.2 Hafif Jeopolimer (Jeopolimer Köpük) ..... 33
2.2.1 Hafif jeopolimer üretim yöntemleri ..... 33
2.2.1.1 Kimyasal köpürtme ..... 33
2.2.1.2 Mekanik köpürtme ..... 34
2.2.1.3 Katı jeopolimerin şişmesi ..... 35
2.2.1.4 Mikrodalga ışıması ..... 35
2.2.1.5 Diğer yöntemler ..... 36
2.2.2 Hafif jeopolimer özelikleri ..... 36
2.2.2.1 Porozite ve gözenek yapısı ..... 36
2.2.2.2 Birim hacim ağırlık ..... 37
2.2.2.3 Isı iletkenlik katsayısı ..... 38
2.2.2.4 Basınç dayanımı ..... 38
2.2.2.5 Eğilmede çekme dayanımı ..... 38
2.3 Konuyla İlgili Yayınların Değerlendirilmesi ve Deneysel Çalışmanın Planlanması ..... 39

2.3.1 Doğal puzolanik maddelerden jeopolimer bağlayıcı üretimi olanaklarının araştırıldığı çalışmalar ..... 39
2.3.2 Hafif jeopolimer (köpük) üretimi olanaklarının araştırıldığı çalışmalar ... 47
**3. DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ ..... 59**
3.1 Kullanılan Malzemeler ..... 60
3.1.1 Puzolan ..... 60
3.1.2 Alkali aktivatörler ..... 66
3.1.3 Dolgu maddeleri ..... 67
3.1.4 Köpük oluşturucu ajan ..... 68
3.2 Deneysel Yöntem ..... 68
3.2.1 Doğal puzolan esaslı jeopolimer bağlayıcı üretimi ..... 68
3.2.1.1 Karışım oranları ve kabul edilen esaslar ..... 69
3.2.1.2 Karışımların hazırlanması ..... 70
3.2.1.3 Kür koşulları ..... 71
3.2.1.4 Üretilen numunelerin kodlanması ..... 71
3.2.2 Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer köpük üretimi ..... 73
3.2.2.1 Karışım oranları ve kabul edilen esaslar ..... 73
3.2.2.2 Karışımların hazırlanması ..... 74
3.2.2.3 Kür koşulları ..... 75
3.2.2.4 Üretilen numunelerin kodlanması ..... 75
3.2.3 Deneyler ..... 76
3.2.3.1 Fiziksel özeliklerin belirlenmesi için uygulanan deneyler ..... 76
3.2.3.2 Mekanik özeliklerin belirlenmesi için uygulanan deneyler ..... 85
3.2.3.3 Isıl performansın belirlenmesi için uygulanan deneyler ..... 86
3.2.3.4 Makro boyutlu boşluk yapısının belirlenmesi için uygulanan deneyler ..... 90
3.2.4 Deney sonuçları ..... 91
**4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ……...93**
4.1 Doğal Puzolan Esaslı Jeopolimer Bağlayıcı Üretimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi ..... 96
4.1.1 Datça Puzolanı'nın kimyasal bileşiminin jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 96
4.1.2 Alkali aktivatör türünün jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 98
4.1.3 Kür koşullarının jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 100
4.1.4 Jeopolimer bağlayıcı ve harç özeliklerinin kıyaslanması ..... 101
4.1.5 Alkali hidroksit konsantrasyonunun jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 102
4.1.6 Aktivatör oranının jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 105
4.1.7 Toplam alkali aktivatör / puzolan oranının jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 108
4.1.8 Datça Puzolanı esaslı jeopolimerin iç/dış koruyucu duvar katmanı olarak kullanım olanaklarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 111
4.2 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Köpük Üretimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi ..... 112

4.2.1 İnce kum / puzolan oranının hafif jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 112
4.2.2 Alüminyum tozu / puzolan oranının hafif jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 118
4.2.3 Datça Puzolanı esaslı hafif jeopolimerin ısıl yalıtıma sahip çekirdek katmanı olarak kullanım olanaklarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi ..... 124
4.3 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Duvar Malzemesinin Türkiye'nin İklim Bölgelerinde Kullanılma Olanaklarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi ..... 126
4.4 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Duvar Malzemesi Kesitinin Türkiye'nin İklim Bölgelerinde Kullanılan Geleneksel Çok katmanlı Dış Duvar Kesitiyle Karşılaştırılması ..... 133
**5. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 139**
**KAYNAKLAR ..... 145**
**EKLER ..... 163**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 199**

## KISALTMALAR

**Al/P** : Alüminyum Tozu/Puzolan
**ASTM** : The American Society for Testing and Materials
**BB** : Bims Beton
**C-A-S-H** : Kalsiyum Alüminat Hidrat
**CK** : Cam Köpüğü
**C-S-H** : Kalsiyum Silikat Hidrat
**CSIR** : Central Building Research Institute
**DDHT** : Düşey Delikli Hafif Tuğla
**DT** : Datça Toprağı
**EPBD** : Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği
**GB** : Gazbeton
**IPCC** : Intergovernmental Panel on Climate Change
**IYS** : Isı Yalıtım Sıvası
**İK/P** : İnce Kum/Puzolan
**K** : Potasyum Hidroksit
**KB** : Köpük Beton
**M** : Molar Konsantrasyon, Molarite
**N** : Sodyum Hidroksit
**N-A-S-H** : Alkali Alüminosilikat Hidrat
**PE** : Polietilen
**SS** : Sodyum Silikat
**SS/MOH** : Aktivatör Oranı
**SW** : Sert İklim
**UOB** : Uçucu Organik Bileşik
**XRD** : X-Işınları Difraktometresi, Kalitatif Faz Analizi
**XRF** : X-Işını Floresan Spektrometre, Yarı Kantitatif Element Analizi

## SEMBOLLER

**A** : Suya batırılmış yüzey alanı
**$A_b$** : Atmosfer basıncı altında kütlece su emme
**b** : Numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu
**d** : Numune kalınlığı
**$D_{eşdeğer}$** : Eşdeğer daire çapı
**e** : Gözeneklilik
**$F_b$** : Kabarcık kaldırma kuvveti
**$F_c$** : Kabarcık sınırlama kuvveti
**$F_{co}$** : Kırılma anındaki en büyük yük
**$F_f$** : Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük
**g** : Su buharı iletim debisi
**h** : Numune yüksekliği
**k** : Kompasite
**$K_b$** : Blaine alet sabiti
**l** : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe
**L** : Numune uzunluğu
**m** : Malzeme kütlesi
**$m_i$** : Deney esnasında numunenin ardışık kütleleri
**$m_k$** : Kabın kütlesi
**$m_{kn}$** : Kap + numunenin kütlesi
**$m_{kns}$** : Kap + su + numunenin kütlesi
**$m_{sd}$** : Su dolu kabın kütlesi
**$m_d$** : Kuru numunenin kütlesi
**$m_h$** : Su içerisine batırılmış numunenin kütlesi
**$m_s$** : Suya doymuş numunenin kütlesi
**n** : Polikondansasyon derecesi
**N** : Ölçüm sayısı
**$N_k$** : Kapilarite katsayısı
**p** : Deney sırasındaki ortalama barometrik basınç
**$p_0$** : Normal barometrik basınç
**P** : Porozite
**Q** : Numuneden geçen ısı akısı
**$R_c$** : Basınç dayanımı
**$R_d$** : Su buharı gaz sabiti
**$R_f$** : Eğilmede çekme dayanımı
**$R_{ve}$** : Hacimsel genleşme oranı
**S** : Özgül yüzey alanı
**$S_0$** : Referans çimentonun özgül yüzeyi
**$S_{pi}$** : Boşluğun ölçülen yüzey alanı
**t** : Süre
**$t_0$** : Akış süresinin ortalaması
**T** : Kelvin cinsinden sıcaklık

**T/x** : Sıcaklık gradyanı
**V** : Numune hacmi
**$V_f$** : Genleşmiş harcın son hacmi
**$V_i$** : Taze harcın ilk hacmi
**$v_u$** : Ultrases hızı
**W** : Su buharı geçiş hızı
**μ** : Su buhari difüzyon direnç faktörü
**μm** : Mikrometre
**ŋ** : Hava viskozitesi
**ρ** : Birim hacim ağırlık
**ρr** : Özgül kütle
**δ** : Su buharı geçirgenliği
**δh** : Havanın su buharı geçirgenliği
**λ** : Isı iletkenlik katsayısı
**1/Λ** : Isı geçirgenlik direnci
**Δp** : Su buharı basınç farkı
**ΔT** : Numunenin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı
**1/αi** : İç yüzey ısıl iletim direnci
**1/αd** : Dış yüzey ısıl iletim direnci

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**

**Çizelge 2.1 :** Bağlayıcıların üretiminden kaynaklanan $CO_2$ emisyonları. ..... **21**
**Çizelge 2.2 :** Farklı köpürtme yöntemleriyle elde edilen gözenek özelikleri. ..... **37**
**Çizelge 3.1 :** Datça Puzolanı, sönmüş kireç ve kireç-puzolan harcının kimyasal bileşimi. ..... **65**
**Çizelge 3.2 :** Sodyum silikatın (SS) özelikleri. ..... **67**
**Çizelge 3.3 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının karışım oranları ve kür koşulları. ..... **72**
**Çizelge 3.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün karışım oranları ve kür koşulları. ..... **76**
**Çizelge 3.5 :** Bir sonucu elemek için gereken Şovöne kriteri. ..... **92**
**Çizelge 4.1 :** Doğal puzolan esaslı jeopolimer üretimi deney sonuçları. ..... **94**
**Çizelge 4.2 :** Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer üretimi deney sonuçları. ..... **95**
**Çizelge 4.3 :** Farklı doğal puzolanların kimyasal bileşimlerinin ve bu puzolan esaslı jeopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması. **97**
**Çizelge 4.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harç özeliklerinin cephede kullanılan tuğla malzemelerin özelikleriyle karşılaştırılması. ..... **111**
**Çizelge 4.5 :** İnce kum/puzolan oranının, genleşmiş numunelerin hacimsel genleşme oranı ve yüzey özelikleri üzerindeki etkileri. ..... **113**
**Çizelge 4.6 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün özeliklerinin diğer inorganik duvar ve yalıtım malzemelerinin özelikleriyle karşılaştırılması. ..... **125**
**Çizelge 4.7 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük özeliklerinin çeşitli alüminosilikat kaynaklarından ve köpürtücü ajanlardan üretilen jeopolimer köpük özelikleriyle karşılaştırılması. ..... **126**
**Çizelge 4.8 :** Derece gün bölgelerinde zorunlu U değerleri. ..... **127**
**Çizelge 4.9 :** Türkiye iklim bölgelerine göre tasarlanan monolitik duvar malzemesi kesitinin katmanlaşması, $U_{duvar}$ değeri, yoğuşma tahkiki ve toplam duvar kalınlığı. ..... **130**
**Çizelge 4.10 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi kesitinin ve geleneksel çok katmanlı duvar kesitlerinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değeri ve toplam duvar kalınlığı bakımından karşılaştırılması. ..... **135**
**Çizelge A.1 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait özgül kütle deney sonuçları. ..... **164**
**Çizelge A.2 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait özgül kütle deney sonuçları. ..... **166**
**Çizelge A.3 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait birim hacim ağırlık deney sonuçları. ..... **167**
**Çizelge A.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait birim hacim ağırlık deney sonuçları. ..... **169**

**Çizelge A.5 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları. ..... **170**
**Çizelge A.6 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait su emme deney sonuçları. ..... **177**
**Çizelge A.7 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait su emme deney sonuçları. ..... **179**
**Çizelge A.8 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kompasite ve porozite deney sonuçları. ..... **180**
**Çizelge A.9 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait kompasite ve porozite deney sonuçları. ..... **182**
**Çizelge A.10 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait ultrases hızı deney sonuçları. ..... **183**
**Çizelge A.11 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ultrases hızı deney sonuçları. ..... **185**
**Çizelge A.12 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait elastiklik modülü deney sonuçları. ..... **186**
**Çizelge A.13 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait elastiklik modülü deney sonuçları. ..... **188**
**Çizelge A.14 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları. ..... **189**
**Çizelge A.15 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları. ..... **194**
**Çizelge A.16 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları. ..... **196**

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 1.1 :** Tasarlanan monolitik duvar malzemesinin kesiti. ..... **4**
**Şekil 2.1 :** Alkali-aktive edilmiş malzemelerin sınıflandırılması ve Portland-esaslı ve kalsiyum sülfoalüminat-esaslı bağlayıcıların kimyasal yapılarıyla kıyaslanması. ..... **8**
**Şekil 2.2 :** Alkali ile aktive edilmiş cürufun reaksiyon mekanizma modeli. ..... **11**
**Şekil 2.3 :** N-A-S-H jeli oluşum modeli. ..... **14**
**Şekil 2.4 :** N-A-S-H jelinin üç boyutlu yapısı. ..... **15**
**Şekil 2.5 :** Alkali aktive edilmiş bağlayıcının ve jeopolimerin genel reaksiyon mekanizmaları. ..... **15**
**Şekil 2.6 :** Jeopolimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan öncül (precursor) maddeler. ..... **16**
**Şekil 2.7 :** (a) Belçika'daki "Parking 58" binası; (b) Ukrayna'da alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı prekast bloklardan inşa edilmiş konut binası. ..... **24**
**Şekil 2.8 :** Jeopolimer kaplı yangına dayanıklı ahşap panel. ..... **25**
**Şekil 2.9 :** (a) Alkali aktive edilmiş Portland-uçucu kül betonu ile inşa edilmiş 6 katlı bina; (b) Aynı malzeme kullanılarak inşa edilen atölye.. ..... **26**
**Şekil 2.10 :**1988'de alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı kiremitle kaplanmış ev. ..... **26**
**Şekil 2.11 :**(a) 1994 yılında Rusya'da alkali aktive edilmiş cüruf betonu ile inşa edilmiş 20 katlı konut binası (Palomo, 2014); (b) Yerinde dökme alkali aktive edilmiş cüruf betonu (solda) ve Portland çimentosu betonu (sağda). ..... **27**
**Şekil 2.12 :**(a) ASCEM Çimento kaldırım üniteleri; (b) Kanalizasyon boruları. ..... **27**
**Şekil 2.13 :**(a) Melbourne'deki Salmon Street Köprüsü üzerindeki E-Crete prefabrik kaldırım panelleri; (b) Melbourne'deki Brady Limanında E-Crete yerinde dökme kaldırımlar. ..... **28**
**Şekil 2.14 :**(a) Melbourne'deki Swan Street Köprüsü'ndeki E-Crete istinat duvarı; (b) Melbourne'deki Melton Kütüphanesinin dış duvarlarında E-Crete panel kaplaması. ..... **29**
**Şekil 2.15 :** Jeopolimer beton kaplama işlerinin (a) genel planı ve (b) hava fotoğrafı. ..... **29**
**Şekil 2.16 :** Avustralya'daki Global Change Institute Binası'nın prekast jeopolimer kirişleri. ..... **30**
**Şekil 2.17 :** Yangına maruz kaldıktan sonra kompozitlerin eğilme mukavemeti oranı. ..... **30**
**Şekil 2.18 :** (a) Kaplanmamış poliüretan altlık; (b) Jeopolimer kaplı karbon dokuma. ..... **31**
**Şekil 2.19 :** (a) Yangına dayanıklı püskürtülmüş jeopolimer köpük; (b) Deniz kıyısında kullanılan jeopolimer beton yapı elemanları. ..... **31**
**Şekil 2.20 :** Jeopolimer harç ile kanalizasyonun onarımı. ..... **32**
**Şekil 2.21 :** Jeopolimer dolu, delikli ve köpürtülmüş tuğlalar. ..... **32**

**Şekil 3.1 :** Datça Puzolanı'nın alındığı bölgenin haritası. ..... **60**
**Şekil 3.2 :** Datça Puzolanı'nın alındığı alan. ..... **60**
**Şekil 3.3 :** (a) Datça Puzolanı'nın etüvde kurutulması; (b) Datça Puzolanı'nın bilyalı değirmende öğütülmesi. ..... **61**
**Şekil 3.4 :** Blaine aleti. ..... **62**
**Şekil 3.5 :** Datça Puzolanı'nın tanecik boyutu dağılımı. ..... **64**
**Şekil 3.6 :** Datça Puzolanı ve kireç-puzolan harcının XRD analizi. ..... **66**
**Şekil 3.7 :** (a) Sodyum hidroksit (NaOH); (b) Potasyum hidroksit (KOH); (c) Sodyum silikat (Na2SiO3) kimyasalları ..... **66**
**Şekil 3.8 :** (a) CEN standart kumu; (b) İnce öğütülmüş silis kumu. ..... **67**
**Şekil 3.9 :** Standart ve ince kumun tanecik boyutu dağılımı. ..... **68**
**Şekil 3.10 :** Deneylerde kullanılan alüminyum tozu (Al). ..... **68**
**Şekil 3.11 :** (a) Kuru hammaddelerin karıştırılması; (b) Karışıma alkali aktivatörlerin eklenmesi; (c) Numunelerin kalıplanması. ..... **71**
**Şekil 3.12 :** (a) Numunelerin PE kaplanarak ön kürlemeye tabi tutulması; (b) Ön kürleme sonrasında kalıpların sökülmesi; (c) Etüv kürü sonunda üretilen numuneler. ..... **72**
**Şekil 3.13 :** (a) Kalıpları yerleştirdikten 10 dakika sonra numuneler; (b) Kalıpları yerleştirdikten 30 dakika sonra gözlenen çökme olayı. ..... **74**
**Şekil 3.14 :** Su dolu cam kabın içesinde bekletilen malzemenin tartımı. ..... **76**
**Şekil 3.15 :** Kapiler su emme deneyinin uygulanması. ..... **78**
**Şekil 3.16 :** Su emme deneyinin uygulanması. ..... **79**
**Şekil 3.17 :** Buhar geçirgenlik direnci deneyinin uygulanması. ..... **81**
**Şekil 3.18 :** Ultrases hızı deney cihazı. ..... **84**
**Şekil 3.19 :** Numunelerin eğilmede çekme dayanımı deneyine tabi tutulması. ..... **85**
**Şekil 3.20 :** Isı akımlarının gösterimi. ..... **87**
**Şekil 3.21 :** Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı kesit şeması. ..... **89**
**Şekil 3.22 :** (a) Isı iletkenlik katsayısı deneyinin uygulandığı 100 mm çap ve 10 mm kalınlığa sahip dairesel numuneler; (b) Numunelerin bakır plakalar arasına yerleştirilmesi; (c) Deney düzeneğinin ısı yalıtım malzemesi ile kaplanması. ..... **90**
**Şekil 3.23 :** (a) Jeopolimer köpüğün kesilmesi; (b) Jeopolimer köpüğün ince kesit haline getirilmesi. ..... **91**
**Şekil 4.1 :** Çeşitli alkali aktivatörlerle aktive edilmiş Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının mekanik özelikleri. ..... **98**
**Şekil 4.2 :** 7.5 M SS+KOH ile aktive edilen Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının farklı kür koşulları altındaki mekanik özelikleri. ..... **100**
**Şekil 4.3 :** Farklı aktivatör oranına sahip numunelerin fiziksel özelikleri üzerinde KOH konsantrasyonunun etkisi. ..... **103**
**Şekil 4.4 :** Farklı aktivatör oranına sahip numunelerin mekanik özelikleri üzerinde KOH konsantrasyonunun etkisi. ..... **104**
**Şekil 4.5 :** Farklı KOH konsantrasyonuna sahip numunelerin fiziksel özelikleri üzerinde aktivatör oranının etkisi ..... **106**
**Şekil 4.6 :** Farklı KOH konsantrasyonuna sahip numunelerin mekanik özelikleri üzerinde aktivatör oranının etkisi ..... **107**
**Şekil 4.7 :** Toplam alkali aktivatör/puzolan oranının numunelerin fiziksel özelikleri üzerindeki etkisi. ..... **109**
**Şekil 4.8 :** Toplam alkali aktivatör/ puzolan oranının numunelerin mekanik özelikleri üzerindeki etkisi. ..... **109**

**Şekil 4.9 :** Toplam alkali aktivatör / puzolan oranındaki değişikliklere bağlı olarak üretilen numuneler: (a) 0.1 aktivatör/puzolan; (b) 0.2 aktivatör/puzolan; (c) 0.3 aktivatör/puzolan; (d) 0.4 aktivatör/puzolan; (e) 0.5 aktivatör/puzolan. ..... **110**
**Şekil 4.10 :** İnce kum / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri. ..... **114**
**Şekil 4.11 :** Çeşitli ince kum/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin optik mikroskop (10x) görüntüleri. ..... **115**
**Şekil 4.12 :** Artan ince kum/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları, ortalama ve maksimum boşluk çapı değerleri. ..... **116**
**Şekil 4.13 :** İnce kum/puzolan oranının bir fonksiyonu olarak Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin toplam gözenek alanı ve porozitesi. ..... **117**
**Şekil 4.14 :** Al tozu / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri. ..... **118**
**Şekil 4.15 :** Çeşitli Al tozu/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin optik mikroskop (10x) görüntüleri. ..... **119**
**Şekil 4.16 :** Çeşitli Al tozu/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları, ortalama ve maksimum boşluk çapı değerleri. ..... **120**
**Şekil 4.17 :** (a) Bir numunede iki farklı bölgeden elde edilen ultrases hızı; (b) Hesaplanan homojenlik yüzdesi. ..... **121**
**Şekil 4.18 :** Al tozu/puzolan oranının porozite, ortalama gözenek çapı, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri. ..... **122**
**Şekil 4.19 :** Derece gün bölgelerine göre illerimiz. ..... **127**
**Şekil 4.20 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değerleri ve toplam duvar kalınlıklarının karşılaştırılması. ..... **133**
**Şekil 4.21 :** Karşılaştırması yapılan duvar kesitleri: (a) Düşey delikli hafif tuğla gövdeli geleneksel çok katmanlı duvar; (b) Gazbeton gövdeli geleneksel çok katmanlı duvar; (c) Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi. ..... **134**
**Şekil 4.22 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi kesitinin ve geleneksel çok katmanlı duvar kesitlerinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değeri ve toplam duvar kalınlığı bakımından karşılaştırılması ..... **136**

# DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ

## ÖZET

İskelet sistemli yapılarda yoğunluğu en fazla 1 gr/cm$^3$ ve basınç dayanımı 2.5-7.5 MPa olan yatay ve düşey delikli pişmiş toprak tuğla, gazbeton blok ve bimsblok gibi bölücü duvar malzemeleri, TS 825 standardında belirtilen $U_{duvar}$ değerlerini "ince kesitli halde" tek başına sağlayamamaktadır. Diğer yandan, gözenekli bir yapıya sahip olan bu malzemelerin, dış iklim koşullarına karşı herhangi bir koruyucu katman olmaksızın kullanılması halinde fiziksel ve mekanik performansının yüksek olması beklenemez. Bundan dolayı, yapı kabuğu tasarımında, kendini taşıma, ısı yalıtımı sağlama ve kaplama işlevlerinin farklı malzemeler tarafından karşılandığı katmanlı duvar kesiti yaklaşımı günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, çok sayıda farklı malzeme aynı duvar kesitinde bir arada kullanılmakta, yapım süreci birçok adımdan oluşmakta, inşaat süresi uzamakta ve daha yüksek yapım maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Farklı malzemelerin bir arada kullanımı detay tasarımını daha karmaşık hale getirebilmektedir. Katmanlı duvar kesiti yaklaşımının neden olduğu bu dezavantajları ortadan kaldıracak bir monolitik duvar malzemesi geliştirmek, bu doktora tezinin temel anlamını ve önemini ortaya koymaktadır.

Doktora tezinin amacı, ülkemiz yerel hammadde kaynaklarından üretilen; iç/dış bölücü duvar elemanı tasarımında kullanılabilen; belirli bir dayanım, rijitlik ve stabiliteye sahip; hafif ve kolay taşınabilen; ülkemiz iklim koşulları altında dış duvar için gereken ısı geçirgenlik katsayısı gereksinimini sağlayabilen; koruma gereksinimini kendi bağlayıcısı kullanılarak sağlayabilen; geleneksel çok katmanlı duvara nazaran daha az sayı ve çeşitte malzeme kullanılarak daha hızlı uygulama sürecine olanak sağlayan bir doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi geliştirilmesidir. Söz konusu monolitik duvar malzemesi kendi içerisinde üç katmanlı olarak tasarlanmaktadır. Ortada yer alan gözenekli çekirdek katmanının işlevi malzeme gövdesini oluşturmak ve ısıl performansı sağlamak, çekirdeğe nazaran daha ince tasarlanan iç ve dış koruyucu katmanlarının işlevi ise nispeten boşluklu malzeme gövdesini fiziksel ve mekanik etkenlerden korumak ve gerekli strüktürel stabiliteyi sağlamaktır.

Deneysel yöntem üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, hedeflenen hafif jeopolimer duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanını tasarlamak amacıyla bağlayıcı cinsi, karışım oranı ve kür koşulları saptanmaktadır. Bu aşamada, monolitik bölücü duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanının fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde ideal alkali aktivatör türü; sıcaklık kürü koşulları; alkali hidroksit konsantrasyonu ve aktivatör oranı; toplam aktivatör / puzolan oranının etkileri tespit edilmektedir. İkinci aşamada hedeflenen hafif jeopolimer duvar malzemesinin ısıl performansa sahip çekirdek katmanını tasarlamak amaçlanmaktadır. Yüksek ısıl performans sağlamak amacıyla, birinci aşamada ideal karışım oranları ve kür koşulları belirlenmiş olan bağlayıcının içerisinde kimyasal yöntemle köpük oluşturulmaktadır. Köpükleştirici ajan oranının çekirdek katmanının fiziksel, mekanik ve ısıl performansı

üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Çalışmanın son aşamasında, Datça puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıdan üretilen, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri belirlenen iç/dış koruyucu ve çekirdek katmanlarının, ülkemizin Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği (TS 825) ile belirlenmiş beş iklim bölgesi için dış duvar malzemesi olarak kullanım olanakları belirlenmektedir.

Karışımlar hazırlanırken ilk olarak puzolan ve dolgu maddeleri (dış ve iç koruyucu katmanlarda standart kum, çekirdek katmanında ince öğütülmüş silis kumu) kuru halde karıştırılmış ve bu karışıma 24 saat önceden hazırlanmış olan NaOH/KOH çözeltileri, sıvı sodyum silikat çözeltisi ve su eklenmiştir. Kalıplanan karışım, bünyesinde sahip olduğu nemi kaybetmemesi için PE kaplanarak 20±2 °C ve % 95±5 bağıl nemde 24 saat ön kürlemeye tabi tutulmuştur. Ön kürlemenin ardından, kalıplar sökülerek numuneler 90 °C sıcaklıkta ve PE kaplı halde 24 saat etüvde kürlenmiştir.

Fiziksel özeliklerin belirlenmesi için özgül kütle, birim hacim ağırlık, kapiler su emme, atmosfer basıncı altında su emme, kompasite ve porozite, buhar geçirgenlik direnci, ultrases hızı ve elastiklik modülü; mekanik özeliklerin belirlenmesi için eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımı; ısıl performansın belirlenmesi için ısı iletkenlik katsayısı ve makro boyutlu boşluk yapısının belirlenmesi için optik analizler yapılmıştır.

Çalışma sonunda, Datça Puzolanı alkali kimyasallar ile aktive edildiğinde, jeopolimer bağlayıcı üretimine elverişli olduğu ve söz konusu puzolanın jeopolimer öncüsü olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir. En yüksek mekanik özeliklere sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcı, 12.5 M potasyum hidroksit ve sodyum silikat alkali aktivatörlerinin kombinasyonuyla üretilebilmektedir. 12.5 M KOH çözeltisinin 2.5 aktivatör oranı ($Na_2SiO_3$/KOH) ile birlikte kullanılması, polikondansasyon reaksiyonlarının gelişimi için gerekli olan öncü maddenin daha fazla çözünmesine, daha az gözenekli ve daha az geçirgen bir matris oluşumuna ve en yüksek mekanik özeliklere sahip malzeme üretimine imkan vermektedir.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın ideal toplam alkali aktivatör/puzolan oranı kütlece 0.3'tür. Alkali aktivatör miktarı daha fazla artırıldığında, fazla miktardaki alkali kimyasal suyun buharlaşmasını ve buna bağlı olarak harcın içyapı gelişimini engellediğinden fiziksel ve mekanik özelikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca konu ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, malzemeden beklenen performans kriterlerinden ödün verilmeksizin, alkali aktivatörlerin minimum miktarda kullanımına yönelmek gerekmektedir.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın ideal kür koşulu 90 °C sıcaklıkta ve PE kaplanarak 24 saat etüv kürüdür. PE kaplı halde kürleme daha yüksek mukavemet sonuçları sağlarken, PE kaplanmaksızın kürleme kuruma rötresinden dolayı numunelerin yüzeyinde gözle görülür çatlaklara neden olmaktadır. Bu nedenle kürleme sırasındaki nem koşulları sağlanmalıdır.

Karışım oranları ve kür koşullarının optimize edilmesiyle 2.0 g/ $cm^3$ yoğunluk, % 5.48 su emme oranı ve 10.57 MPa basınç dayanımına sahip jeopolimer bağlayıcı üretilmesi mümkündür. Malzemenin su emme oranı (% 5.48) ve doyma derecesinin (0.64) cephede kullanılan malzeme özelikleriyle ilgili gereksinimleri karşılamasından dolayı, sertleşmiş harcın iç ve dış koruyucu katman olarak kullanılabilmesi mümkün olabilmektedir.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının alüminyum tozu ile köpürtülmesiyle yüksek poroziteye ve iyi ısıl performansa sahip bir jeopolimer köpük üretilebilmesi

umut vaat etmektedir. Söz konusu jeopolimer köpüğün taze haldeki hacimsel stabilitesini koruması ve çökmenin engellenebilmesi için karışıma ince öğütülmüş silis kumu eklemek önemlidir. Köpükten beklenen fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri sağlayan ideal Al tozu/puzolan oranı ağırlıkça % 0.5 olarak tespit edilmiştir. Söz konusu orana sahip numuneler, daha küçük gözenek çapına, daha düzenli gözenek boyutu dağılımına, gözeneklerin birbirleriyle daha az bağlantısına ve daha homojen bir içyapıya sahiptir.

İdeal karışım oranları tespit edilmiş olan Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün ısı iletkenlik katsayısı (0.088 W/mK), yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan hafif duvar malzemesi alternatifleri olan düşey delikli hafif tuğla, pomza betonu, gazbeton ve köpük beton gibi bölücü duvar malzemelerinin ısı iletkenlik katsayılarına nazaran daha düşük olması, geliştirilmiş olan malzemenin herhangi bir ısı yalıtım malzemesine gerek duyulmadan kullanılma potansiyelinin olabileceğini göstermektedir.

İç ve dış koruyucu katman ve çekirdek katmanı olmak üzere üç tabakalı monolitik duvar malzemesinin Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesinde kullanılma olanakları değerlendirildiğinde, birinci derece iklim bölgesinde gereken $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşmaya sebep olmayan optimum katmanlaşma, 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 10 cm'lik çekirdek katmanı olarak tespit edilmiştir. İkinci derece iklim koşulları altında, optimum katmanlaşma 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 12.5 cm'lik çekirdek katmanı ile elde edilmiştir. Üçüncü derece iklim bölgesinde, $U_{duvar}$ gereksinimi 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 15 cm'lik çekirdek katmanı kullanılarak elde edilebilmiştir. Dördüncü ve beşinci derece iklim bölgelerinde, 2 cm iç, 2 cm dış koruyucu ve 20 cm çekirdek katmanı ile kriterler sağlanabilmiştir.

Ülkemiz iklim koşullarının sıcak/ılıman iklimden soğuk ve karasal iklime doğru ilerlemesiyle, $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşma oluşumuna neden olmayan ideal duvar kalınlığı kademeli olarak artmaktadır. Bundan dolayı, her bir iklim bölgesi için uygun duvar katmanlaşması tasarlanırken aynı türde duvar kesiti tasarımı yerine, sistem bir bütün olarak ele alınmalı, duvarlardaki ısıl performansın yanısıra yoğuşma ve bunların kullanıcı sağlığı üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmeli ve ideal malzeme katmanlaşmasına karar verilmelidir.

Üretilen monolitik duvar malzemesinin kesiti, geleneksel çok katmanlı dış duvar kesitleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, monolitik malzemenin $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yoğuşma oluşmayan toplam kalınlığı, düşey delikli pişmiş toprak tuğla ve gazbeton gövdeli çok katmanlı ve dıştan yalıtımlı duvarların toplam kalınlığının yaklaşık yarısı olması bakımından önemlidir. Yani, monolitik duvar malzemesinin yapılarda kullanılabilmesiyle, toplam duvar kalınlığı yarı yarıya azalması ve yapının kullanılabilir alanında artış olması beklenmektedir. Gerek duvar kalınlığındaki azalma gerekse malzeme çeşidinin ve sayısının azalması, yapıdaki duvar ağırlığının azalmasını beraberinde getirebilmektedir.

Türkiye'nin yerel hammadde kaynağı olan doğal Datça Puzolanı'nın alkali aktivasyonuyla üretilen, ideal karışım oranları, kür koşulları, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri tespit edilmiş, ülkemizdeki farklı iklim koşulları altında dış duvar kesitinden beklenen ısıl performansı herhangi bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmadan sağlayabilen, koruma gereksinimini herhangi ek bir kaplamaya gerek duyulmaksızın sağlayabilen, kendi içinde katmanlı ancak makro ölçekte homojen davranan bir jeopolimerin üretilebileceği tespit edilmiştir.

# NATURAL POZZOLAN BASED LIGHTWEIGHT GEOPOLYMER WALL MATERIAL

## SUMMARY

Lightweight partition wall materials such as vertically perforated fired clay bricks, aerated autoclaved concrete and pumice concrete blocks with maximum density of 1 g/cm$^3$ and compressive strength of 2.5-7.5 MPa are insufficient to fulfill the minimum requirements of TS 825 (Thermal insulation requirements for buildings) Standard as in the "thin section form" by itself. On the other hand, if these materials, which have a porous structure, are applied without any protective layer, they may deteriorate quickly due to the effect of external climatic conditions, and adequate physical and mechanical performance cannot be expected. Therefore, in the design of the building envelope, the layered wall section approach, in which the functions of self-supporting, providing thermal insulation and protecting are met by different materials, is commonly used. In this approach, many different materials are used together in the same wall section, the construction process consists of many steps, the construction period is prolonged and higher construction costs arise. The use of various materials together can make the detail design more complex. Designing a monolithic wall material that will eliminate these disadvantages caused by the layered wall section approach reveals the basic meaning and importance of this doctoral thesis.

The aim of the doctoral thesis is to investigate the possibilities of producing a natural pozzolan-based lightweight geopolymer wall material that utilizes local raw material resources of our country; can be used in interior/exterior partition wall element design; have certain strength, rigidity and stability; lightweight and easy to carry; can provide the required thermal transmission coefficient (U-value) for the exterior walls built under the climatic conditions of our country; able to meet the protection requirement of the building by using its own binder; allows a faster application process by using less number and variety of materials compared to the traditional multi-layered wall.

The monolithic wall material is designed as three layers in itself. The function of the porous core layer in the middle is to form the material body and to provide thermal performance, while the function of the inner and outer protective layers, which are designed thinner than the core, is to protect the material body from physical and mechanical factors and to provide the structural stability.

The experimental method consists of three stages. In the first stage, binder type, mixing ratio, and curing conditions are determined in order to design the inner and outer protective layers of the targeted lightweight geopolymer wall material. At this stage, the effects of the ideal alkaline activator type, temperature curing conditions; alkali hydroxide concentration and activator ratio; total activator/pozzolan ratio on the physical and mechanical properties of the protective layers of the monolithic wall material are investigated.

In the second stage, it is aimed to design the core layer of the targeted lightweight geopolymer wall material with thermal performance. To provide high thermal

performance, foam is produced by using chemical foaming method in the geopolymer binder whose optimum mixture ratios and curing conditions were determined in the first stage. The effects of the foaming agent (aluminum powder) ratio on the physical, mechanical and thermal performance of the core layer are investigated.

In the last stage of the study, the possibilities of using the monolithic wall material, produced from Datça pozzolana-based geopolymer binder, as an external wall material in the five climate regions of our country determined by the Regulation on the Thermal Insulation Rules in Buildings (TS 825) are tried to be determined.

While preparing the mixtures, firstly, the pozzolan and fillers (standard sand in the protective layers, finely ground silica sand in the core layer) were mixed in a dry state and NaOH/KOH solutions, which were prepared 24 hours beforehand, and liquid sodium silicate solution, and water were added to this mixture. The molded mixture was covered with PE so that it did not lose its moisture and was pre-cured at 20±2 °C and 95±5 % relative humidity for 24 hours. After pre-curing, the molds were removed, and the PE covered samples were cured in an oven at 90 °C for 24 hours.

Specific weight, unit weight, capillary water absorption, water absorption under atmospheric pressure, compactness and porosity, vapor permeability resistance and ultrasound velocity tests were carried out to determine the physical properties; flexural and compressive strength tests were done to determine the mechanical properties; determination of the thermal conductivity coefficient were done to specify the thermal performance and optical analysis were carried out to determine the macro-scale pore structure.

At the end of the study, it was determined that when Datça pozzolan is activated with alkaline chemicals, it becomes suitable to produce geopolymer binders indicating Datça pozzolan can be used as a geopolymer precursor.

Earth of Datça-based geopolymer binder with the highest mechanical properties can be produced with a combination of 12.5 M potassium hydroxide and sodium silicate alkali activators.

Using of 12.5 M KOH solution together with activator ratio of 2.5 leads to the greatest amount of dissolution of the precursor, which is important for the following polycondensation, and less porous and permeable matrix formation together with the highest mechanical properties.

The optimum total alkali activator/pozzolan ratio of Datça pozzolan-based geopolymer mortar is 0.3, by mass. When the amount of alkaline activator is increased more, it affects the physical and mechanical properties negatively, since the excess amount of alkaline chemicals prevents the evaporation of water and accordingly the internal structure development of the mortar. In addition, when the subject matter is evaluated from an economic point of view, it becomes apparent that it is necessary to use the minimum amount of alkaline activators without compromising the performance criteria expected from the material.

The optimum curing condition of Datça pozzolan-based geopolymer mortar is oven curing at 90 °C with PE covering for 24 hours. Curing with PE covering provides higher strength results, while curing without PE covering causes visible cracks on the surface of the samples due to drying shrinkage. Therefore, moisture conditions during curing must be maintained.

By optimizing the mixing ratios and curing conditions, it is possible to produce a geopolymer binder with a density of 2.0 g/cm$^3$, a water absorption ratio of 5.48 % and a compressive strength of 10.57 MPa. Since the water absorption ratio (5.48 %) and the saturation degree (0.64) of the material meet the requirements of the materials used in the facade, it is possible to use the hardened geopolymer mortar as an inner and outer protective layer.

It is promising to produce a geopolymer foam with high porosity and good thermal performance by foaming the Datça pozzolan-based geopolymer binder with aluminum powder. It is important to add finely ground silica sand to the mixture in order to maintain the volumetric stability of the fresh geopolymer foam and to prevent collapsing of the foam.

The optimum Al powder/pozzolan ratio, which provides the physical, mechanical and thermal properties expected from the foam, was determined as 0.5 %, by weight. Samples with this ratio have smaller pore diameter, more regular pore size distribution, less connection of pores with each other, and a more homogeneous internal structure.

The optimum thermal conductivity coefficient (0.088 W/mK) of the Datça pozzolan-based geopolymer foam is lower than the thermal conductivity coefficients of commonly used partition wall material alternatives, such as vertically perforated lightweight brick, pumice concrete, aerated autoclaved concrete, and foam concrete, which shows that it has the potential to be used without the need for any thermal insulation material.

When the possibilities of use of the three-layered monolithic wall material in five different climate regions of Turkey are evaluated, the optimum lamination that provides the required U-value in the 1$^{st}$ climatic region and that does not cause condensation problem in any month of the year, was determined to be a core layer of 10 cm and two protective layers of 2 cm. Under 2$^{nd}$ climatic conditions, the optimum lamination was achieved with inner and outer protective layers of 2 cm and a core layer of 12.5 cm. In the 3$^{rd}$ climatic conditions, the U-value requirement could be achieved by using 2 inner and outer protective layers of 2 cm and a core layer of 15 cm. In the 4$^{th}$ and 5$^{th}$ climatic regions, the criteria were met with 2 cm inner, 2 cm outer protective and 20 cm core layers.

As the climatic conditions of our country move from hot climate to cold climate, the ideal wall thickness, which meets the U-value requirement and does not cause condensation in any month of the year, is gradually increasing. Therefore, when designing a wall section for each climate region, instead of the adaptation of the same type of wall section design, the wall system should be considered as a whole; appropriate rules of building physics during heat/condensation transmission, and their influence on user health should be evaluated altogether. When the cross-section of the produced monolithic wall material is evaluated in comparison with the conventional multi-layered exterior wall sections, the total thickness of the monolithic material, which provides required level of U-value without any condensation problem, is approximately half the total thickness of the multi-layered and externally insulated vertically perforated brick-based and aerated autoclaved concrete block-based walls. That is, with the use of monolithic wall material in buildings, it is expected that the total wall thickness will be reduced by half, and the usable area of the building will increase. Both the decrease in wall thickness and the decrease in the type and number of materials can bring about a decrease in the weight of the wall in the building.

It has been determined that, by alkaline activation of natural Datça pozzolan, as the local raw material source of Turkey, a geopolymer could be produced whose ideal mixing ratios, curing conditions, physical, mechanical, and thermal properties have been determined. This developed geopolymer material provided the adequate thermal performance expected from the exterior wall under different climatic conditions in our country without using additional thermal insulation material. This new material which is layered within itself behaves homogeneously at the macro scale.

# 1. GİRİŞ

Dünya genelinde enerji kaynaklarının hızla tüketilmesinden dolayı son yıllarda ülkeler enerji gereksinmelerini kontrol altına alma ve enerjiyi etkin kullanma arayışı içine girmişlerdir (Şenkal, 2005). Günümüz yapı sektörü, dünyadaki birincil enerjinin ve global elektriğin % 50'sini tüketmekte ve bunun bir sonucu olarak, yeryüzündeki $CO_2$ emisyonunun 1/3'ünü üretmektedir (Xamán ve diğ., 2017). Gezegenimizin karşılaştığı en önemli çevresel sorunlardan biri olan iklim değişikliği $CO_2$ emisyonundan kaynaklanmaktadır. 18. yüzyılda atmosferik $CO_2$ oranı milyonda 280 ppm iken günümüzde 450 ppm'dir. İlerleme bu hızla devam ederse 2130 yılında $CO_2$ oranının 731 ppm olacağı öngörülmektedir (Pacheco-Torgal, 2015). Bu bağlamda, yapı sektörünün çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltmak için, binalar enerji ve kaynak etkin malzeme (Li ve diğ., 2017) ve yöntemlerle inşa edilmelidir.

Avrupa Komisyonu tarafından 2011 yılında tasarlanan Horizon 2020 programı akıllı, sürdürülebilir ve kapsayıcı büyümeyi teşvik etmek üzere "Europe 2020" stratejisinin bir parçası olarak geliştirilmiştir. Horizon 2020 programının kaynak etkinliği ve iklim davranışı konularını içeren sürdürülebilirlik kaygısının, gelecekte Avrupa yapı endüstrisi üzerinde güçlü bir etkiye sahip olması beklenmektedir. Kaynak etkinliğinin yapı sektörü üzerindeki etkisi, AB Kaynak Etkinliği Yol Haritası'nda "Binaların ve altyapının yenileme ve inşası, yüksek kaynak etkinliği seviyelerinde yapılacaktır. Yaşam döngüsü yaklaşımı yaygın biçimde uygulanacak, bütün yeni binalar neredeyse sıfır enerjili olacak ve mevcut bina stoğunun yenilenmesi için kaynak etkinliği yüksek malzeme ve ilkeler yerini alacaktır. Zararlı olmayan yapım ve yıkım atıklarının % 70'i geri dönüştürülecektir" sözleriyle açıkça ifade edilmiştir (COM 571, 2011). Ayrıca AB Enerji Yol Haritası 2050, yeni ve mevcut binalarda daha fazla enerji verimliliği sağlanmasının, enerji korunumu açısından önemli olduğunu belirtmektedir (COM 885, 2011).

Türkiye'nin birincil enerji kaynaklarının yaklaşık % 70'i yurtdışından karşılandığından dolayı ülkemiz, enerjide dışa bağımlıdır. Kendi ürettiğimiz enerjinin, % 32'si doğal gazdan, % 32'si kömürden, % 26'sı hidrolik enerjiden, % 6'sı rüzgârdan,

% 2'si jeotermal enerjiden, % 0.3'ü güneş enerjisinden ve % 1.7'si diğer kaynaklardan elde edilmektedir (Karagöl ve Kavaz, 2017). Enerjiyi büyük ölçüde yurtdışından satın alan ve kendi ürettiği enerjinin küçük bir bölümünü yenilenebilir kaynaklardan üreten ülkemizde, enerjinin verimli kullanılması oldukça önemli bir konudur. Türkiye'deki bina sektörü, ulusal nihai enerji tüketiminin yaklaşık % 35'inden sorumludur (Eurostat, 2016). Yeni yapılaşma faaliyetleri nedeniyle bu oranın gelecekte daha fazla artması beklenmektedir. Bu bakımdan, ülkemizde yürürlükte olan Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği (EPBD)'nin temel amacı, mevcut ve yeni yapılarda enerjinin ve enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanılmasına, enerji israfının önlenmesine ve çevrenin korunmasına yönelmektir (EPBD, 2008).

Yapı kabuğundaki enerji kayıplarının yaklaşık % 60–70'i duvarlardan kaynaklandığından (Diao, 2018), yapılarda tüketilen enerji miktarını azaltmak için duvarların ısıl performansını arttırmak anahtar rol oynamaktadır. Duvarların ısıl performansı, genellikle 0.030-0.090 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip (TS 825, 2013) ısı yalıtımı malzemeleri kullanılarak geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ancak, organik esaslı ısı yalıtım malzemelerinin yanıcılık ve inorganik esaslı ısı yalıtım malzemelerinin ise kompleks üretim koşulları ve yüksek sinterleşme sıcaklığı nedeniyle yüksek bir malzeme enerjisi, malzeme karbonu (embodied energy, embodied carbon) ve yüksek maliyetli olmak gibi dezavantajları bulunmaktadır (Feng ve diğ., 2015).

Ülkemizde ısıtma enerjisi gereksiniminin saptanarak izin verilen sınır değerlerle kıyaslanmasına yönelik hesaplama kurallarını tanımlayan TS 825 standardı, yeni ve değiştirilecek mevcut binaların duvar, çatı, pencere ve zeminlerine yönelik en yüksek ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) gereksinimlerini iklim bölgelerine göre belirtmektedir (TS 825, 2013). İskelet sistemli yapılarda yoğunluğu en fazla 1 gr/cm$^3$ ve basınç dayanımı 2.5-7.5 MPa olan yatay ve düşey delikli pişmiş toprak tuğla, gazbeton blok ve bimsblok gibi bölücü duvar malzemeleri, standartta belirtilen $U_{duvar}$ değerlerini "ince kesitli halde" tek başına sağlayamamaktadır. Diğer yandan, gözenekli bir yapıya sahip olan bu malzemelerin, dış iklim koşullarına karşı herhangi bir koruyucu katman olmaksızın kullanılması halinde fiziksel ve mekanik performansının yüksek olması beklenemez. Bundan dolayı, yapı kabuğu tasarımında, yükler altında herhangi bir deformasyon olmaksızın kendini taşıma, ısı yalıtımı sağlama ve kaplama işlevlerinin farklı malzemeler tarafından karşılandığı katmanlı

duvar kesiti yaklaşımı günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, çok sayıda farklı malzeme aynı duvar kesitinde bir arada kullanılmakta, yapım süreci birçok adımdan oluşmakta, inşaat süresi uzamakta ve daha yüksek yapım maliyetleri ortaya çıkmaktadır. Farklı malzemelerin bir arada kullanımı detay tasarımını daha karmaşık hale getirebilmektedir. Katmanlı duvar kesiti yaklaşımının neden olduğu bu dezavantajları ortadan kaldıracak bir monolitik duvar malzemesi geliştirmek, bu doktora tezinin temel anlamını ve önemini ortaya koymaktadır.

Monolitik kelimesi "yekpare" ve "yalnızca bir malzemeden oluşan" anlamına gelmektedir. Monolitik bir dış duvar, bağlantı malzeme/elemanları dışında yalnızca bir malzemeden oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, monolitik duvar malzemesi herhangi ek bir ısı yalıtım malzemesi kullanımına gerek duyulmadan yüksek ısı yalıtımı sağlayan yekpare bir malzemedir (Kranzler, 2014). Bu yaklaşım, sürdürülebilir ve geleceği göz önünde bulunduran bir yapım yöntemidir (Wienerberger, 2018).

### 1.1 Tezin Konusu ve Amacı

Doktora tezinin konusu, binaların duvar elemanı için doğal puzolan esaslı hafif bir jeopolimer duvar malzemesi geliştirmektir.

Doktora tezinin amacı, ülkemiz yerel hammadde kaynaklarından üretilen; iç/dış bölücü duvar elemanı tasarımında kullanılabilen; belirli bir dayanım, rijitlik ve stabiliteye sahip; hafif ve kolay taşınabilen; ülkemiz iklim koşulları altında dış duvar için gereken ısı geçirgenlik katsayısı (U-değeri) gereksinimini sağlayabilen; koruma gereksinimini kendi bağlayıcısı (koruyucu katman) kullanılarak sağlayabilen; geleneksel çok katmanlı duvara nazaran daha az sayı ve çeşitte malzeme kullanılarak daha hızlı uygulama sürecine olanak sağlayan bir doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi geliştirilmesidir.

### 1.2 Kapsam

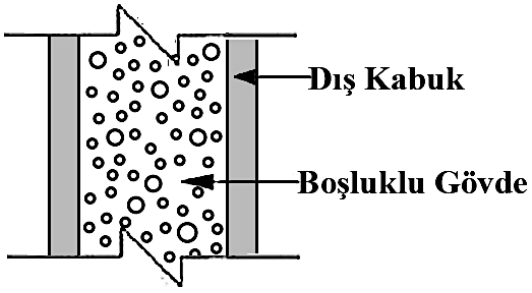
Doktora tezinin kapsamında, mekanik ve fiziksel etkiler altında sahip olduğu özelikleri ve stabilitesini sürdüren, doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer monolitik duvar malzemesi geliştirilmektedir. Çalışmadaki en önemli husus, monolitik malzemenin bir yandan mekanik yükler altında stabilitesini sürdürecek dayanıma sahip olması iken, diğer yandan da ısıl performansının geliştirilmesidir. Böylece, aynı hammadde ile

üretilmiş malzemenin farklı performans kriterlerine yanıt verebilmesi sağlanmış olabilmektedir. Malzemenin ısıl performansının iyileştirilmesinde ısının:

- Malzemenin boşluklu yapılarak iletimle engellenmesi,
- Malzeme içinde bulunan boşluklarda hareketsiz hava yaratarak taşınımla engellenmesi hedeflenmektedir.

Söz konusu monolitik duvar malzemesi kendi içerisinde üç katmanlı olarak tasarlanmaktadır (Şekil 1.1). Ortada yer alan gözenekli çekirdek katmanının işlevi malzeme gövdesini oluşturmak ve ısıl performansı sağlamak, çekirdeğe nazaran daha ince tasarlanan iç ve dış koruyucu katmanlarının işlevi ise nispeten boşluklu malzeme gövdesini fiziksel ve mekanik etkenlerden korumak ve gerekli strüktürel stabiliteyi sağlamaktır.

Monolitik malzemenin duvar inşasında kullanılırken yanyana ve üstüste yerleştirilmesi sırasında derz olarak ve ayrıca yüzey kaplamasında sıva olarak kullanılabilmesi düşünülmektedir. Böylece, inşa edilen duvarda farklı bir çeşitte malzeme kullanımına gerek kalmadan beklenen performans kriterleri sağlanmış olabilmekte, fiziksel, mekanik ve ısıl etkilere bütün duvar kesitinde aynı yanıt verilebilmekte, blok malzemeler arasındaki derzler görünmemekte ve görsel olarak estetik bir yüzey elde edilebilmektedir. Ancak, üretilen monolitik malzemenin duvar elemanı oluşturacak biçimde inşa edilmesi çalışmaları bu doktora tezinin kapsamında yer almamaktadır.




**Şekil 1.1 :** Tasarlanan monolitik duvar malzemesinin kesiti.

### 1.3 Yaygın Etki

Doktora tezinin amacına yönelik olarak gerçekleştirilmesi planlanan deneysel çalışmaların başarılı olarak neticelenmesiyle, ülkemiz yerel hammadde kaynakları kullanılarak üretilen duvar malzemesinin yapı sektörümüze kazandırılabileceği düşünülmektedir. Doğal puzolan olan Datça Puzolanı ve alkali kimyasallar ile

geliştirilen malzemenin, ülkemiz genelinde puzolanik özeliğe sahip diğer topraklarla da geliştirilebilmesi olanaklıdır. Söz konusu hammadde kaynaklarının bulunduğu bölgelerde, amaçlanan malzemenin üretim tesisleri kurmak mümkün olabilir. Böylece bölgesel istihdamın sağlanmasına, her bölgenin kendi hammadde kaynağını kullanarak yerel ve ekonomik yapı malzemelerini üretip kullanmasına ve ülke genelinde yapı malzemelerinin taşınmasından dolayı tüketilen enerji miktarının ve karbondioksit salımının azaltılmasına katkı sağlanabileceği aşikardır.

Amaçlanan monolitik duvar malzemesinin iyi bir ısıl performansa sahip olacak şekilde geliştirilmesiyle, herhangi ek bir ısı yalıtım malzemesi kullanımına gerek kalmaması planlanmaktadır. Böylece, ısı yalıtım malzemelerinin üretim ve kullanımından kaynaklanan enerji kayıplarının minimize edilmesi beklenmektedir. Ayrıca, söz konusu malzemenin ülkemiz iklim koşullarının gereksinimlerine uygun olarak tasarlanması ve kullanılmasıyla, ülkemizdeki binalar tarafından tüketilen toplam enerjinin % 65'lik payını oluşturan ısıtma ve soğutma enerjisi miktarının (Bayraktar ve Bayraktar, 2016) azaltılması beklenmektedir. Böylece, ülkemizin halihazırda yurtdışından temin ettiği enerjiye olan bağımlılığın azalmasına katkı sağlanabilecek ve binalardan kaynaklanan çevre etkisinin azaltılması konusunda olumlu bir adım atılabilecektir.

### 1.4 Yöntem

Deneysel yöntem üç aşamadan oluşmaktadır:

- Birinci aşama, hedeflenen doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanını tasarlamak amacıyla bağlayıcı cinsi, karışım oranı ve kür koşullarının saptanmasından oluşmaktadır. Bağlayıcı malzeme olarak, bir önceki çalışmada kireç ile birlikte ve düşük sıcaklık ve basınçlı buhar kürüyle sertleştirildikten sonra yeterli fiziksel ve mekanik özeliklere sahip blok üretilmesi olanağı sağlayan Datça doğal toprağı değerlendirilmektedir (Barış ve Tanaçan, 2017). Datça Puzolanı'nın alüminosilikat kaynağı olarak kullanılması ve "jeopolimer bağlayıcı" oluşturacak şekilde alkali kimyasallarla aktive edilmesi koşullarını araştırmak hedeflenmektedir. Birinci aşamadaki deneysel çalışma kendi içerisinde dört alt aşamadan oluşmaktadır ve bu aşamalarda monolitik bölücü duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanının fiziksel ve mekanik özelikleri

üzerinde ideal alkali aktivatör türü; sıcaklık kürü koşulları; alkali hidroksit konsantrasyonu ve aktivatör oranı; toplam aktivatör / puzolan oranının etkileri tespit edilmektedir.

- İkinci aşamada hedeflenen doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesinin ısıl performansa sahip çekirdek katmanını tasarlamak amaçlanmaktadır. Yüksek ısıl performans sağlamak amacıyla, birinci aşamada ideal karışım oranları ve kür koşulları belirlenmiş olan bağlayıcının içerisinde kimyasal yöntemle köpük oluşturulmaktadır. Köpükleştirici ajan olarak alüminyum (Al) tozu kullanılmakta ve köpürtülmemiş numune referans olarak kabul edilmektedir. Köpükleştirici ajan oranının çekirdek katmanının fiziksel, mekanik ve ısıl performansı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Bu aşamanın sonunda gövde malzemesinin üretim olanaklarının değerlendirilmesi tamamlanmış olmaktadır.
- Çalışmanın son aşamasında, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıdan üretilen, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri belirlenen iç/dış koruyucu ve çekirdek katmanlarının, ülkemizin Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği (TS 825, 2013) ile belirlenmiş beş iklim bölgesi için dış duvar malzemesi olarak kullanım olanakları belirlenmektedir. Her bir iklim bölgesi için çeşitli kalınlıklarda oluşturulan dış duvar kesitlerinin gereken ısıl direnci sağlayıp sağlayamadığı ve kesit içinde yoğuşma oluşup oluşmadığı İzoder TS 825 Hesap Programı (İzoder, 2021) ile denetlenerek, ortaya çıkan sonuçlar çizelgeler halinde verilmektedir. Sonuç olarak, üretilen monolitik duvar malzemesinin yapı sektöründeki yeri belirlenmeye çalışılmaktadır.

# 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

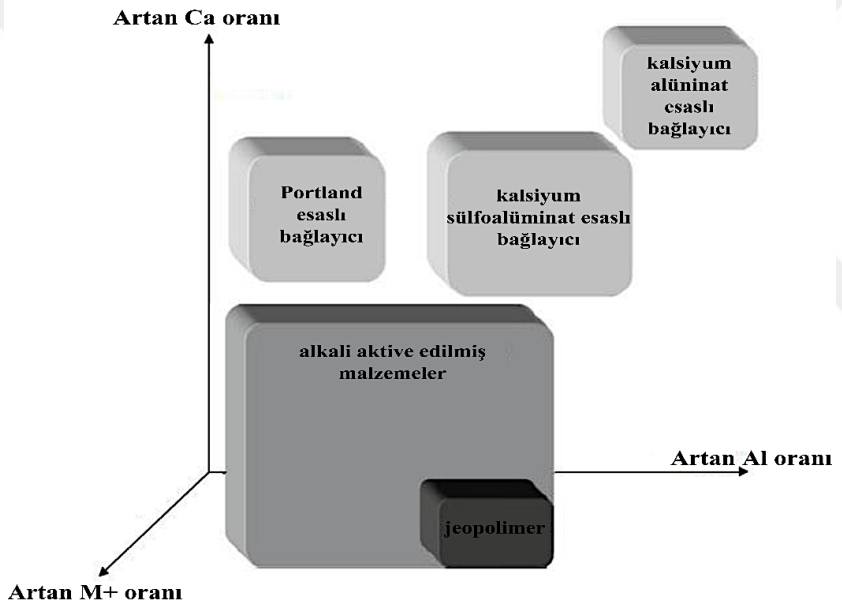
## 2.1 Jeopolimer

Portland çimentosunun çok büyük ölçekli üretimi, yıllık % 4 büyüme ile yılda yaklaşık 4 milyar ton, benzeri görülmemiş bir hammadde ihtiyacı, enerji tüketimi, sera gazı emisyonu ve toz kirliliği nedeniyle sürdürülemez hale gelmektedir (Farhan ve diğ., 2020). Yalnızca çimento üretimi, küresel $CO_2$ emisyonunun % 5'inden sorumludur ve bu oldukça yüksek bir orandır (IPCC, 2001). Kireçtaşı gibi geleneksel yenilenemeyen hammaddelerin önemli miktarda tüketimi, klinkerin 1400-1450 °C'de kalsinasyonu, öğütülmesi için enerji tüketimi ve yüksek sera gazı emisyonu (1 ton klinker üretimi için 0.9 ton $CO_2$ emisyonu) çimento-esaslı malzemelerin olumsuz etkileridir (Hendriks ve diğ., 1999). Bundan dolayı, sözü edilen olumsuz etkiler çimentoya alternatif daha düşük karbon ayak izine sahip bağlayıcılar geliştirmeyi ve kullanmayı gerekli kılmaktadır (Ganesan ve diğ., 2013).

Yakın geçmişte jeopolimer bağlayıcılar ile ilgili yapılan çalışmalar, söz konusu yeni bağlayıcının Portland çimentoya bir alternatif olabileceğini göstermektedir. Jeopolimer bağlayıcılar, amorf ya da camsı alüminosilikat kaynağının çeşitli alkali aktivatörler ile reaksiyonu sonucunda elde edilmektedir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a). Yani temelde iki bileşen vardır: alüminosilikat kaynağı ve alkali aktivatör (Singh ve Middendorf, 2020). Alüminosilikat kaynağı olarak çeşitli doğal malzemeler, tarımsal, endüstriyel ve kentsel atık malzemeler kullanılabilmektedir (Farhan ve diğ., 2020). Doğal, atık ya da yan ürün kaynaklardan üretilen bu bağlayıcılar, kalsiyum esaslı hammaddelerin daha az miktarda kullanılması nedeniyle çevresel etkiyi azaltmakla birlikte, çimentoya nazaran daha düşük üretim sıcaklığı ve daha az yakıt kullanımına neden olmalarından dolayı sürdürülebilir ilerleme konseptine yaklaşmaktadırlar (Bondar ve diğ., 2011a).

Literatürde "jeopolimer" terimine ilave olarak "alkali-aktive edilmiş bağlayıcı" terimiyle de karşılaşılacağından dolayı terimlere açıklık getirmekte fayda vardır. Alkali kimyasallarla aktive edilen malzemeler, kullanılan alüminosilikat kaynağının

kalsiyum içeriğine göre düşük ve yüksek kalsiyumlu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır ve her bir grubun reaksiyon mekanizması ve sonuç ürünleri birbirinden farklıdır. Kalsiyum bakımından zengin alüminosilikat kaynaklarının (örn. yüksek fırın cürufu veya C tipi uçucu kül) alkali aktivasyonu sonucunda üretilen bağlayıcı "alkali-aktive edilmiş bağlayıcı" olarak tanımlanmaktadır. Diğer yandan, kalsiyum oranı düşük malzemelerin (örn. metakaolin, F tipi uçucu kül, çeşitli doğal puzolanlar) alkaliler ile reaksiyonu sonucunda oluşan ürün "jeopolimer" olarak adlandırılmaktadır. Yüksek Al ve düşük Ca oranlarıyla jeopolimerler, alkali aktive edilmiş malzemelerin bir alt kümesi olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1) (RILEM TC 224-AAM, 2014). Aradaki fark, reaksiyon mekanizması Bölüm 2.1.2'de açıklandığında daha iyi anlaşılacaktır.




**Şekil 2.1 :** Alkali-aktive edilmiş malzemelerin sınıflandırılması ve Portland-esaslı ve kalsiyum sülfoalüminat-esaslı bağlayıcıların kimyasal yapılarıyla kıyaslanması. Koyu renkli bölgeler bağlayıcının Na ve/veya K oranındaki artış ile orantılıdır (RILEM TC 224-AAM, 2014).

Doktora tezinin bu bölümünde, jeopolimer bağlayıcıların tarihsel arka planı, reaksiyon mekanizması, jeopolimer özeliklerini etkileyen etkenler, jeopolimerin avantaj ve dezavantajları ve yapı sektöründeki kullanım alanları hakkında detaylı bilgi verilecektir.

### 2.1.1 Tarihsel arka plan

Çimentoya alternatif bir bağlayıcı geliştirmek amacıyla alkali kimyasalların kullanımına yönelik en erken çalışmalardan biri, 1930 yılında Kühl'ün gerçekleştirdiği

cürufun kuru potasyum hidratla sertleştirilmesine yönelik araştırmadır (Palomo ve diğ., 2014). 1940 yılında Purdon yüksek fırın cürufunu NaOH ile aktive edilmesiyle çimentosuz bağlayıcı sentezlenebildiğini belirtmiştir (Purdon, 1940).

Antik Roma ve Mısır yapılarında kullanılan bağlayıcıları araştıran ilk araştırmacı Glukhovsky'di. Glukhovsky, bu bağlayıcıların Portland çimentosundakine benzer alüminosilikat kalsiyum hidratlardan ve ayrıca doğal bir kaya olan analsitin kristal fazlarından oluştuğu sonucuna vardı. Bu araştırmalardan yola çıkarak, Glukhovsky 1957'de, kil ve alkali metal çözeltilerini kullanarak ürettiği ve "toprak-çimento" olarak adlandırdığı yeni bir bağlayıcı türü geliştirmiştir. Toprak kelimesi, malzemenin kaya gibi görünmesinden ve çimento kelimesi ise bağlayıcılık özelliğinden dolayı kullanılmıştır (Pacheco-Torgal ve diğ., 2008). Bu ilk girişimleri, yüksek fırın cürufu, kil, alüminosilikat kayalar ve küllerin alkali aktivasyonuyla bağlayıcı üretilmesine yönelik bir dizi yeni çalışma takip etmiştir (Palomo ve diğ., 2014).

Alkali aktivasyonu alanındaki araştırmalar, Fransız araştırmacı Davidovits'in 1978 yılında, metakaolinin alkali aktivasyonundan elde edilen bağlayıcıları geliştirmesi, patentini alması ve "jeopolimer" olarak adlandırmasıyla hız kazanmıştır (Davidovits, 1979). Davidovits, piramitlerin doğal taştan yapılmadığını, bunun yerine insan yapımı bağlayıcılardan inşa edildiğini öne sürmektedir. Kimyasal ve mineralojik çalışmalara dayanarak, piramit bloklarının kireçtaşı kumu, kalsiyum hidroksit, sodyum karbonat ve su karışımından üretildiğini belirtmektedir (Davidovits, 1987). 1979 yılında Davidovits, yangına dayanıklı bir polimer bağlayıcı üretebilmek için metakaolin, kireçtaşı ve dolomit karışımını alkaliler ile karıştırarak "Pyrament, Geopolycem, Geopolymite" isimleriyle tanımladığı malzemeyi üretmiştir. Jeopolimer, düşük kalsiyum oranına sahip alüminosilikat malzemelerin aktivasyonuyla oluşmaktadır ve kovalent bağlarla bağlanmış mineral molekül zinciridir. Davidovits'e göre, jeopolimerler polimerlerdir, çünkü polimerleşirler ve düşük sıcaklıkta sertleşirler. Ama onlar aynı zamanda inorganik, sert ve yüksek sıcaklıkta kararlı oldukları ve yanıcı olmadıkları için jeopolimerdirler (Davidovits, 1999).

1986'da Pavel Krivenko, alkali aktive edilmiş cüruf ile hazırlanmış betonların fiziksel ve mekanik özelikleriyle ilgili çalışmalarını yayınlamıştır (Krivenko, 1986). 1999 yılında Palomo, düşük oranda CaO içeren F türü uçucu külün alkali aktivasyonuyla sertleşmiş bağlayıcı malzemeler üretme olanaklarını araştırmıştır (Palomo ve diğ., 1999). 1994 ve 1999 yıllarında Ulusal Kiev Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve

Mimarlık Bölümü, alkali aktive edilmiş bağlayıcı ve betonlar üzerine uluslararası konferanslar düzenlemiştir (Krivenko, 1994b ve Krivenko, 1999).

1990'ların ortalarından itibaren Palomo'nun İspanya'daki grubu, Rahier'in Belçika'daki çalışmaları ve Melbourne Üniversitesi'ndeki grup, jeopolimer reaksiyon kinetiğinin ve mekanizmalarının ardındaki gizemi çözmeye başlamıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde Balaguru ve Kriven liderliğindeki gruplar, sırasıyla yangına dayanıklı kompozit ve refrakter alanlarda kullanılabilecek jeopolimer uygulamalarını araştırmaktadır. Yeni Zelanda'da MacKenzie, jeopolimerlerin sentezi ve analiz yöntemlerine odaklanmaktadır. Monash Üniversitesi'nden Sanjayan ve Curtin Üniversitesi'nden van Riessen, jeopolimer analizleri, jeopolimerin ısıl özelliği ve yangına karşı dayanıklılığıyla ilgili araştırmalara liderlik etmektedir. Jeopolimer araştırmaları günümüzde hem akademik hem de endüstriyel olarak geniş bir alana yayılmaktadır ve ticarileştirme ivme kazandıkça uygulamaya yönelik araştırmalara daha fazla vurgu yapılmaktadır (Vickers ve diğ., 2015a).

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların geliştirilmesiyle ilgili olarak ilk Teknik Komite RILEM tarafından kurulmuştur. RILEM Teknik Komitesi, çalışmalarını 2012 yılında tamamlamış ve detaylı bir rapor halinde 2014 yılında yayınlamıştır (RILEM TC 224-AAM, 2014).

### 2.1.2 Reaksiyon mekanizması

Alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, amorf alümin ($Al_2O_3$) ve silisçe ($SiO_2$) zengin katı alüminosilikat kaynağının yüksek konsantrasyonlu sıvı alkali hidroksit ya da alkali silikat çözeltileri ile reaksiyonu sonucunda üretilmektedir. Alkali çözelti, reaksiyon ortamının pH değerini yükselterek katı hammaddenin çözünmesini sağlamaktadır (Firdous ve diğ., 2018).

Alkali bağlayıcıların reaksiyon mekanizması ekzotermik bir süreçtir ve ardarda sıralanmış çözünme-topaklaşma-yoğunlaşma reaksiyonlarından oluşmaktadır. İlk aşama, yüksek pH derecesine sahip alkali çözeltinin, alüminosilikat kaynağındaki kovalent bağlı Si–O–Si ve Al–O–Si gruplarını çözmesiyle başlamaktadır ve çözünen bu gruplar kolloid bir faza dönüşmektedir. Daha sonra, çözünmüş ürünler birbirleriyle etkileşime geçerek topaklaşmış bir yapı oluşturmakta ve 3. aşamada yoğunlaşıp katılaşmış bir strüktür meydana gelmektedir. Ancak bu üç aşamalı reaksiyon hemen

hemen eş zamanlı olarak gelişmektedir ve bu durum, her bir aşamanın ayrı ayrı analiz edilmesini engellemektedir (Pacheco-Torgal ve diğ., 2008).

Garcia-Lodeiro'a göre, ana bileşenin kimyasal bileşimine göre alkali bağlayıcılar yüksek kalsiyumlu ve düşük kalsiyumlu olmak üzere gruplandırılmaktadır ve her bir grubun aktivasyon yapısı farklıdır (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a).

### 2.1.2.1 Yüksek kalsiyum içeren maddelerin reaksiyon mekanizması

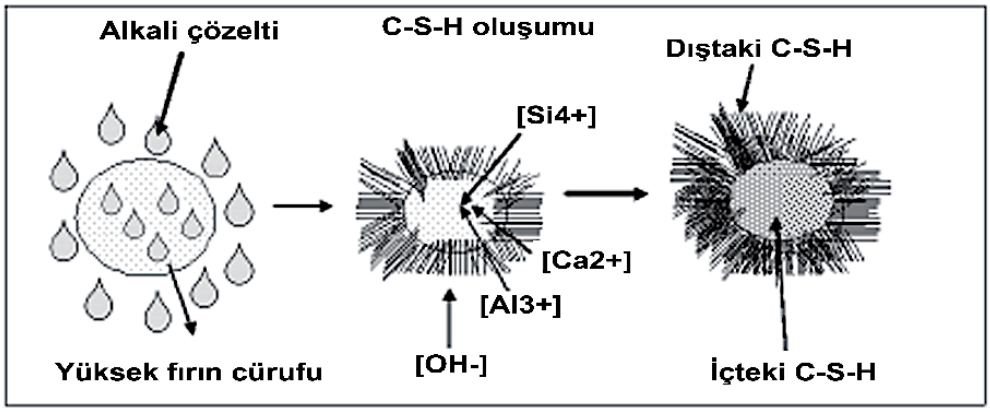
Yüksek kalsiyum içeren (örn. yüksek fırın cürufu= % 35-40 CaO) malzemelerin alkali aktivasyonu, nispeten ılımlı alkali ortamlarda gerçekleştirilmekte olup reaksiyon mekanizması aşağıdaki denklemlerle (2.1; 2.3) özetlenmektedir:

$$=Si\text{-}O^{-} + R^{+} ===Si\text{-}O\text{-}R \quad (2.1)$$

$$=Si\text{-}O\text{-}R + OH^{-} ===Si\text{-}O\text{-}R\text{-}OH^{-} \quad (2.2)$$

$$=Si\text{-}O\text{-}R\text{-}OH^{-} + Ca^{+2} === Si\text{-}O\text{-}Ca\text{-}OH + R^{+} \quad (2.3)$$

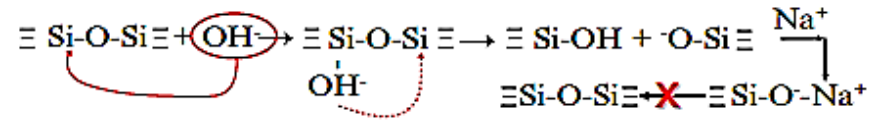
Alkali katyon ($R^{+}$) hidratasyonun ilk aşamasında bir katalizör gibi rol alır ve $Ca^{2+}$ iyonlarıyla katyonik değişim olur. Reaksiyon ürünü C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jel olup portland çimentonun hidratasyon ürününe benzerdir (Şekil 2.2) ve yapısına az miktarda Al alarak C-A-S-H jeli olarak da bulunabilir. Malzeme kompozisyonuna, aktivatör türü ve yoğunluğuna ve kür koşullarına bağlı olarak hidrotalkit ($Mg_6Al_2CO_3(OH)_{16}\cdot 4HO$), $C_4AH_{13}$, $CASH_8$, $C_4AcH_{11}$, $C_8Ac_2H_{24}$ gibi çeşitli ikincil ürünler ortaya çıkabilir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a).



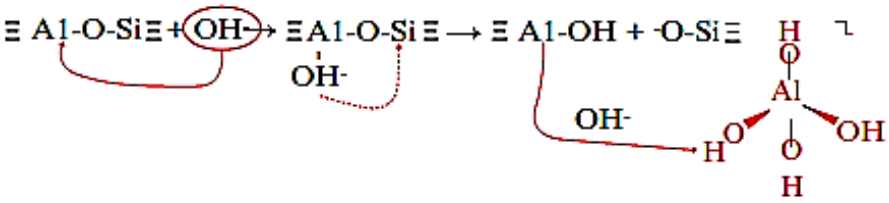

**Şekil 2.2 :** Alkali ile aktive edilmiş cürufun reaksiyon mekanizma modeli (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a).

### 2.1.2.2 Düşük kalsiyum içeren maddelerin reaksiyon mekanizması

Düşük CaO ve yüksek $SiO_2$, $Al_2O_3$ oranına sahip olan (örn. metakaolin, uçucu kül, doğal puzolanlar) malzemelerde, reaksiyonları harekete geçirmek için daha sert bir alkali ortam (yüksek alkali ortam ve 60-200 °C kür sıcaklığı) gerekmektedir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a). Temel reaksiyon ürünü üç boyutlu inorganik bir alkali polimer, yani N-A-S-H (ya da alkali aluminosilikat hidrat) jel olup zeolit öncüsü olarak kabul edilebilmektedir (Palomo ve diğ., 1999; Duxson ve diğ., 2007; Provis ve van Deventer, 2009). Bu jel, Davidovits tarafından "jeopolimer" ya da "inorganik polimer" olarak adlandırılmaktadır (Davidovits, 1999). Reaksiyon, alkali aktivatördeki $OH^-$ iyonlarının alüminosilikat kaynağındaki Si-O-Si (2.4) bağlarını çözmesiyle başlar. İyonlar, elektronik yoğunluklarını silikon atomlarının çevresinde yeniden dağıtırlar ve böylece, Si-O-Si bağları zayıflayarak çözünmeye daha fazla eğilimli hale gelir. Bu kimyasal ataklar sonucunda, silanol (–Si-OH) ve sialat (–Si-O–) bileşenleri meydana gelir. Alkali aktivatördeki $OH^-$ iyonları, Si-O-Al bağlarına da aynı şekilde etki ederek onları da çözer ve çözünmüş alüminyumlardan $Al(OH)^{4-}$ anyonları gibi kompleks bileşenler oluşur (2.5) (Garcia-Lodeiro, 2015a).




(2.4)

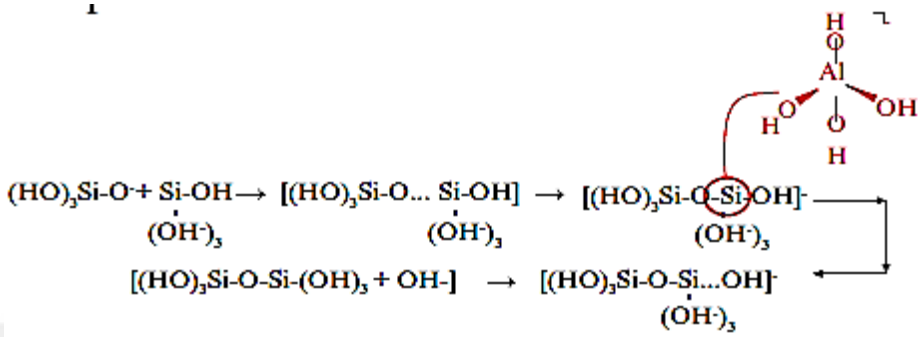



(2.5)

Al atomlarının negatif yüklü olmasından dolayı sistemde bu yükü nötrleştirecek pozitif yüklü iyonlar bulunmalıdır. Aktivatör olarak kullanılan alkali silikat ya da hidroksitler, matrise $K^+$ ya da $Na^+$ gibi pozitif yüklü iyonlar sağlayarak bu gereksinimi yerine getirmektedir (Davidovits, 1994a). Bu pozitif yüklü iyonların Si-O-Al-O zincirinin içerisine girmesiyle, sonuçta oluşan alüminosilikat jel yapısının dayanımı artmaktadır (Khale ve Chaudhary, 2007). Si-O-$Na^+$ bağlarının oluşumu (2.4), siloxanın (Si-O-Si) eski haline dönmesini engeller (Garcia-Lodeiro, 2015a).

İkinci aşamada (topaklanma-yoğunlaşma), iyonik türlerin birikmesi ayrılmış ürünlerin birbirine temasını sağlar ve polikondansasyon başlayarak topaklanmış bir yapı oluşur. Silis monomerleri arasında dimer (Si-O-Si bağları) oluşturmak için reaksiyon olur ve

polimer oluşturmak için sırasıyla diğer monomerlerle reaksiyon (2.6) gerçekleşir. Bu aşama, $OH^-$ iyonları tarafından katalize edilir. Silisik asidin polimerizasyonunun bir sonucu olarak oluşan topaklar, bütün doğrultularda büyümeye başlayarak kolloidleri oluşturur. Alüminatlar da izomorfik olarak silisyum tetrahedriyle yer değiştirerek polimerizasyona katılır (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a).




(2.6)

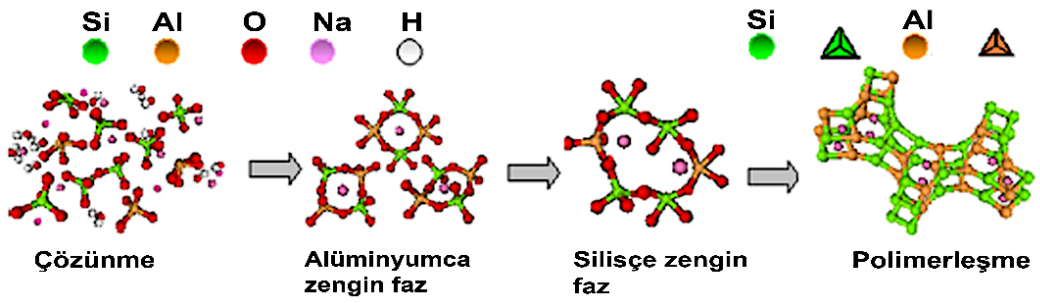
Üçüncü aşamada, bir önceki aşamada yoğunlaşarak büyüyen tanecikler kristalleşir (Garcia-Lodeiro ve diğ., 2015a). Davidovits'e göre, jeopolimer bağlayıcılar zeolitlerin amorf analoglarıdır. Reaksiyon hızları oldukça hızlıdır ve bundan dolayı amorf ya da yarı kistalli matris oluşumu gösterirler. Diğer yandan zeolitler, yüksek kristalli ve düzenli bir içyapıya sahiptir. Davidovits, polimerleşme reaksiyonlarının Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu polimerik zincir ya da halka yapıya sahip ürün oluşumuna neden olduğunu belirtmekte ve aşağıdaki formülle ifade etmektedir (2.7) (Davidovits, 1999):

$$M_n\,[-(SiO_2)_z \mid -AlO_2]_n \,.\, wH_2O \qquad (2.7)$$

M; alkali element ya da katyon (örn. Potasyum, sodyum ya da kalsiyum), n; polikondansasyon ya da polimerizasyon derecesi, z; 1,2,3…32'ye kadar artan bir sayıdır. Davidovits, kimyasal reaksiyonun aşağıdaki aşamalardan oluştuğunu belirtmektedir (Davidovits, 1999):

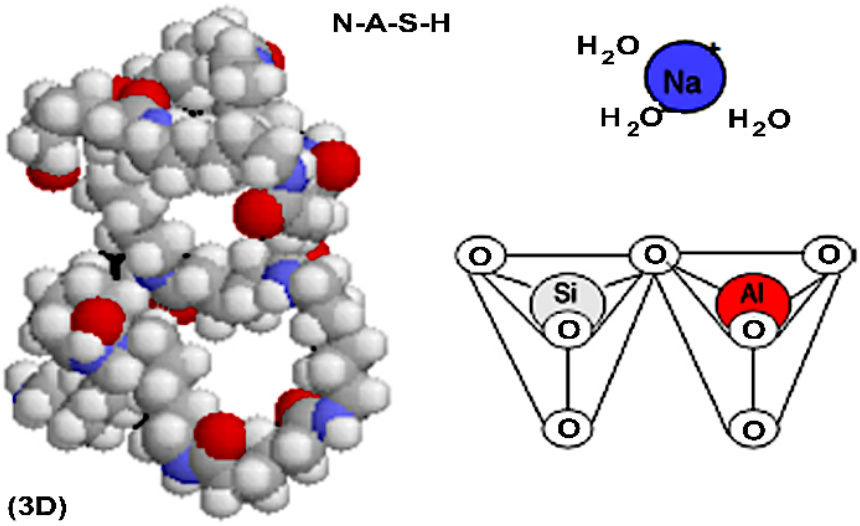
- Kaynak malzemelerindeki Si ve Al atomlarının çözeltideki hidroksit iyonlarının yardımıyla çözünmesi,
- İyonların monomer oluşturmak üzere taşınması, yönlenmesi ya da yoğunlaşması,
- Monomerlerin polimerik yapılar oluşturmak üzere sertleşmesı ya da polikondansasyonu/polimerizasyonu.

Fernández-Jiménez ve diğ. (2005), N-A-S-H jel oluşumunu açıklamak için detaylı bir strüktürel model önermiştir. Buna göre, alüminosilikat kaynağı, alkali çözelti ile temas ettiğinde çözünür ve silis ve alümin monomerleri haline gelir (Şekil 2.3). Bu monomerler, dimer oluşturmak için reaksiyona girer ve sırasıyla diğer monomerlerle birleşip trimer, tetramer…oluşturur. Çözelti doyma noktasına ulaştığı zaman alüminyumca zengin, yarı kararlı N-A-S-H jeli çökelir ve bu jel Jel-1 olarak adlandırılır. Jel 1'in oluşumu, alkali ortamdaki $Al^{3+}$ iyonlarının reaksiyonun erken dönemlerinde daha yüksek oranda olmasıyla açıklanabilmektedir. Çünkü Al-O bağları, Si-O bağlarından daha zayıf olduğu için alüminyum silikona nazaran daha hızlı çözünür. Reaksiyon ilerledikçe alüminosilikat kaynağındaki Si-O grupları çözünür ve reaksiyon ortamındaki ve N-A-S-H jelindeki silikon oranı artar (Jel-2) (Fernández-Jiménez ve diğ., 2005). Bu strüktürel yeniden düzenlenme, malzemenin bileşimini, boşluk mikroyapısını ve dağılımını belirleyerek sonuç üründeki fiziksel ve mekanik özeliklerin gelişimini etkilemektedir (Palomo ve diğ., 2014).



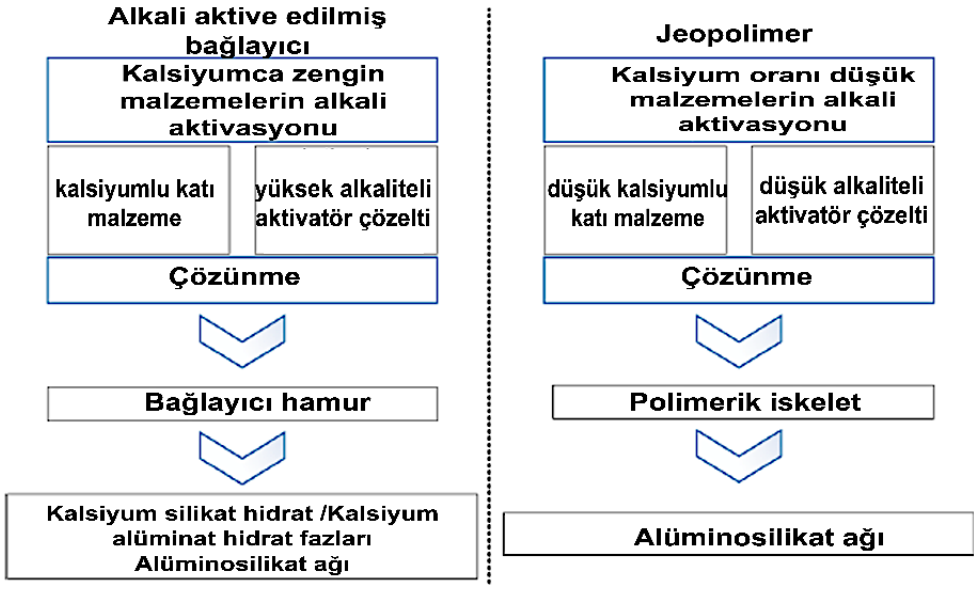

**Şekil 2.3 :** N-A-S-H jeli oluşum modeli (Palomo ve diğ., 2014).

N-A-S-H jeli üç boyutlu bir yapı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.4). $Si^{4+}$ ve $Al^{3+}$ katyonları tetrahedrik olarak oksijenle bağlanmıştır. Pozitif yüklü alkali katyonların ($Na^{+}$ ve $K^{+}$) görevi, alümina tetrahedranın ($AlO^{4-}$) negatif yükünden kaynaklanan elektriksel yük dengesini sağlamaktır. Oluşan jelin yapısı, reaksiyon derecesine, kür sıcaklığına ve aktivatördeki çözülmüş silisin varlığına bağlı olarak değişebilmektedir (Palomo ve diğ., 2014).




**Şekil 2.4 :** N-A-S-H jelinin üç boyutlu yapısı (Palomo ve diğ., 2014).

Yukarıdaki bilgilerden yola çıkılarak, kalsiyum bakımından zengin puzolanların (örn. yüksek fırın cürufu veya C tipi uçucu kül) alkali aktivasyonu sonucunda üretilen bağlayıcının kalsiyum silikat ya da kalsiyum alüminat hidrat fazlarına sahip olduğunu ve sonuç ürünün "alkali-aktive edilmiş bağlayıcı" olarak tanımlandığını söylemek mümkündür. Diğer yandan, kalsiyum oranı düşük malzemelerin (örn. metakaolin, F tipi uçucu kül, çeşitli doğal puzolanlar) alkaliler ile reaksiyonu sonucunda, temel reaksiyon ürünü sodyum aluminosilikat hidrat olan polimerik yapıya sahip bir alüminosilikat ağı oluşmaktadır ve sonuç ürün "jeopolimer" olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.5).

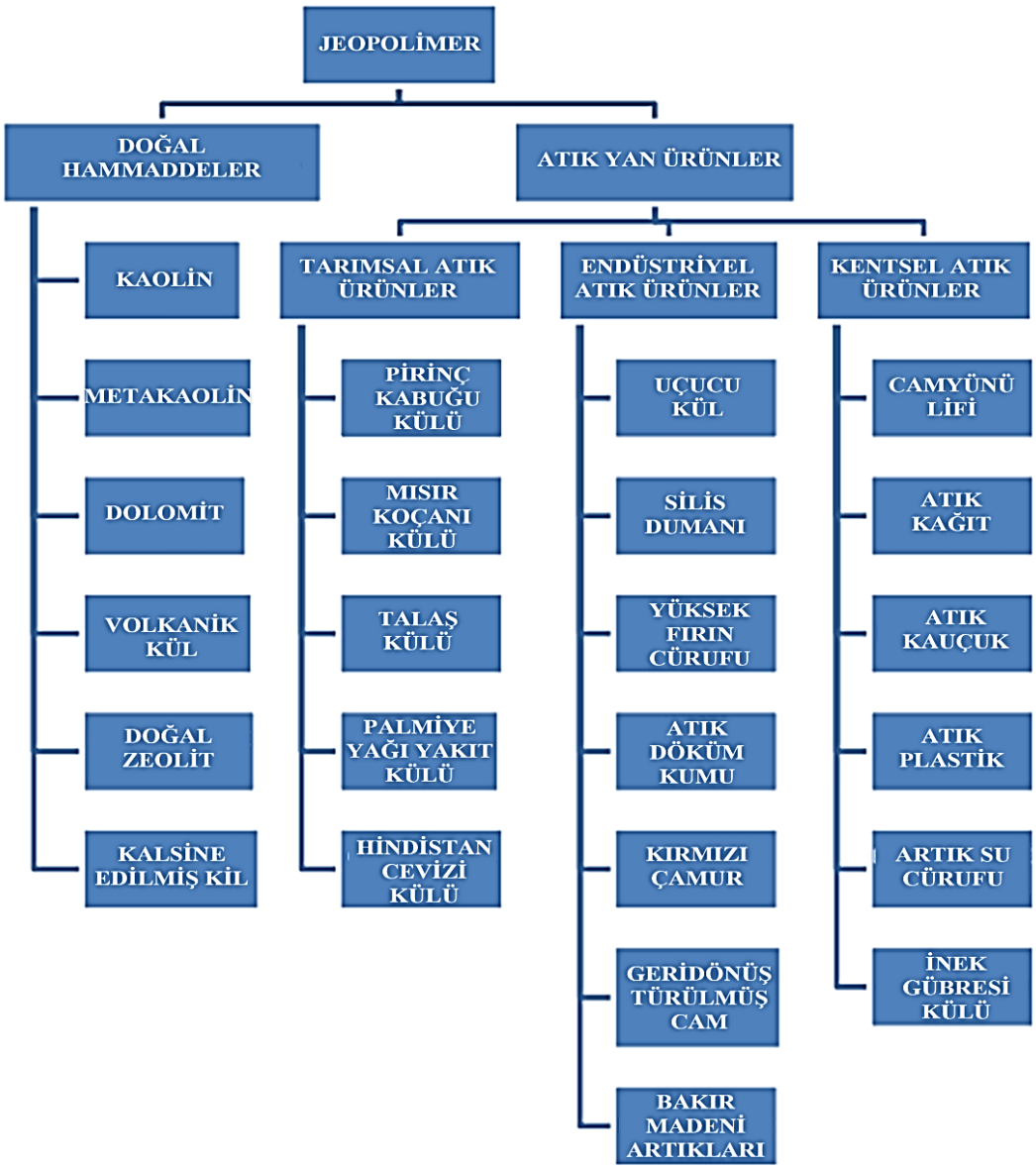



**Şekil 2.5 :** Alkali aktive edilmiş bağlayıcının ve jeopolimerin genel reaksiyon mekanizmaları (Thapa ve Waldmann, 2018).

### 2.1.3 Jeopolimer malzemelerin özeliklerini etkileyen etkenler

#### 2.1.3.1 Kullanılan alüminosilikat kaynağının özelikleri

Jeopolimer sentezinde kullanılabilecek çok çeşitli alternatif hammaddeler bulunmaktadır. Bu hammaddeler, alüminosilikat bileşime sahip olup, yani yeterli miktarda reaktif silis ve alümin içeren, katı öncül maddeler (precursor) olarak tanımlanmaktadır. Alüminosilikat kaynağı olarak çeşitli doğal malzemeler, tarımsal, endüstriyel ve kentsel atık malzemeler kullanılabilmektedir (Şekil 2.6) (Farhan ve diğ., 2020).




**Şekil 2.6 :** Jeopolimer kompozitlerde yaygın olarak kullanılan öncül (precursor) maddeler (Farhan ve diğ., 2020).

- **Puzolanın kimyasal ve mineralojik bileşimi**

Magmanın parçalanmasıyla oluşan volkanik kül, fiziksel ve kimyasal değişim süreçleri (bileşiklerin çözünmesi, süzülmesi ve çökelmesi gibi) geçirerek doğal puzolanları meydana getirir. Volkanik kül oluşumunun ardındaki mekanizma, ayrışma sürecindeki çevresel koşullar ve zaman, doğal puzolanların nihai özelikleri açısından önemli rol oynamaktadır (Robayo-Salazar ve Mejía de Gutiérrez, 2018).

Doğal puzolanların ayrışması sırasında genellikle Si, Al, Fe, Ca, Mg, K ve Na katyonlarıyca zengin bir element bileşimi elde edilir (Robayo-Salazar ve Mejía de Gutiérrez, 2018). Doğal puzolanların çoğunda en bol bulunan kimyasal bileşen silis ($SiO_2$) olup ağırlıkça % 35-80 arasındadır ve bunu, genellikle ağırlıkça % 15-20 ile alümin ($Al_2O_3$) takip etmektedir (Tchadjie ve Ekolu, 2018). Silis oranına göre puzolanlar; riyolitik (>% 77 $SiO_2$), dasitik (% 63–77 $SiO_2$), andezitik (% 57–63 $SiO_2$), bazaltandezitik (% 52–57 $SiO_2$) ve bazaltik (% 45–52 $SiO_2$) olarak sınıflandırılırlar. Kızdırma kaybı genellikle düşüktür, ancak puzolan, zeolit veya kil tipi mineraller içerdiğinde bu oran ağırlıkça % 10'dan daha büyük değerlere ulaşabilmektedir (Robayo-Salazar ve Mejía de Gutiérrez, 2018).

Doğal puzolanların çoğu, plajiyoklaz grubuna ait feldispatlar (anortit-albit serisi); amfiboller (hornblend ve tremolit mineralleri); mikalar (biyotit ve muskovit mineralleri); piroksenler mineralleri bakımından zengindir ve kuvars ve kil bakımından azınlıktadır. Genel olarak, doğal puzolanların mineralojik bileşimi, puzolanın kimyasal bileşimine ve bu elementlerin sıcaklık, basınç ve zaman gibi değişkenlerin etkisi altında meydana gelen bozunmalara bağlı olarak değişmektedir (Robayo-Salazar ve Mejía de Gutiérrez, 2018).

Lemougna ve diğ. (2014), jeopolimer sentezi sırasında alkali ortamdaki volkanik külün reaktivitesinin sadece kimyasal bileşime değil, aynı zamanda küllerin mineralojik bileşimine de bağlı olduğunu gözlemlemiştir. Genellikle, çoğu kristal faz, jeopolimer reaksiyonları sırasında zorlukla çözünür (Chen-Tan ve diğ., 2009; Heah ve diğ., 2012; Tchadjie´ ve diğ., 2016). Bazı kristal fazların çözünebilmesine ve reaksiyona girebilmesine rağmen, genellikle daha yüksek miktarda amorf faz içeren volkanik küllerde daha yüksek reaktivite meydana gelmektedir (Lemougna ve diğ., 2014; Tchakouté ve diğ., 2015; Ndjock ve diğ., 2017).

Ferna'ndez-Jime'nez ve Palomo (2003), uçucu kül esaslı jeopolimer bağlayıcı üretirken, uçucu külün reaktif $SiO_2$ ve $Al_2O_3$ içeriğinin yüksek ve $SiO_2/Al_2O_3$ oranının düşük olması durumunda en yüksek mekanik dayanımları gösterdiğini tespit etmiştir. De Silva ve diğ. (2007), metakaolin esaslı jeopolimer için 3.4–3.8 aralığındaki $SiO_2/Al_2O_3$ oranının yüksek mukavemet gelişimi gösterdiğini belirtmiştir. Chindaprasirt ve diğ. (2012), kalsiyumca zengin uçucu külün jeopolimerizasyonu sırasında $SiO_2/Al_2O_3$ oranının 3.2–3.7 aralığında en iyi mekanik özeliklere sahip ürünler gösterdiğini bildirmişlerdir. Ancak, diğer yapay alüminosilikat kaynaklarıyla karşılaştırıldığında, volkanik küller genellikle daha yüksek $SiO_2/Al_2O_3$ molar oranına sahiptir (Lemougna ve diğ., 2018). Bu nedenle, volkanik kül numuneleri daha az reaktif olabilmektedir. Beş farklı volkanik küllü numune üzerinde yapılan bir çalışmada Ndjock ve diğ. (2017), amorf fazdaki $SiO_2/Al_2O_3$ oranı 4'ün altında olan numunelerde daha iyi bir reaktivite gözlemlemiştir.

- **Puzolanın tanecik boyutu**

Tanecik boyutu dağılımı, puzolanın reaktivitesinde önemli bir etkiye sahiptir. Daha yüksek miktarda ince parçacık, daha yüksek yüzey alanı ve dolayısıyla daha yüksek reaktiviteye neden olarak, yüksek basınç dayanımına sahip malzeme üretimini sağlamaktadır (Ferna'ndez-Jime'nez ve Palomo, 2003; Van Jaarsveld ve diğ., 2003). Yani alüminosilikat kaynağının öğütülmesi, malzemenin jeopolimerleşme için uygunluğunu arttıran bir işlemdir (Gunasekara, 2016). Djobo ve diğ. (2016), öğütme yoluyla tanecik boyutunu azaltarak, bazaltik bir doğal puzolanın reaksiyon hızında ve derecesinde önemli bir artış tespit etmiştir.

### 2.1.3.2 Alkali aktivatör türü ve molar konsantrasyonu

Alkali aktivatörler alüminosilikat kaynağını saran matris fazıdır ve alüminosilikat kaynağının çözünmesini sağlayan bir kimyasal bileşime sahiptir. Genellikle, kullanılan alüminosilikat kaynağından bağımsız olarak, alkali aktive edilmiş bağlayıcıların özelikleri üzerinde etkili olan ana değişken alkali aktivatörün türü ve konsantrasyonudur.

Alkali aktivatörler hidroksitler (ROH, $R(OH)_2$), zayıf asit tuzları ($R_2CO_3$), güçlü asit tuzları ($Na_2SO_4$, $CaSO_4 2H_2O$) ve silis tuzları ($R_2O(n)SiO_2$) olarak gruplandırılabilmektedir. Buradaki R; Na, K veya Li gibi alkali metal iyonlarıdır (Robayo-Salazar ve Mejía de Gutiérrez, 2018). Alkali aktivasyonda yaygın olarak

kullanılan aktivatörler; sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH), sodyum silikat ($Na_2SiO_3$ = SS), potasyum silikat ($K_2SiO_3$) ve bunların kombinasyonlarıdır (Davidovits, 1999; Palomo ve diğ., 1999). Ancak, NaOH maliyet bakımından daha avantajlı olduğundan en yaygın kullanılan alkali aktivatör türüdür (Vickers ve diğ., 2015b).

Palomo ve diğ. (1999), alkali çözelti türünün polimerizasyon sürecinde önemli bir rol oynadığı sonucuna varmıştır. Çünkü, alkaliler sadece reaksiyon ortamındaki elektriksel yük dengesini sağlamakla kalmazlar, aynı zamanda jeopolimer bağlayıcının morfolojisi üzerinde aktif rol alırlar. $Na^+$, $K^+$, $Li^+$ gibi farklı katyonlarla sentezlenmiş jeopolimerlerin sertleşme aşamaları ve üretilen ürün özelikleri birbirinden farklıdır (Jaarsveld ve diğ., 1997; O'Connor ve MacKenzie, 2010b). Örneğin, daha küçük iyon çapına sahip olan $Na^+$, daha küçük silikat oligomerleriyle katyon-anyon iyon çifti reaksiyonu gösterir. Bu tür iyon çiftleri başka bir silikat anyonuyla eşleşmediğinden daha büyük silikat oligomerlerinin oluşumu engellenir. Buna ek olarak, $Al(OH)^{4-}$ bileşiği, monomer gibi daha küçük silikat oligomerleriyle kolayca bağ yapamaz. Diğer yandan, daha büyük iyon çapına sahip olan $K^+$, $Al(OH)^{4-}$ bileşiğinin kolayca bağ yapabileceği daha büyük silikat oligomerlerinin oluşumunu sağlar. Bundan dolayı, KOH ile aktive edilmiş karışımlarda daha fazla miktarda jeopolimer öncüsü oluşur ve daha yüksek mekanik özeliklere sahip malzeme üretilir (Xu ve Van Deventer, 2000).

Sadece alkali hidroksitlerin kullanımına kıyasla, reaksiyon ortamında sodyum veya potasyum silikat gibi çözünür silikatların bulunması reaksiyonların daha yüksek oranda gerçekleşmesini sağlamaktadır. Xu ve Van Deventer (2000), NaOH çözeltisine $Na_2SiO_3$ eklendiğinde alüminosilikat kaynağı ile çözelti arasındaki reaksiyonların geliştiğini ve malzemenin basınç dayanımını arttırdığını tespit etmiştir. Hardjito ve diğ. (2004), daha fazla $Na_2SiO_3$ eklenmesine bağlı olarak karışımın $Na_2SiO_3$/NaOH oranındaki (aktivatör oranı) artışın jeopolimer betonun basınç dayanımını arttırdığı sonucuna varmıştır.

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların özelikleri üzerinde etkili olan etkenlerden birisinin alkali aktivatörün molar konsantrasyonu olduğu yukarıda belirtilmiştir. Molar konsantrasyon (molarite), belirli bir çözelti hacmi içerisinde çözünmüş bir maddenin miktarıdır (Molarity, 2020). Genel olarak, alkali aktivatörün konsantrasyonundaki bir artış, alüminosilikat kaynağı ile temasta olan $OH^-$ iyonu miktarının daha yüksek olmasını sağlar ve böylece, alüminosilikat kaynağındaki Si ve Si-Al'in daha yüksek

oranda çözünmesine olanak vererek jeopolimerleşmeyi arttırmaktadır. Böylece, malzemenin basınç dayanımı daha yüksek olmaktadır. Ancak, belirli bir değerden daha yüksek konsantrasyon, çözeltinin vizkozitesini arttırarak alüminosilikat jelin hızla çökelmesine neden olabilmektedir. Bu durum, jeopolimerleşme derecesini azaltarak mekanik özelikleri düşürebilmektedir (Sekou ve diğ., 2017). Bundan dolayı, doğal puzolanların alkali aktivasyonu için gereken ideal alkali hidroksit molar konsantrasyonu 5-10 M arasında değişmektedir (Bondar ve diğ., 2011a).

Alüminosilikat kaynağındaki bileşenlerin, özellikle alüminyumun çözünmesi için alkali aktivatörün pH değeri 8'den daha yüksek olmalıdır. Çözeltinin pH değeri 9'dan daha yüksek olduğunda Al ve Si bileşenlerinin çözünürlüğü ve çözünme hızı artmaktadır. Çözünme stokiyometrik hale geldiğinde sabit çözünme hızına ulaşılmaktadır (Duxson ve diğ., 2007). Jeopolimer bağlayıcının daha yüksek mukavemete sahip olması için çözeltinin pH değeri 13-14 olmalıdır (Khale ve Chaudhary, 2007).

#### 2.1.3.3 Kür koşulları

Kür koşulları (sıcaklık, bağıl nem ve süre) jeopolimerleşme reaksiyon kinetiğini etkileyen diğer değişkenlerdir ve jeopolimer bağlayıcının özelikleri kür koşullarına karşı duyarlıdır. Kullanılan alüminosilikat kaynağının reaktivitesine bağlı olarak, sertleşme ortam sıcaklığında ya da 100 °C'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir (Davidovits, 2011). Bundan dolayı, reaksiyonların iyi gelişimi için 25-90 °C kür sıcaklığı gereklidir (Allahverdi ve diğ., 2008b). Yapılan araştırmalar, kür sıcaklığını artırmanın jeopolimer bağlayıcı, harç ve betonların fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermektedir (Kani ve Allahverdi, 2009a). Diğer yandan, jeopolimeri su içerisinde kürlemek, reaksiyon için gereken çözünmüş bileşenlerin reaksiyon ortamından uzaklaşmasına neden olarak polikondansasyonun gelişimini engelleyebilmektedir (Zuhua ve diğ., 2009).

Kürleme süresini arttırmak jeopolimerleşme aşamasını geliştirerek malzemenin daha yüksek dayanıma sahip olmasını sağlamaktadır (Gunasekara, 2016). Taftan puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıyı 45-85 °C'de kürlerken, kür süresinin 5 saatten 20 saate kadar arttırılması basınç dayanımını arttırmıştır (Kani ve Allahverdi, 2009a). Ancak, literatürde kür süresini 48 saatten daha fazla arttırmanın özelikler üzerinde önemli bir

etkisinin bulunmadığı (Swanepoel ve Strydom 2002b; Hardjito ve Wallah, 2004) ya da dayanımı azalttığı tespit edilmiştir (Van Jaarsveld ve diğ., 2002).

### 2.1.4 Jeopolimerin avantajları ve dezavantajları

Jeopolimer bağlayıcılar kullanılan alüminosilikat kaynağı, alkali aktivatör türü, karışım oranı, üretim ve kür koşullarına bağlı olarak aşağıda belirtilen avantajlara sahiptir (Davidovits, 2011; Provis ve Bernal, 2014; RILEM TC 224-AAM, 2014):

- Yüksek basınç dayanımı (28 günlük 90 MPa'a kadar artabilen basınç dayanımı)
- Bazı jeopolimer bağlayıcılarda 4 saat içinde nihai basınç dayanımının % 70'ine ulaşan hızlı sertleşme (Comrie, et all., 1989). Bu değer, portland çimento için yaklaşık 24 saattir.
- Jeopolimer malzemeler, 1200 °C sıcaklıklara kadar ısıl karalılığa sahip olabildiğinden (Zheng ve diğ., 2009; Abdul Aleem ve Arumairaj, 2012) yangına karşı dayanıklıdır. Deneysel bir çalışmada, 10 mm kalınlığında üretilen jeopolimer panelin bir yüzeyi 1100 ºC aleve tabi tutulmuştur. 35 dakika sonra, panelin diğer yüzeyindeki sıcaklık 240-283 °C olarak tespit edilmiştir (Khale ve Chaudhary, 2007).
- Jeopolimer üretiminden kaynaklanan $CO_2$ emisyonu geleneksel çimento üretiminden kaynaklanan emisyona nazaran yaklaşık % 60-80 daha düşüktür (Çizelge 2.1) (Zhang ve diğ., 2014). Çünkü, jeopolimer bağlayıcı üretiminde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kalsinasyon işlemi bulunmamaktadır (RILEM TC 224-AAM, 2014). Jeopolimer bir betonun yaşam döngüsündeki sera gazı emisyonunun, Portland çimento betonundakine kıyasla yaklaşık % 70-90 daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Davidovits, 2015).

**Çizelge 2.1 :** Bağlayıcıların üretiminden kaynaklanan $CO_2$ emisyonları (Berge, 2009).

| Bağlayıcı Türü | ($gCO_2/kg$) |
|---|---|
| Kireç | 750 |
| Portland çimento | 860 |
| Uçucu kül/Portland çimento | 670 |
| Yüksek fırın cürufu/Portland çimento | 350 |
| Jeopolimer bağlayıcı | 290 |

- Metalik ve metalik olmayan yüzeylere güçlü adezyon

- Düşük geçirgenlik
- % 0.2-0.4 kadar düşük rötre, yani boyutsal kararlılık
- Asit ve kimyasal etkilere karşı uzun süreli dayanıklılık (durabilite)

Jeopolimer malzemelerle ilgili daha fazla araştırılması gereken bazı dezavantajların olduğunu belirtmek gerekmektedir:

- Jeopolimerlerin endüstri tarafından daha az kabul görmesinin temel nedeni, geleneksel Portland çimento betonunun endüstrideki yerleşik konumudur. Ayrıca, endüstrinin yeni ve yenilikçi teknoloji ve ürünlerin, mevcut olanın yerine geçmesini kabul etmede oldukça tutucu olduğu bilinmektedir. Bu engelleri aşmak için, araştırma toplulukları tarafından sürekli ve daha yoğun çalışmalar yapılması gerekmektedir (Komnitsas ve Zaharaki, 2007).
- Standartlar, malzemelerin genel niteliklere sahip olmasını, kullanım amaçlarına uygun olmasını ve kendinden beklenilen performans gereksinimlerini karşılamasını sağlar. Yeni bir malzeme piyasaya sürülmeden önce mevcut standartların gerekliliklerini karşılamalıdır. Ancak, mevcut standartlar, geleneksel olmayan yeni bir malzemenin geliştirilmesine izin vermeyebilir veya bu yeni teknoloji için yeni bir standart bulunmayabilir ve yeni bir standardın hazırlanması uzun bir süreç olabilir. Geleneksel Portland çimento standartlarının çoğu, kompozisyon ve hidratasyon ürünlerindeki farklılıklar nedeniyle, jeopolimer bağlayıcı ve beton gibi ürünler için uygun değildir. Bu nedenle, inşaat sektöründe jeopolimer teknolojisinin kabulü sınırlı olabilmektedir (RILEM TC 224-AAM, 2014).
- Jeopolimer bağlayıcı, harç ve betonların, hammadde hazırlığı, karıştırılması ve kürlenmesi özel işleme ihtiyaçları gerektirdiğinden üretimi geleneksel betona göre daha zordur (Raijiwala ve Patil, 2011).
- Jeopolimer beton, üretimi sırasında kimyasal kullanımından dolayı oluşabilecek tehlikeler nedeniyle yalnızca ön döküm veya ön karışım malzemesi olarak satılmaktadır (Raijiwala ve Patil, 2011).
- Jeopolimerleşme süreci kullanılan hammaddelerin özelikleri, karışım oranı, üretim ve kürleme koşullarına karşı oldukça hassastır. Geliştirilen özeliklerde homojenliği elde etmek zordur (Raijiwala ve Patil, 2011).

- Jeopolimer bağlayıcının içeriğinde bulunan alkali kimyasallar nedeniyle bağlayıcı zamanla çiçeklenme oluşumuna eğilimli olabilmektedir (Hajimohammadi ve diğ., 2017).
- Jeopolimer bağlayıcılar, Portland çimento esaslı bağlayıcılara nazaran daha pahalıdır. Yüksek maliyetler esasen kullanılan alkali aktivatörlerin üretim maliyetinden kaynaklanmaktadır (Vasconcelos ve diğ., 2011; Hajimohammadi ve diğ., 2017).
- Alkali aktivatörlerin üretimi için gereken enerji tüketimi ve karbon emisyonları özellikle dikkate alınmalıdır (Zhang ve diğ., 2018).
- Yapısal betonların en az birkaç on yıl dayanma gereksinimi göz önüne alındığında, bu tür zaman ölçeklerine ilişkin verilerin yeni geliştirilmiş bir malzeme için mevcut olmadığı durumlarda, durabiliteyle ilgili bilinmezlikler ortaya çıkabilmektedir (RILEM TC 224-AAM, 2014).

### 2.1.5 Jeopolimerin yapı sektöründe kullanım alanları

Jeopolimerler otomotiv, havacılık, metal döküm alanında, yapı malzemesi üretiminde, atıkların stabilizasyonunda, altyapı ve restorasyon uygulamalarında, elektrik sigorta malzemelerinin üretiminde ve dekoratif sanat eserleri yapımında kullanılmaktadır. Özellikle Kanada, Hindistan, Brezilya, İspanya, Bulgaristan, Japonya, Çin, ABD, Hollanda, Almanya, Çek Cumhuriyeti, Romanya, Polonya ve Finlandiya jeopolimer malzemelerin üretilip kullanılmasıyla ilgili çok sayıda girişimlerin bulunduğu ülkelerdir (RILEM TC 224-AAM, 2014).

1950'lerde, Belçika'da yapısal bir malzeme olarak alkali ile aktive edilmiş çimento ve beton üretimi ticari ölçekte gerçekleştirilmiştir. Bu malzeme, “Le Purdociment” olarak adlandırılmıştır. Şekil 2.7a'da verilen binada, ilk altı katın bölümleri Purdociment'ten inşa edilmiştir. 2010 yılında bina incelenmiş ve iyi durumda olduğu tespit edilmiştir (RILEM TC 224-AAM, 2014).

1960'lı yıllardan itibaren, Ukrayna'da bir enstitü, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufundan demiryolu traversleri, yol bölümleri, borular, drenaj ve sulama kanalları, prekast levhalar ve bloklar üretmeye çalışmaktadır. Bu elemanların yıllar sonra incelenmesiyle, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufunun yüksek dayanıklılığa ve kompakt mikro yapıya sahip olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca, Ukrayna'da aynı yıllarda “Azovshelezobeton” tarafından alkali hidroksit ile aktive edilen yüksek fırın

cürufu esaslı betonlardan prekast blok üretimi başlatılmıştır. Bu bloklar, garajların ve apartmanların yapımında kullanılmıştır (Şekil 2.7b). Bu şirket 1980'de kapanmıştır, ancak daha sonra 1999'da Ilyich Iron and Steel Integrated Works, alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı beton üretimine yeniden başlamıştır ve malzemeyi, ağır vasıtaların kullanımı için prekast veya yerinde dökme yol yapımında kullanmıştır (RILEM TC 224-AAM, 2014).




**Şekil 2.7 :** (a) Belçika'daki "Parking 58" binası; (b) Ukrayna'da alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı prekast bloklardan inşa edilmiş konut binası (RILEM TC 224-AAM, 2014).

1970'lerden sonra, Polonya'da alkali aktive edilmiş bağlayıcılar, barajlarda, demiryolu traverslerinde ve atık immobilizasyonunda harç olarak kullanılmıştır. Ayrıca, alkali karbonat ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu betonları bir depoda dış duvar ve döşeme paneli olarak kullanılmıştır. Söz konusu yapı, inşaasından 27 yıl sonra denetlenmiş ve test sonuçları, malzemenin büyük dayanıklılık sergilediğini ortaya koymuştur. Aynı yıllarda Rusya'da, alkali aktive edilmiş uçucu kül esaslı köpük beton otoklav teknolojisiyle üretilmeye başlanmıştır. Ayrıca, Kiev'de alüminosilikat kaynağı olarak metakaolin ve uçucu kül kullanılarak otoklavlanmış alkali aktive edilmiş gazbeton paneller üretilmiştir. Yoğunluğu 600 kg/m$^3$ olan 40×40×4 cm ebatlarındaki bu gazbeton paneller alüminyum tozuyla köpürtülerek üretilmiştir (RILEM TC 224-AAM, 2014).

1973-76'da Davidovits Fransa'da çıkan ani yangınları engellemek amacıyla başlattığı çalışmalarda, ahşap malzeme yüzeyini kaolin ve NaOH karışımı ile kaplayarak yangına dayanıklı paneller geliştirmiştir (Şekil 2.8). Üretim süreci o yıllar için oldukça

farklıdır. Çünkü ilk kez tüm ürün tek adımlı bir süreçte üretilmiştir. Odun yongalarının ve organik yapıştırıcının sertleşmesiyle, siliko-alüminatın 150 °C'de 5-10 dakikada sertleşmesi aynı anda sağlanmıştır. Üretim süreci "SILIFACE Prosesi" olarak isimlendirilmiştir (Davidovits, 2002). Söz konusu malzemenin lise ve üniversite binalarında kullanılması amaçlanmıştır.




**Şekil 2.8 :** Jeopolimer kaplı yangına dayanıklı ahşap panel (Davidovits, 2002).

1980-1990'lar arasında, % 80 Portland çimentosu ve % 20 potasyum karbonat ile aktive edilmiş jeopolimerik malzemelerden oluşan bağlayıcı (Pyrament Çimento) (Davidovits, 1994b), ABD ordusunda kaldırımların ve köprü güverte kaplamalarının hızlı bir şekilde yerleştirilmesinde kullanılmıştır (Davidovits, 2011). Malzeme yüksek bir erken dayanıma sahiptir ve basınç dayanımı 80 MPa'a kadar çıkmaktadır. Düşük ortam sıcaklıklarında bile dökümden sonraki 4-6 saat içinde basınç dayanımı 20 MPa'ya ulaşmaktadır (Husbands ve diğ., 1994). Üretimi durmuş olmasına rağmen, Pyrament hala ABD'deki karayolu acenteleri listesinde "onaylı malzemeler" olarak listelenmektedir. Ayrıca Pyrament, 25 yıl sonra hala havalimanı pistlerinde kullanıldığı için dayanıklılık bakımından "mükemmel" olarak değerlendirilmektedir (RILEM TC 224-AAM, 2014).

1988 yılında Çin'de sodyum sülfatla aktifleştirilmiş-Portland-uçucu kül çimentosu ve kireçtaşı iri agregası kullanılarak üretilen betondan 6 katlı bir ofis binası inşa edilmiştir (Şekil 2.9a). Beton, beton mikseri kullanılarak yerinde karıştırılmıştır. 28 günlük ortalama basınç dayanımı 24.1 MPa'dır. Bina şu anda hizmette olduğundan, söz konusu jeopolimer betonun dayanıklılığının iyi olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca o yıllarda aynı ilçede aynı malzeme kullanılarak bir atölye tasarlanmıştır (Şekil 2.9b). Kolonlar (40x40 cm) yerinde dökülmüş ve kirişler (35x45 cm ve 12.6 m açıklık) ön

dökümle üretilmiş ve daha sonra monte edilmiştir. Günümüzde hala yapıda herhangi bir dayanıklılık sorunu bulunmamaktadır (RILEM TC 224-AAM, 2014).



(a) (b)

**Şekil 2.9 :** (a) Alkali-aktive edilmiş Portland-uçucu kül betonu ile inşa edilmiş 6 katlı bina; (b) Aynı malzeme kullanılarak inşa edilen atölye.

1988 yılında Finlandiya'da çatı kiremitleri üretmek için yüksek fırın cürufu $NaOH+Na_2SiO_3$ karışımıyla aktive edilmiştir. Bu kiremitler, bir evin çatısına yerleştirilmiştir (Şekil 2.10). 24 yıl sonra yapılan incelemede malzemenin zarar görmediği ve yosunlanmadığı tespit edilmiştir (RILEM TC 224-AAM, 2014).



**Şekil 2.10 :** 1988'de alkali aktive edilmiş yüksek fırın cürufu esaslı kiremitle kaplanmış ev.

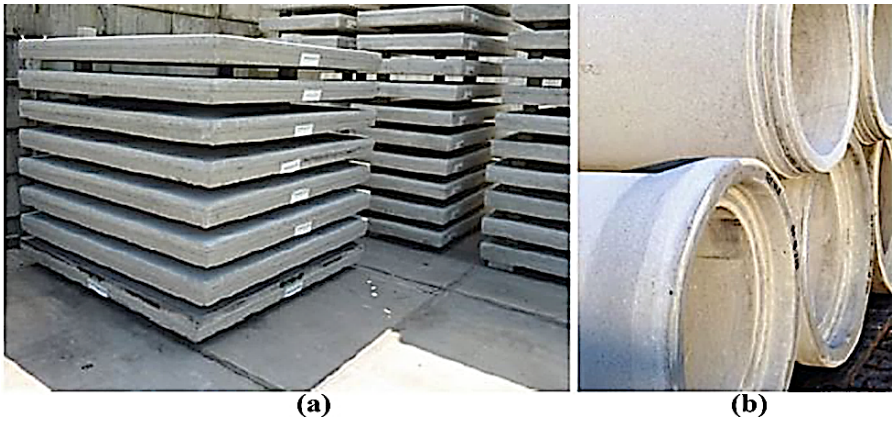
1986 ve 1994 yılları arasında, Rusya'da alkali aktive edilmiş cüruf betonu ile çeşitli yüksek katlı binalar inşa edilmiştir (Şekil 2.11a). Bu binaların dış duvarları yerinde dökülmüştür ve merdivenler ve döşeme elemanları bir fabrikada buharla kürlenerek önceden üretilmiştir. Aynı malzeme, Ukrayna'da yerinde dökme beton yol inşasında kullanılmıştır. 10 yıl sonra yol malzemesinin özelikleri incelenmiş ve hemen yanındaki

Portland çimentolu beton yol ile karşılaştırılmıştır. Alkali aktive edilmiş beton yol iyi durumdayken, Portland çimentolu beton yolun ciddi şekilde hasar gördüğü tespit edilmiştir (Şekil 2.11b) (RILEM TC 224-AAM, 2014).




**Şekil 2.11 :** (a) 1994 yılında Rusya'da alkali aktive edilmiş cüruf betonu ile inşa edilmiş 20 katlı konut binası (Palomo, 2014); (b) Yerinde dökme alkali aktive edilmiş cüruf betonu (solda) ve Portland çimentosu betonu (sağda) (RILEM TC 224-AAM, 2014).

"JK çimentosu" olarak bilinen alkali aktive edilmiş metalurjik cüruf, Çin'de uzun yıllardır kullanılmaktadır (Dong, 1999). Çin'de son yıllarda jeopolimer malzemeler üzerinde çalışılan yaklaşık 50 araştırma merkezi bulunmaktadır (Pan ve Yang, 2010). "ASCEM Çimento" Hollanda'da 15 yılı aşkın bir süredir sentetik camların alkali aktivasyonu üzerinde çalışmaktadır. ASCEM Çimento, cüruf, uçucu kül ve alkali aktivatörden oluşur. Çalışma sonuçları, ASCEM Çimento kullanılarak 2×2 m kaldırım ünitelerinin (Şekil 2.12a) ve kanalizasyon borularının (Şekil 2.12b) üretilebileceğini göstermektedir (Ascem, 2019).




**Şekil 2.12 :** (a) ASCEM Çimento kaldırım üniteleri; (b) Kanalizasyon boruları (RILEM TC 224-AAM, 2014).

Siloxo ve Zeobond, alkali aktivasyona dayalı inovasyon geliştirmek için önemli çaba sarf eden özel şirketlerdir. Siloxo (1999-2005), Yeni Zelanda'da C Sınıfı uçucu kül esaslı önceden karıştırılmış jeopolimer beton geliştirmeyle ilgili çalışmıştır.

2005 yılından bu yana, Zeobond, Avustralya'da alkali aktive edilmiş betonun ticari kabulü için çaba göstermektedir. Cüruf, uçucu kül ve alkali aktivatörlerden üretilen E-Crete bağlayıcısını "Dünya Dostu Beton" lisansı altında geliştirmiştir. Ürünlerin mukavemetleri 20-55 MPa aralığındadır (Zeobond, 2008).

Zeobond, 2009 yılında Melbourne'de Salmon Street Köprüsü üzerinde E-Crete prekast panelleri uygulamasını tamamlamıştır. 55 MPa ile yüksek erken mukavemete, düşük rötreye ve uzun süreli dayanıklılık özeliklerine sahiptir (Şekil 2.13a). Ayrıca, Melbourne'de Brady Limanında 25 MPa basınç dayanımına sahip E-Crete yerinde dökme kaldırımlar uygulanmıştır (Şekil 2.13b).



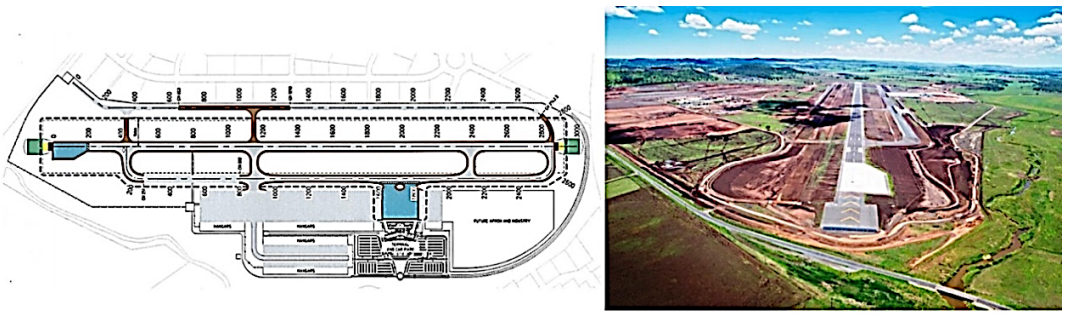

**Şekil 2.13 :** (a) Melbourne'deki Salmon Street Köprüsü üzerindeki E-Crete prefabrik kaldırım panelleri; (b) Melbourne'deki Brady Limanında E-Crete yerinde dökme kaldırımlar (E-Crete, 2019).

Aynı yıl, Melbourne'deki köprünün istinat duvarlarının restorasyonu için 40 MPa basınç dayanımına sahip beton üretilmiş (Şekil 2.14a) ve pompalanarak uygulanmıştır. Ayrıca, 2012 yılında Melbourne'deki Melton Kütüphanesi'nin dış cephesi 9 m uzunluğunda ve 40 MPa basınç dayanımına sahip 35 E-Crete prekast kaplama panelleri ile kaplanmıştır (Şekil 2.14b) (E-Crete, 2019).




**Şekil 2.14 :** (a) Melbourne'deki Swan Street Köprüsü'ndeki E-Crete istinat duvarı; (b) Melbourne'deki Melton Kütüphanesinin dış duvarlarında E-Crete panel kaplaması (E-Crete, 2019).

Avustralya'da Wagners Company tarafından üretilen "Toprak Dostu Beton", yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve alkali aktivatörlerden oluşan bir jeopolimer bağlayıcı sistemidir (Wagner, 2019). Bu malzeme, 2014 yılında Brisbane West Wellcamp Havalimanı'nın ağır hizmet kaplamalarının (taksi yolu ve hangarlar dahil) yapımında kullanılmıştır (Şekil 2.15). Bu uygulama, jeopolimer betonun dünyadaki en büyük ticari uygulaması olarak kabul edilmektedir. 25.000 $m^3$ beton kaplama ve 15.000 $m^3$ jeopolimer beton havaalanına giriş köprüsü, prekast menfezler, temeller, kazıklar, terminal binası için döşeme, orta şeritler, kaldırımlar ve kanalizasyon tankları vb. uygulamalarda kullanılmıştır. Bu projede jeopolimer beton kullanılması, geleneksel çimento betona nazaran 8800 ton $CO_2$ azalmasına neden olmuştur (Aldred ve diğ., 2015).




**Şekil 2.15 :** Jeopolimer beton kaplama işlerinin (a) genel planı ve (b) hava fotoğrafı (Aldred ve diğ., 2015).

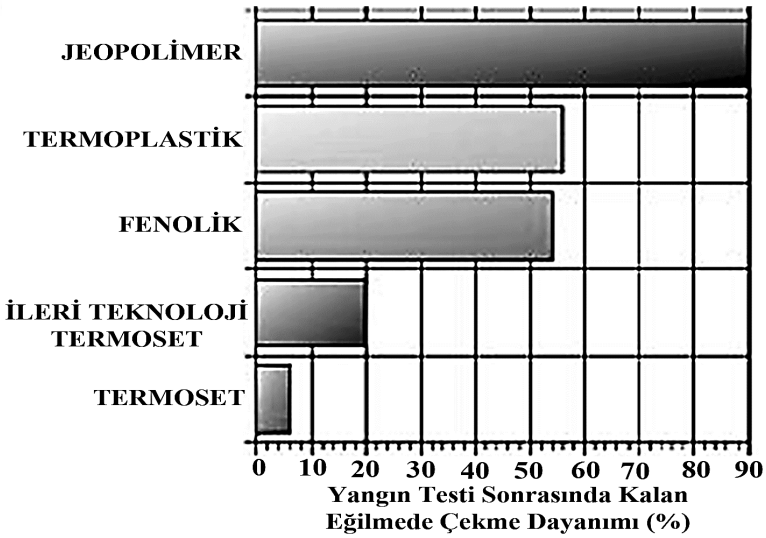
Avustralya'daki The Global Change Institute Binası'ndaki üç asma katta kullanılan 11 m açıklıklı prekast döşeme kirişlerinin (40 MPa) yapımında "Toprak Dostu Beton" kullanılmıştır (Şekil 2.16). Prekast kalıplar söz konusu betonla doldurulmuş,

sıkıştırılmış ve 7 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmiştir. Söz konusu prekast kirişlerin uygulanmasıyla, jeopolimer betonun geleneksel betona benzer şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir (Bligh ve Glasby, 2013).



**Şekil 2.16 :** Avustralya'daki Global Change Institute Binası'nın prekast jeopolimer kirişleri (Bligh ve Glasby, 2013).

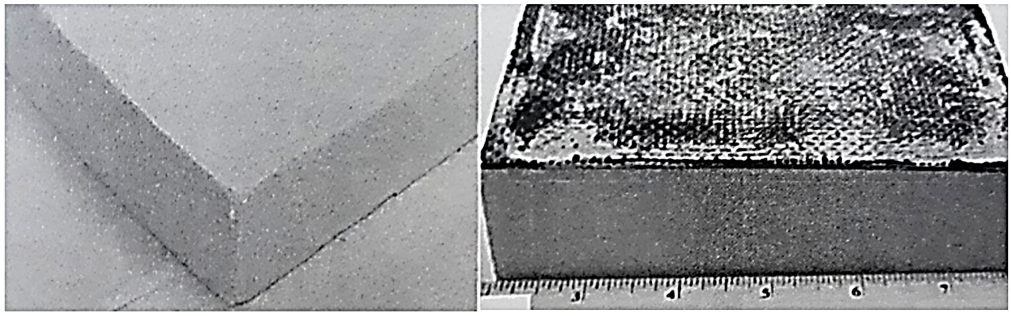
Malzemelerin yangına maruz kaldıktan sonraki mukavemeti çok önemlidir. 1996 yılında Lyon ve diğ., cam veya karbon lifleriyle güçlendirilmiş jeopolimer kompozitlerin, termoset, fenolik veya termoplastik içeren kompozitlere kıyasla daha yüksek yangın direncine sahip olduğunu belirlemiştir. Şekil 2.17'de, şiddetli ısı akışına (800 °C) maruz kaldıktan sonra, jeopolimer kompozitlerin daha yüksek mukavemete sahip olduğu görülebilir. Bu durum, lif katkılı jeopolimerleri uçak kabinlerinin yangın koruması için uygun malzemeler yapmaktadır (Majidi, 2009).




**Şekil 2.17 :** Yangına maruz kaldıktan sonra kompozitlerin eğilme mukavemeti oranı (Majidi, 2009).

Havacılık sektörü, yolcuların yangından kaçmalarına imkan vermek için yangına dayanıklı kaplamalara ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, Ceramatec Inc. yangına dayanıklı jeopolimer kaplamalar üretmeye çalışmaktadır. Şirket, 1350 °C'ye kadar geliştirilmiş termal stabiliteye sahip bir jeopolimer matrisi hazırlayarak poliüretan

altlık (Şekil 2.18a) üzerine karbon dokuma ile uygulamıştır (Şekil 2.18b) (Boxley ve diğ., 2009).




**Şekil 2.18 :** (a) Kaplanmamış poliüretan altlık; (b) Jeopolimer kaplı karbon dokuma (Boxley ve diğ., 2009).

2016 yılında kurulan Renca Company, jeopolimer teknolojisine dayalı çok çeşitli malzemeler üretmektedir. Firmanın en önemli ürünlerinden biri, 1000 °C'de 2 saat yangına dayanıklı ve püskürtülen jeopolimer köpüktür (Şekil 2.19a). Renca Company ayrıca, asit, sülfat ve tuza dayanıklı deniz kıyısı yapılarında kullanılabilecek jeopolimer beton elemanlar da üretmektedir (Şekil 2.19b) (Renca, 2019).



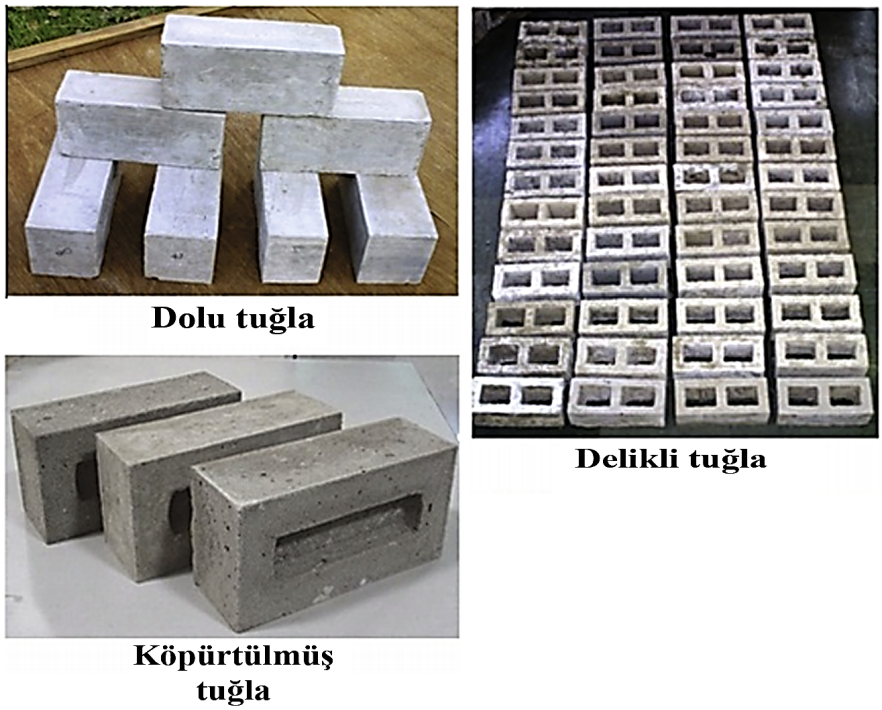

**Şekil 2.19 :** (a) Yangına dayanıklı püskürtülmüş jeopolimer köpük; (b) Deniz kıyısında kullanılan jeopolimer beton yapı elemanları (Renca, 2019).

Milliken Altyapı, uzun yıllardır jeopolimer harçtan altyapı işlerinde kullanılabilecek harç üretmektedir. Püskürtülerek uygulanan bu jeopolimer harç, korozyon direnci nedeniyle yağmur suyu, sıhhi ve endüstriyel kanalizasyonların onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır (Şekil 2.20) (Milliken, 2019).




**Şekil 2.20 :** Jeopolimer harç ile kanalizasyonun onarımı (Milliken, 2019).

Central Building Research Institute (CSIR), uçucu kül, cüruf ve diğer alüminosilikat kaynaklarını kullanarak ısı kürüyle ve ortamda kürlenen jeopolimer harç, beton, tuğla, dolu ya da delikli blok, yalıtım betonu, köpük, sandviç kompozitler ve ısıya dayanıklı kaplamalar geliştirmektedir. Örneğin 230x115x75 mm ebatlarındaki jeopolimer blok, uçucu kül esaslı jeopolimer bağlayıcı ve doğal kum agrega kullanılarak ve 80 °C'de 2 saat kürlenerek üretilmiştir. Malzeme, kullanılan aktivatör konsantrasyonuna bağlı olarak 1920-2100 kg/m$^3$ yoğunluğa, % 10-15 su emme oranına ve 12-25 MPa basınç dayanımına sahiptir. Ayrıca, 400x300x200 mm ebatlarında delikli bloklar da üretilmiştir (Şekil 2.21) (Singh ve diğ., 2015).




**Şekil 2.21 :** Jeopolimer dolu, delikli ve köpürtülmüş tuğlalar (Singh ve diğ., 2015).

## 2.2 Hafif Jeopolimer (Jeopolimer Köpük)

Günümüzde yüksek poroziteye sahip (toplam porozite ≥ % 50 ya da birim hacim ağırlık ≤0.7 g/cm$^3$) jeopolimer köpükler, düşük ısı iletkenlik, kimyasal kararlılık, iyi mekanik özelikler, üretimlerinde düşük $CO_2$ emisyonu ve düşük enerji kullanılması avantajlarını sağlamalarından dolayı, boşluklu inorganik malzeme araştırma alanının odak noktası haline gelmiştir (Bai ve Colombo, 2018). Bu malzemelerin ısıl performansı, gazbeton ve köpük beton gibi boşluklu ve ısı iletkenlik katsayısı düşük olan geleneksel duvar malzemelerine nazaran daha iyidir. Bunun için, söz konusu malzemelerdeki ısı iletkenlik katsayısı 0.070 W/mK'e yakın olmalıdır. Düşük ısı iletkenlik, yüksek yalıtım kapasitesine eşdeğer olduğundan (Azimi ve diğ., 2016), malzemenin ısı iletkenlik katsayısı azaldıkça ısı transferine karşı direnci artmaktadır (Davraz ve diğ., 2020). Bu özellik, katı matris fazının içerisinde boşluklu bir içyapı oluşturulmasıyla elde edilmektedir (Prud'homme ve diğ., 2015a).

### 2.2.1 Hafif jeopolimer üretim yöntemleri

Boşluklu içyapıya ve yüksek ısıl performansa sahip jeopolimer köpükler beş temel yöntemle üretilebilmektedir (Zhang ve diğ., 2014):

#### 2.2.1.1 Kimyasal köpürtme

Kimyasal köpürmede gözenekler, taze bağlayıcıda gaz salma reaksiyonu ile oluşturulur ve bu, sertleştiğinde hücresel bir yapı elde edilir. Alkali ortamda metaller su varlığında oksitlenerek $H_2$ gazı açığa çıkarken, peroksit ayrışarak $O_2$ gazı açığa çıkar (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Oluşan kabarcıklar, bağlayıcı hamurun veya harcın genleşmesine yol açar. Metalik tozun dozu üretilmek istenen malzemenin hedef yoğunluğa göre düzenlenmektedir (Zhang ve diğ., 2014). Bu yöntemle boşluklu jeopolimer malzeme üretmek için kullanılan maddeler; alüminyum tozu, hidrojen peroksit, sodyum peroksit, sodyum perborat, silikon tozu, silis dumanı ve silis karbürdür (Papa ve diğ., 2016). Kullanılan bu maddelerin türüne göre çözeltilerde gaz oluşumuna neden olan reaksiyonlar (2.8; 2.13) aşağıda belirtilmiştir (M= Na, K gibi katyonlardır) (Bai ve Colombo, 2018):

$$2Al + 2MOH + 2H_2O \rightarrow 2MAlO_2 + 3H_2(g) \quad (2.8)$$

$$Si + 2MOH + 2H_2O \rightarrow M_2SiO_3 + 2H_2(g) \quad (2.9)$$

$$2NaOCl \rightarrow 2NaCl + O_2(g) \quad (2.10)$$

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2(g) \quad (2.11)$$

$$4NaBO_3 + H_2O \rightarrow 2NaOH + Na_2B_4O_7 + 2O_2(g) \quad (2.12)$$

$$AlN + MOH + H_2O \rightarrow MAlO_2 + NH_3(g) \quad (2.13)$$

Gaz üretim reaksiyonu ve jeopolimerizasyon reaksiyonu aynı anda meydana geldiğinden, birbirlerini etkileyebilirler ve bu da jeopolimer köpüğün nihai yapısını ve özeliklerini etkileyebilmektedir. Örneğin, köpürtücü ajan olarak Al kullanıldığında, alkali ortamda Al bozunmasının ara ürünü olan $Al(OH)_3$ jel, alüminosilikat kaynağı üzerinde çökelebilir ve reaksiyonun gelişimini yavaşlatabilir. Benzer şekilde, köpürtücü ajan olarak silis dumanı veya silis karbür kullanıldığında, bu malzemelerde bulunan amorf silis, jeopolimerizasyon reaksiyonuna katılarak sertleşme süresini ve mukavemeti etkiler. Aktivatör olarak kullanılan sodyum hidroksit, Al'un oksidasyonu için bir katalizör görevi görürken, sodyum silikat bir inhibitör olarak işlev görür (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

#### 2.2.1.2 Mekanik köpürtme

Jeopolimerlerin mekanik köpürtmesi iki yöntemle gerçekleştirilebilir. İlk yöntem, yüzey aktif (sürfaktan) maddenin jeopolimer karışımına eklenmesi ve yüksek hızda karıştırılmasıdır. Burada, yüzey aktif madde eklenmeden önceki karışım, reaksiyonu hızlandırmak için sınırlı bir süre için ısıl işleme tabi tutulabilir. Karıştırma hızı, nihai poroziteyi etkileyen anahtar parametredir: köpüğü oluşturmak için daha yüksek bir karıştırma hızı gerekli olsa da belirli bir hız sınırının ötesinde, üretilen kabarcıklar üzerinde daha fazla gerilme uygulayarak kabarcıkları kırabilmektedir. Yüzey aktif maddelerin doğrudan eklenmesi yerine, alkali ortamda yağ asitlerinin yerinde reaksiyonu yoluyla jeopolimer karışımı içinde üretilebilirler. Bu yöntem sabunlaşma olarak bilinmektedir. Bitkisel yağ, ayçiçek yağı veya hint yağı gibi yağ asitleri kaynakları, yerinde yüzey aktif maddeler üretmek için jeopolimer karışımı ile karıştırılabilir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

İkinci yöntem olan ön köpürtme, yüksek basınçlı köpük oluşturucular aracılığıyla sulu köpüğün üretilmesi ve köpüğün jeopolimer karışımı ile karıştırılması aşamalarından oluşmaktadır. Ön köpürtmede yaygın olarak kullanılan köpürtücü ajanlar, protein bazlı köpürtücü ajanlar ve sodyum dodesil sülfat, sodyum lauril eter sülfat veya Triton X-100 gibi yüzey aktif maddelerdir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

#### 2.2.1.3 Katı jeopolimerin şişmesi

Daha yüksek Si/Al oranına (>20) sahip alkali aktive edilmiş katılar, ısıtıldıklarında gözenekli bir yapı oluşturmak üzere genleşir. Bu davranış genellikle şişme olarak adlandırılır ve 400 kg/m$^3$ kadar düşük yoğunluğa sahip ve yüksek poroziteli jeopolimer malzeme üretmek için kullanılabilir. Atık cam ve perlit kullanılarak sentezlenen jeopolimerlerin şişme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

Yüksek sıcaklıklara (300–1000 °C) maruz kaldığında, silanolden (Si–OH) hidroksil (OH) grubu su buharı olarak salınır ve jeopolimer bileşimini terk eder; bu işleme dehidroksilasyon denir. Katı jeopolimer bu sıcaklıklarda deforme olabilir hale geldiğinden, su buharı, kimyasal köpürmede üretilen gazda olduğu gibi, gözenekli bir yapı oluşturmak için bir şişme maddesi görevi görür. Bu köpürme işleminin başlangıç sıcaklığı, jeopolimer bağlayıcıdaki Si:Al oranı düzenlenerek kontrol edilebilir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

#### 2.2.1.4 Mikrodalga ışıması

Taze jeopolimer hamur mikrodalga radyasyonuna maruz kaldığında kabarma davranışı sergiler. Bu yöntem köpürme maddesi olarak taze jeopolimer hamurundaki serbest suyu kullanır. Yeterli güce sahip mikrodalga (>800 W), taze jeopolimer hamurunun sıcaklığını bir dakikadan daha kısa sürede 130 °C'ye kadar yükseltebilir. Sıcaklıktaki böyle ani bir artış, hızlı bir reaksiyona neden olacak ve geçirimsiz viskoz bir bağlayıcı oluşturacaktır. Bu arada, serbest su buharlaşacak ve gözenekli bir yapı oluşturmak için bu viskoz bağlayıcı tarafından tutulacaktır. Burada, mikrodalganın gücü, su içeriği ve alkali aktivatör konsantrasyonu arttıkça köpürme derecesi artmaktadır. Şimdiye kadar bu yöntemle 600 kg/m$^3$ kadar düşük yoğunluklar elde edilmiştir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

#### 2.2.1.5 Diğer yöntemler

Boşluklu jeopolimerler üretmek için diğer çeşitli yöntemler: replika yöntemi, kurban edilen dolgu maddesi yöntemi ve katmanlı üretim yöntemidir. Replika yönteminde, polimerik bir süngerden (örneğin poliüretan) yapılmış gözenekli bir şablon, bağlayıcıyı süngere emprenye etmek için bir jeopolimer bağlayıcının içine birkaç kez daldırılır. Daha sonra gözenekli jeopolimer/sünger kompozit 1100–1300 °C'de sinterleştirilerek gözenekli jeopolimer elde edilir. Kurban edilen dolgu maddesi yönteminde de replika yöntemindeki gibi bir şablon kullanılır. Bununla birlikte, nihai gözenekli jeopolimer, dolgu maddelerinin şablondan çıkarılmasıyla elde edilen orijinal şablonun negatif bir kopyasıdır. En son yöntem, doğrudan mürekkeple yazma tekniğidir, yani katmanlı üretim (3D baskı) kullanarak bir jeopolimer kafes yapısının basılmasıdır (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

### 2.2.2 Hafif jeopolimer özelikleri

#### 2.2.2.1 Porozite ve gözenek yapısı

Jeopolimer köpükteki gözenekler dört gruba ayrılır: (1) NASH jelinde bulunan ve ortalama genişliği < 1 nm olan katmanlar arası gözenekler, (2) NASH jelleri arasındaki ortalama genişliği 1 nm-10 nm olan jel gözenekleri, (3) 5-100 nm yarıçaplı kılcal gözenekler ve (4) ortalama genişliği > 50 μm olan hava boşluğu veya yapay olarak hapsedilmiş boşluklar. Boşluklu jeopolimer malzemelerin gözenek yapısı özelikleri; gözenek boyutu, gözenek boyutu dağılımı, homojenlik, gözenekler arasındaki bağlantı ve toplam gözenekliliktir (porozite) (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Bu gözenek yapısı özelikleri jeopolimerlerin yoğunluk, mukavemet, ısı iletkenlik, su emme ve ses emme özeliklerini optimize etmede önemli rol oynamaktadır. Özellikle makro ölçekli (ortalama genişliği > 10 μm olan) gözenekler, malzemenin temel özeliklerini belirlemektedir (Cui ve diğ., 2018). Gözenek türleri ayrıca, açık ve kapalı olmak üzere de gruplandırılmaktadır. Açık gözenekler malzemenin dışıyla ve birbiriyle bağlantılı boşluklardan oluşurken, kapalı gözenekler ise malzeme içinde izole edilmiş ve geçirgenliği olmayan boşluklardır (Prud'homme ve diğ., 2015).

Farklı köpürtme yöntemleri, karışımın bileşimi ve kür koşulları malzemenin gözenek boyutunu, gözenek boyutu dağılımını, gözeneklerin birbiriyle olan bağlantısını ve sonuç ürünün fiziksel ve mekanik özeliklerini etkilemektedir. Jeopolimer bağlayıcının farklı köpürtme yöntemleriyle elde edilen gözenek özelikleri Çizelge 2.2'de

gösterilmektedir. Buna göre, mekanik köpürtme ile üretilen malzemedeki gözenek boyutları, kimyasal olarak köpürtülmüş malzemeninkinden daha küçüktür (Zhang ve diğ., 2014). Ayrıca kimyasal köpürtmede, bazı durumlarla kontrolsüz genleşmeler olabilmesine rağmen, mekanik köpürtmede kimyasal köpürtmeye kıyasla köpürme sürecini verimli bir şekilde kontrol etmek mümkündür ve daha ince homojen gözenekler elde edilmektedir (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

**Çizelge 2.2 :** Farklı köpürtme yöntemleriyle elde edilen gözenek özelikleri (Zhang ve diğ., 2014).

| Köpürtme Yöntemi | Gözenek çapı (mm) | Toplam gözenek hacmi | Şekil | Birim hacim ağırlık ($kg/m^3$) |
|---|---|---|---|---|
| Kimyasal | 0.5-3.0 | % 15-65 | Küresel | 300-800 |
| Mekanik | 0.1-1.0 | % 10-50 | Daha az küresel | 400-1600 |

Jeopolimer köpüklerin toplam porozitesi köpük oluşturucu ajan miktarının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Literatürde, jeopolimer köpüklerin porozitesi kullanılan alüminosilikat kaynağının ve boşluk oluşturucu ajanın türüne, karışım oranlarına ve kür koşullarına bağlı olarak genellikle % 50-89 arasında değerler almaktadır (Novais ve diğ., 2016b; Vaou ve Panias, 2010). Jeopolimer bağlayıcıya daha fazla köpük oluşturucu ajan eklenmesiyle, oluşan kabarcıkların aralarındaki film zayıflar ve kabarcıklar birleşmeye başlar. Böylece, gözenek boyutu ve gözeneklerin birbirleriyle bağlantısı artar (Zhang ve diğ., 2015; Zhang ve diğ., 2016; Huang ve diğ., 2018; Xu ve diğ., 2018). Bu olay, daha yüksek alkali konsantrasyonuna sahip ve kür sıcaklığını 70 °C'nin üzerinde olduğu reaksiyon ortamlarında daha fazla etkilidir. Çünkü bu ortamlarda köpük oluşumu çok daha hızlı gerçekleşmektedir (Xu ve diğ., 2018).

#### 2.2.2.2 Birim hacim ağırlık

Jeopolimer köpüğün birim hacim ağırlığı, köpürtücü ajan dozajı (kabarcıkların hacmi) ve taze jeopolimer köpüğün içindeki kabarcıkların stabilitesi ile belirlenir. Başlangıçta yoğunluk, köpürtücü ajan dozajının artmasıyla minimuma düşer. Ancak minimum yoğunluğu veren optimum dozajın ötesinde, reaksiyon ortamına daha fazla köpürtücü ajan eklenmesiyle, köpük çökmesinin (foam collapse) bir sonucu olarak yoğunluk artmaya başlamaktadır (Liu ve diğ., 2014; Ducman ve Korat, 2016; Luna-Galiano ve diğ., 2018). Jeopolimer köpüklerin birim hacim ağırlığı genel olarak % 0.7 $g/cm^3$'ten daha düşüktür (Bai ve Colombo, 2018). Daha düşük bir yoğunluk, elde edilen

malzemenin ısı yalıtımı ve ses emilimi kabiliyetini artırırken dayanımı ve dayanıklılığı azaltmaktadır (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

#### 2.2.2.3 Isı iletkenlik katsayısı

Literatürde jeopolimer köpüklerin ısı iletkenlik katsayısı, alüminosilikat kaynağının ve boşluk oluşturucu ajanın türüne, karışım oranlarına ve kür koşullarına bağlı olarak genellikle 0.03-0.67 W/mK aralığında değişmektedir (Vaou ve Panias, 2010; Gualtieri ve diğ., 2016). Literatürde bildirilen en düşük ısı iletkenlik katsayısı değerleri (0.03 W/mK, Vaou ve Panias, 2010) ahşap lifli levha ve gaz beton gibi bazı geleneksel duvar malzemelerinin ısı iletkenliğinden daha düşük olmasına rağmen, cam yünü, taş yünü, cam köpüğü gibi ısı yalıtım malzemelerininkine nazaran daha yüksektir. Bu sonuçlar, düşük ısıl iletkenlik uygulamaları için jeopolimer köpüklerin kullanım potansiyelini göstermektedir. Buna rağmen, düşük enerji tüketimi ve karbon ayak izi sağlamak için köpük üretim aşamaları dikkatlice düzenlenmelidir (Novais ve diğ., 2020).

#### 2.2.2.4 Basınç dayanımı

Köpük oluşturma yönteminden bağımsız olarak, yoğunluktaki azalma ile köpürtülmüş malzemelerin basınç dayanımı azalmaktadır. Bu durum, yoğunluğun (veya boşluk hacminin) köpürtülmüş malzemelerin mukavemeti için kritik olduğu anlamına gelmektedir (Zhang ve diğ., 2014). Belirli bir yoğunluk için, köpürtülmüş jeopolimerin basınç dayanımı gözenekler arası bağlantı ve homojenliğe bağlıdır (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Homojen olarak dağılmış kapalı gözenekler, toplam mukavemeti arttırır (Luna-Galiano, 2018; Dhasindrakrishna ve diğ., 2020; Liu ve diğ., 2016). Basınç dayanımı ayrıca, hücre duvarlarının mukavemetine bağlıdır. Hücre duvarını oluşturan jeopolimer bağlayıcının mukavemeti, alüminosilikat kaynağı ve aktivatör kombinasyonlarına, karışım oranına ve kür koşullarına bağlıdır (Puertas ve diğ., 2000; Collins ve diğ., 1998). Literatürde, jeopolimer köpüklerin basınç dayanımı söz konusu etken parametlere bağlı olarak genellikle 0.2-11.6 MPa'dır (Vaou ve Panias, 2010; Bai ve diğ., 2018).

#### 2.2.2.5 Eğilmede çekme dayanımı

Jeopolimer köpüğün eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımına nazaran yaklaşık 4-10 kat daha düşüktür (Liu ve diğ., 2014). Bununla birlikte, eğilme mukavemeti, basınç mukavemetine kıyasla yoğunluk ve gözenek özeliklerindeki değişimlere daha

duyarlıdır (Yang ve diğ., 2013). Liflerle güçlendirme, eğilme mukavemetini % 400'e kadar artırabilir. Lifler, eğilme sırasında oluşan çatlaklar arasında köprü kurar, çekme yükünü taşır ve malzemenin eğilme kapasitesini arttırır (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021).

## 2.3 Konuyla İlgili Yayınların Değerlendirilmesi ve Deneysel Çalışmanın Planlanması

### 2.3.1 Doğal puzolanik maddelerden jeopolimer bağlayıcı üretimi olanaklarının araştırıldığı çalışmalar

Alkali aktive edilmiş bağlayıcı üretiminde hammadde kaynağı olarak doğal puzolan kullanım olanakları araştırılmıştır. İran'da bulunan Taftan doğal puzolanı, $NaOH+Na_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla karıştırılmıştır. Aktivatörler kuru puzolana eklendikten ve karıştırıldıktan sonra kalıplanarak ortam koşullarında kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, Taftan puzolanının $NaOH+Na_2SiO_3$ çözeltisi karışımıyla aktive edilmesiyle 28 günlük basınç dayanımı 63 MPa'ya ulaşan malzeme geliştirilebildiği tespit edilmiştir (Allahverdi ve diğ., 2008a; Allahverdi ve diğ., 2008b).

İran'da bulunan Sircan doğal puzolanının özelikleri üzerinde NaOH ve $Na_2SiO_3$ aktivatör karışımının etkileri araştırılmıştır. Taftan puzolanının jeopolimerleşmesine dayanan bir önceki çalışmada sözü edilen karışım oranları ve kür koşulları uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, Sircan puzolanının $NaOH+Na_2SiO_3$ karışımıyla aktive edilerek bağlayıcı üretilebileceği, su/bağlayıcı oranı, silika modülü ve sodyum oksit oranına bağlı olarak 28 günlük basınç dayanımı 56 MPa'a ulaşan malzeme geliştirilebildiği tespit edilmiştir (Allahverdi ve diğ., 2008c).

Kani ve Allahverdi (2009a), Taftan doğal puzolanını $NaOH+Na_2SiO_3$ çözeltisi karışımıyla aktive ederek ürettiği jeopolimer bağlayıcıyı atmosfer basıncında (45, 65, 85 °C'de, 5, 10, 15 ve 20 saat) ve yüksek basınç altında (125, 150, 180 ve 210 °C'de, 20, 30, 40 ve 50 saat) kürlemiştir. Atmosferik basınçlı buhar küründe, en yüksek basınç dayanımı en yüksek sıcaklık ve en uzun kürleme süresinde (85 °C ve 20 saat) elde edilmiştir (57.5 MPa). Daha yüksek sıcaklıkların uygulandığı (125, 150, 180, 210 °C) otoklav küründe ise, dayanımın sıcaklığın artışıyla etkili bir şekilde arttığı tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı, 210 °C sıcaklıkta 30 saat otoklav küründe elde edilmiştir (108.75 MPa).

Taşıyıcı jeopolimer malzeme üretmek için volkanik külün alternatif bir hammadde olarak kullanılabilmesinin araştırıldığı çalışmada, puzolanik madde olarak İtalya'daki Etna Dağı ve Kamerun'daki Foumbot Dağı kalıntıları kullanılmıştır. Aktivatör olarak % 50 NaOH ve % 50 $Na_2SiO_3$ çözeltileri kullanılmıştır. Numuneler 25, 75, 100 ve 200 °C'de 48 saat ve 400 °C'de 12 saat kürlenmiştir. 25 °C'de kürlenen numunelerin yoğunluğunun 1.7 g/cm$^3$ iken, 400 °C'de kürlenenlerinki 2.0 g/cm$^3$ olması volkanik esaslı jeopolimerlerin yoğunlaşmasında kür sıcaklığının olumlu etkisi olduğunu göstermiştir. Bu etki mekanik davranışa doğrudan yansımakta olup, kür sıcaklığının 25 °C'den 400 °C'ye artmasıyla her iki türdeki jeopolimerin eğilmede çekme dayanımı 14 MPa'dan 20 MPa'a ve basınç dayanımı Kamerun puzolanı için 28 MPa'dan 52 MPa'a ve İtalya puzolanı için 36 MPa'dan 56 MPa'a artmıştır. Sıcaklık artışına bağlı olarak porozitenin azalması, araştırmacıların "sıcaklığın aktivasyon için bir etken olduğu" varsayımlarını açıklamaktadır. Çalışmada elde edilen basınç dayanımı (>20 MPa) ve su emme oranının (<% 20), ASTM C62 (2017) ve ASTM C216 (2017) yapı ve cephe tuğlası gereksinimlerini karşılaması, söz konusu malzemelerin yapılarda kullanılabilmesi bakımından önemli bulunmuştur (Kamseu ve diğ., 2009).

Kamerunda bulunan iki farklı bölgenin (Djoungo ve Galim) doğal puzolanı ortam koşullarında kürlenerek jeopolimer bağlayıcı üretme olanakları araştırılmıştır. 12 M NaOH+$Na_2SiO_3$ çözeltisi kullanılmıştır. En uygun alkali aktivasyon çözeltisini belirlemek için beş farklı $SiO_2/Na_2O$ oranında karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışım 24 °C ortam koşullarında polietilen (PE) içerisinde 24 saat ön kürlemeye tabi tutulduktan sonra 28. güne kadar PE kullanılmaksızın ortam koşullarında bekletilmiştir. Djoungo ve Galim puzolanlarında en yüksek basınç dayanımı sırasıyla 19 ve 50 MPa olarak tespit edilmiştir (Tchakoute ve diğ., 2013).

Jeopolimer bağlayıcı kullanarak yapı malzemesi üretmek amacıyla Suudi Arabistan volkanik puzolanının kullanım olanakları araştırılmıştır. Doğal puzolan % 100 NaOH çözeltisi (10 M) ve kütlece % 80 NaOH + % 20 $Na_2SiO_3$ çözeltisiyle ayrı ayrı aktive edilmiştir. Karışım 80 °C ve % 100 bağıl nemde 1, 3, 7, 28 gün kürlenmiştir. 28. gündeki basınç dayanımı NaOH aktive edilmiş numunelerde 33 MPa iken, NaOH+$Na_2SiO_3$ ile aktive edilmiş numunelerde 47 MPa'dır. Yani sodyum hidroksitli çözeltiye sodyum silikat (SS) eklenmesiyle basınç dayanımı önemli ölçüde artmıştır. Elde edilen basınç dayanımı sonuçları strüktürel uygulamaların çoğu için uygun bulunmuştur (Moon ve diğ., 2014).

Japonya'da bulunan Shinmoe Dağı volkanik külünden düşük enerji tüketen metotla yapı malzemesi üretilebilmesi için jeopolimerleşme reaksiyonlarından yararlanılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH çözeltisi ve NaOH+$Na_2SiO_3$ çözeltisi ayrı ayrı uygulanmıştır. Numuneler 50 °C sıcaklık ve % 80 bağıl nemli ortamda 1-12 gün kürlenmiştir. Yeterli basınç dayanımının elde edilmesi için 3 günlük kür süresinin ideal olduğu, bu süreden sonra daha uzun sürede kürlemenin basınç dayanımını daha fazla arttırmada etkili olmadığı tespit edilmiştir. NaOH çözeltisiyle hazırlanan karışıma $Na_2SiO_3$ çözeltisi eklendiğinde, basınç dayanımı üzerinde önemli etki görülmemesi, araştırmada kullanılan volkanik külün jeopolimerleşme reaksiyonları için gereken miktarda $SiO_2$'e sahip olduğunun bir göstergesi olarak belirlenmiştir (Takeda ve diğ., 2014).

Doğal puzolanların jeopolimerizasyonu üzerinde alkali aktivatör türünün, alkali hidroksit konsantrasyonunun ve kür koşullarının etkileri araştırılmıştır. Taftan puzolanı (doğal halde) ve Shahindej puzolanı (doğal halde ve 800 °C de 12 saat kalsinasyondan sonra) kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak KOH+$Na_2SiO_3$ ve NaOH+$Na_2SiO_3$ ayrı ayrı kullanılmıştır. KOH/NaOH konsantrasyonun etkilerini araştırmak üzere 2.5, 5, 7.5 10 M çözeltiler hazırlanmıştır. KOH+$Na_2SiO_3$/NaOH oranı 7.7 ve puzolan/alkali aktivatör oranı 3.2 olarak karışımlar hazırlanmıştır. Üretilen numuneler, PE kaplanarak oda sıcaklığında 24 saat ön kürlemeye tabi tutulmuştur. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler otoklavda 150 °C sıcaklık ve 2 MPa basınçta 3 saat ve etüvde 40 ve 60 °C'de 7 gün kürlenmiştir. Çalışma sonucunda KOH ile aktivasyonun NaOH aktivasyonuna göre genellikle daha yüksek basınç dayanımı verdiği tespit edilmiştir. Bu durum, $K^+$ iyonlarının geniş silikat oligomerlerinin oluşumunu kolaylaştırmasına ve bundan dolayı KOH çözeltileri kullanıldığında, daha fazla jeopolimer oluşmasına dayandırılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 5–7.5 M KOH çözeltisiyle elde edilmiştir. En yüksek dayanımın 60 °C kür sıcaklığında elde edildiği belirlenmiştir. 60 °C etüvde 7 günde elde edilen dayanım değeri otoklavda 150 °C ve 2 MPa basınçta 3 saatte elde edilebilmesi zaman tasarrufu açısından olumludur (Bondar ve diğ., 2011a).

Kamerun volkanik külünden üretilen jeopolimerin termo-mekanik özeliklerinin araştırıldığı çalışmada, NaOH/KOH ve $Na_2SiO_3$ çözeltileri kullanılmıştır. Numuneler 90 °C de 7 ve 21 gün kürlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımı 7. günde 20-30MPa ve 21. günde 25-40 MPa olarak edilmiştir. $Na_2SiO_3$ eklenmiş numunelerin basınç

dayanımı daha yüksek tespit edilmiştir. Üretilen jeopolimerin 700-800 °C'ye kadar ısıl yönden stabil olduğu ve bu malzemenin bina uygulamalarında kullanılabileceği belirlenmiştir (Lemougna ve diğ., 2013).

Kamerun-Foumbot Petponoun bölgesi volkanik külünden üretilen ve NaOH çözeltisi ile aktive edilen jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri araştırılmıştır. Bağlayıcıya volkanik kül oranının kütlece % 10, 25 ve 40'ı oranında 100 µm - 1 mm arasında tanecik boyutuna sahip kum eklenerek en yüksek basınç dayanımına sahip karışım elde edilmeye çalışılmıştır. En yüksek basınç dayanımı 55 MPa olarak tespit edilmiştir. Kum eklenmesi hamurun porozitesi azaltmasına ve birim ağırlığını arttırmasına rağmen, basınç dayanımı ilk durumdaki hamurun basınç dayanımına nazaran daha düşük çıkmıştır. Eklenen kum oranı arttıkça basınç dayanımı daha da azalarak % 40 kumlu numunelerde 30 MPa'a kadar düşmüştür. Bu dayanım azalması, jeopolimerin kum tarafından seyreltilmesinin bir sonucu olarak ifade edilmiştir. Bu çalışmada % 40 oranında kum eklenmesiyle elde edilen 30 MPa basınç dayanımı ASTM C216'nın gereksinimlerini (>20 MPa) sağladığından dolayı, söz konusu karışımlara kum katılabileceği belirtilmiştir (Lemougna ve diğ., 2011).

SS/NaOH oranı (aktivatör oranı), alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ve kür koşullarının volkanik puzolan esaslı jeopolimer betonun dayanımı ve mikro yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Aktivatör olarak 14 M NaOH+$Na_2SiO_3$ çözeltisi kullanılmıştır. Aktivatör oranı ($Na_2SiO_3$/NaOH) 2.0, 2.5 ve 2.75 olan karışımlar üretilmiştir. Numuneler 24 saat süreyle 25 °C'de bekletilmiştir. 24 saat sonunda kalıplarından çıkarılan numuneler PE içerisinde 60 °C etüvde 0.5, 1, 3, 7, 14 ve 28 gün kürlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı (37.5 MPa) 0.525 alkali aktivatör/bağlayıcı oranı ve 2.5 aktivatör oranına sahip numunelerde görülmüştür. Toplam alkali aktivatör/bağlayıcı oranı arasında bir dengenin olması gerektiği anlaşılmıştır. Denge sağlandığı durumda, alkali aktivasyon sürecinde bütün alüminosilikat malzemenin tükenmesini sağlanarak, karışımda reaksiyona girmemiş çok az sayıda parça bırakılmaktadır. Kür süresinin ilerlemesi dayanımı arttırmıştır (Ibrahim ve diğ., 2017).

Uçucu kül esaslı jeopolimer betonun mekanik özelikleri üzerinde Pasuruan (Endonezya)'dan elde edilen doğal puzolan katkısının etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Alkali aktivatör olarak $Na_2SiO_3$ ve NaOH kullanılmıştır. Jeopolimer beton kütlece % 25 uçucu kül + aktivatör, % 75 agregadan üretilmiştir. Bu karışıma uçucu kül kütlesinin % 12'si oranında su ve % 50'si oranında doğal puzolan

eklenmiştir. Numuneler 4 gün PE kaplanarak, daha sonra PE kaplanmaksızın 28 gün ortam koşullarında kürlenmiştir. Karışımdaki $Na_2SiO_3$ miktarının fazla olması, katalizör olarak davranarak polimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmış ve jeopolimer betonun erken yaştaki basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek basınç dayanımı % 100 uçucu küllü karışımda (48.59 MPa) elde edilmiştir. Karışıma doğal puzolan eklenmesi, jeopolimer betonun basınç dayanımını (30.97 MPa) azaltmıştır. Bu durum doğal puzolanın silis ve alümin bileşiminden kaynaklanabilmektedir. Kullanılan doğal puzolan silisçe zengindir (% 87.5). Ancak doğal puzolan bileşiminin alümince yetersiz (% 0.2) olması, uçucu kül ve doğal puzolandaki silisin bir kısmının NaOH ile reaksiyona girememesine neden olabilmektedir. Jeopolimer bağlayıcının basınç dayanımı 1. günden itibaren 28. güne kadar artmıştır. Basınç dayanımındaki artış oranı özellikle 0-3 gün arasında daha yüksektir. Çalışma sonucunda, 10 M NaOH konsantrasyonuna ve kütlece 2.5 aktivatör oranına sahip jeopolimer betonun 30.97 MPa basınç dayanımı göstermesi nedeniyle strüktürel beton olarak kullanılabilmesi önerilmiştir (Risdanareni ve diğ., 2015).

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların bütün avantajlarına rağmen yapı malzemesi olarak kullanımlarını kısıtlayan iki konu vardır: (1) Düşük kalsiyum esaslı alkali aktivite edilmiş (örn. uçucu kül ve doğal puzolanlı) bağlayıcıların nispeten yüksek sıcaklıkta kürlenmesi gereksinimi, ki bu durum onların sadece prekast beton olarak üretimine olanak sağlamaktadır. (2) Kalsiyumca zengin (örn. cüruflu) bağlayıcıların hızlı sertleşmesi. Bu kaygıları ortadan kaldırmak amacıyla araştırmacılar düşük ve yüksek kalsiyumlu bağlayıcıların uygun bir kombinasyonuyla yapılan alkali aktivasyonuyla yüksek sıcaklıklı küre gereksinim ve hızlı sertleşme sorunları çözülebilmektedir. Najimi ve diğ., doğal puzolan ve cürufu $NaOH+Na_2SiO_3$ ile aktive etmiştir. Cüruf: doğal puzolan oranı 30:70, 50:50, 70:30 olmak üzere bağlayıcı madde hazırlanmıştır. Alkali aktive edilmiş karışımlarla Portland çimentodaki dayanım değerine ulaşan karışımlar üretilebileceği belirlenmiştir. Karışımların basınç dayanımı aktivatördeki SS oranının artması ve çözelti/bağlayıcı oranının azalmasıyla artmıştır. Bağlayıcının cüruf oranının artmasıyla dayanım gelişimi hızlanmıştır (Najimi ve diğ., 2018a).

Yüksek fırın cürufundan üretilen jeopolimer bağlayıcının özelikleri üzerinde farklı alkali çözelti türü ve konsantrasyonunun, aktivatör oranının ve bu bağlayıcıya katılan Taftan puzolanın etkileri araştırılmıştır. KOH/NaOH (6, 8 ve 10 M) ve $Na_2SiO_3$ çözeltisi aktivatör olarak kullanılmıştır. Cüruflu jeopolimer bağlayıcıya doğal puzolan

katkısının (kütlece % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75, 100) etkileri araştırılmıştır. Çalışma sonucunda, ideal alkali hidroksit konsantrasyonu 6-8 M olarak belirlenmiştir. Konsantrasyonun 10 M'a artması işlenebilirliği ve basınç dayanımı azaltmış, maliyeti ve çiçeklenme riskini arttırmıştır. Cüruf esaslı jeopolimer doğal puzolanla % 5 ikame edildiğinde en iyi işlenebilirlik tespit edilmiştir. İkame oranının % 50 ve % 75'e arttırılmasıyla işlenebilirlik sırasıyla % 24 ve % 60 azalmıştır. % 100 pomzalı jeopolimer bağlayıcı yüksek bir vizkoziteye sahiptir ve kalıplara yerleştirilmesi zorlaşmıştır. 3. gün sonunda jeopolimer, basınç dayanımının % 52'sini elde etmiştir ve 28. güne kadar bu oran % 87'ye ulaşmıştır. Jeopolimerin hızlı dayanım kazanması, beton strüktürlerin onarımında kullanılmak için ideal bir malzeme olduğunu göstermiştir (Nadoushan ve Ramezanianpour, 2016).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu katkısının, Taftan doğal puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH+$Na_2SiO_3$ kullanılmıştır. Cürufun jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisini araştırmak için doğal puzolan miktarının kütlece % 0, 5, 15 ve 25'i kadar cüruf doğal puzolanla yer değiştirmiştir. Kütlece % 25'e kadar olan cüruf katkısı doğal puzolan esaslı jeopolimer bağlayıcının 28 günlük basınç dayanımında herhangi bir iyileşme sağlamazken, % 25 katkı oranı basınç dayanımını azaltmıştır. Kuru bağlayıcının Si/Al oranındaki azalmanın jeopolimerin dayanımını iyileştirdiği bilgisi literatürde mevcuttur. Bu çalışmada cüruf eklenmesiyle kuru bağlayıcının Si/Al oranının arttığı görülmüş ve bundan dolayı yüksek ikame oranında dayanımın azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Kütlece % 5 yüksek fırın cürufuyla ikame edilmiş bağlayıcının en yüksek basınç dayanımı gösterdiği (36 MPa) ve çiçeklenme göstermediği belirlenmiştir (Allahverdi ve diğ., 2011).

Ürdün doğal puzolanına, 1/3 puzolan/kum oranında kum, NaOH ve $Na_2SiO_3$ eklenmesiyle üretilen jeopolimer harç 60 °C etüvde 24 saat kürlenmiştir. Jeopolimer harç özelikleri üzerinde NaOH konsantrasyonunun (10-12M), $Na_2SiO_3$/NaOH oranının (2-2.5) ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranının etkileri değerlendirilmiştir. En yüksek basınç dayanımı (17.5 MPa), 10 M NaOH konsantrasyonuna sahip, $Na_2SiO_3$/NaOH oranı 2.5 ve alkali aktivatör/bağlayıcı oranı 0.3 olan numunelerde tespit edilmiştir. Ürdün puzolanı esaslı jeopolimer malzemenin yapısal uygulamalarda kullanılma potansiyelinin olduğu belirlenmiştir (Haddad ve Lababneh, 2020).

Türkiye'de bulunan Bigadiç doğal zeoliti esaslı jeopolimer harcın (1/3 puzolan/kum) fiziksel ve mekanik özeliklerinin gelişiminde karışım oranlarının etkileri araştırılmıştır. Zeolit NaOH ve $Na_2SiO_3$ alkali aktivatör karışımıyla aktive edilerek 30° C'de 7 gün kürlenmiştir. NaOH konsantrasyonunun etkilerini belirlemek amacıyla 8, 10 ve 12 M çözelti, $Na_2SiO_3$/NaOH'ın etkilerini belirlemek amacıyla 1.0, 2.0 ve 3.0 karışım oranı kullanılmıştır. Jeopolimer harcın mukavemet özelikleri NaOH konsantrasyonunun ve aktivatördeki $Na_2SiO_3$ miktarının artmasıyla artmıştır. En yüksek basınç dayanımı (6 MPa), 12M NaOH ve $Na_2SiO_3$/NaOH=3.0 olan numunelerde tespit edilmiştir (Değirmenci, 2018).

Türkiye'de bulunan Nevşehir volkanik tüfünün 1/2 puzolan/kum oranında agrega ile karıştırılmasıyla üretilen harcın özelikleri üzerinde, aktivatör türü (NaOH ve NaOH+$Na_2SiO_3$), konsantrasyonu (10, 12, 14 ve 16 M), aktivatör/bağlayıcı oranı (0.35, 0.45, 0.50 ve 0.60) ve kür sıcaklığının (90, 105, 120, ve 150 °C, 72 saat) etkileri araştırılmıştır. Karışım oranlarının değişmesine bağlı olarak 9.5-37 MPa arasında basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı (37 MPa) 16 M NaOH konsantrasyonuna ve 0.45 alkivatör/bağlayıcı oranına sahip numunelerin 120 °C'de kürlenmesiyle elde edilmiştir. Karışımdaki aktivatör/bağlayıcı oranının artmasıyla bağlayıcının daha yoğun ve kompakt bir içyapı kazandığı ve bunun mekanik özelikleri arttırıcı etkisinin olduğu belirlenmiştir (Kantarcı ve diğ., 2019).

Senegal'de bulunan Bafoundou tüfü ile düşük sıcaklık altında tuğla üretimi olanaklarının araştırıldığı çalışmada tüf 4, 8 ve 12 M NaOH çözeltisi ile aktive edilmiştir. Hazırlanan karışım 40 ve 80 °C'de 7, 14, 28 ve 60 gün ve 120 °C'de 6, 12 ve 24 saat kürlenmiştir. NaOH konsantrasyonunun ve kür süresinin artmasına bağlı olarak basınç dayanımı artmış ve 4-20 MPa basınç dayanımına sahip jeopolimer esaslı tuğla üretilebileceği tespit edilmiştir (Diop ve Grutzeck, 2008).

Senegal'de bulunan Niemenike kilinin (doğal halde ve 700 °C'de kalsine edildikten sonra) 4, 8 ve 12 M NaOH çözeltisiyle aktive ederek 100 °C'nin altındaki sıcaklıkta tuğla üretimi olanakları araştırılmıştır. Her iki kil türünden üretilmiş malzemenin özelikleri, kür sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmiştir. 40 °C ve % 60 bağıl nemde kür süresinin 14 günden daha fazla artmasıyla, basınç dayanımı daha fazla artmamıştır. Kalsine edilmemiş (doğal haldeki) kilin dayanım değerleri daha yüksektir. Her iki kil türünde de NaOH konsantrasyonunun 4 M'dan 12 M'a artmasına

bağlı olarak basınç dayanımı yaklaşık 3 MPa'dan 16 MPa'a kadar artmıştır (Diop ve diğ., 2011).

Ürdün Çölü doğal puzolanı katkılı jeopolimer betonun özelikleri üzerinde kum/puzolan (1.75–3.0) ve su/puzolan (0.35–0.50) oranının, aktivatör türünün, aktivatör/puzolan oranının (0.08, 0.1, 0.12, 0.14, 0.16) ve kür süresinin etkileri araştırılmıştır. Alkali aktivatör olarak NaOH+$Na_2SiO_3$ ve KOH+$Na_2SiO_3$ çözeltileri kullanılmıştır. Harç numuneleri üretmek için standart silis kumu kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat ortam koşullarında bekletildikten sonra 80 °C'de 24 saat kürlenmiş ve deneyler 3, 7 ve 28. gün gerçekleştirilmiştir. Kum/puzolan oranının 1.75'ten 2.5'a kadar artmasıyla numunelerin basınç dayanımı artmıştır. Çünkü kum tanecikleri bağlayıcıya nazaran daha yüksek dayanıma sahiptir. Ancak kum miktarının daha fazla artmasıyla (kum/puzolan=3.0) azalan basınç dayanımının nedeni jeopolimerleşme reaksiyonlarıyla oluşan jel miktarının bütün kum taneciklerini bağlamaya yetemeyecek kadar az olması gösterilmiştir. Aktivatör/puzolan oranının artmasıyla basınç dayanımı artmıştır ve en yüksek basınç dayanımı (8 MPa) 0.16 aktivatör/puzolan oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. KOH esaslı numunelerin basınç dayanımı NaOH esaslı numunelere nazaran daha yüksektir. Su/puzolan oranının artmasına bağlı olarak numunelerin basınç dayanımı azalmıştır. Ortam koşullarındaki kür süresinin 3 günden 28 güne kadar artmasıyla basınç dayanımı artmıştır (Irshidat ve diğ., 2018).

Bulgaristan'da bulunan Beli doğal zeolitinin özelikleri üzerinde farklı alkali aktivatör türlerinin etkileri (6, 8, 10 M NaOH, $Na_2SiO_3$, $Na_2CO_3$) araştırılmıştır. Sıvı/katı oranı 0.55 olarak sabit tutulmuştur. Kum/puzolan oranı 3/1 olacak şekilde kuvars kumu eklenerek jeopolimer harç üretilmiştir. Kalıplanan numuneler PE kaplanarak 10 gün ortam koşullarında kürlenmiş ve ardından kalıplar sökülerek PE içerisinde 28. güne kadar bekletilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek basınç dayanımı (3.7 MPa), $Na_2SiO_3$ esaslı numunelerde elde edilmiştir. NaOH ile aktivasyonda elde edilen en yüksek basınç dayanımı (2.7 MPa), 8M konsantrasyona sahip numunelere aittir. $Na_2CO_3$ ile aktive edilen numunelerin basınç dayanımı ise 1.0-2.5 MPa arasındadır (Nikolov ve diğ., 2017).

Alkali aktive edilmiş doğal puzolan ve uçucu kül esaslı jeopolimer harçların özelikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu alüminosilikat kaynakları 2.5, 5, 7.5, 10 ve 12.5 M NaOH ile aktive edilmiş ve harç üretmek için ince silis kumu

(kum/puzolan=2.0) eklenmiştir. Aktivatör/puzolan oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Numuneler PE kaplanarak 60 °C'de 3 saat ve sonrasında kalıplarından sökülerek PE kaplı halde 80 °C'de 7 gün kürlenmiştir. Çalışmada, jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimi için gereken ideal NaOH konsantrasyonunun doğal puzolan esaslı jeopolimer için daha yüksek olması gerektiği belirlenmiştir. Uçucu kül esaslı jeopolimer harç 5 M NaOH ile aktive edildiğinde elde edilen basınç dayanımı, doğal puzolan esaslı jeopolimer harçta 7.5 M NaOH ile elde edilebilmektedir. Düşük molariteye sahip karışımlarda (5 ve 7.5 M), doğal puzolan esaslı jeopolimerin basınç dayanımı (sırasıyla 5.3 ve 12.5 MPa) uçucu kül esaslı jeopolimerden daha düşük (sırasıyla 5.9 ve 20.6 MPa) iken, yüksek molariteli karışımlarda (10 ve 12.5 M) benzer sonuçlar elde edilmiştir (doğal puzolanlı=31.9 ve 30.8 MPa; uçucu küllü=30.4 ve 34.7 MPa). Uçucu kül esaslı harçların dayanımı daha hızlı gelişim göstermiştir. NaOH konsantrasyonunun artması, her iki alüminosilikat kaynağına sahip numunelerin basınç dayanımlarını da arttırmıştır (Najimi ve diğ., 2018b).

### 2.3.2 Hafif jeopolimer (köpük) üretimi olanaklarının araştırıldığı çalışmalar

Metakaolin yapay puzolanının KOH+$K_2SiO_3$ ile aktivasyonu sonucunda jeopolimer bağlayıcı ve bu bağlayıcının ısıl performansını arttırmak için amorf silis dumanı eklenerek jeopolimer köpük üretilmiştir. Hazırlanan karışım PE kaplanarak 70 °C'de 4 saat bekletildikten sonra kalıplar sökülerek 70 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, silis dumanı eklenmesinin karışımın porozitesinde değişikliğe neden olduğu belirlenmiştir. Elde edilen inorganik köpük, boşluklu bir malzeme özeliğindedir ve boşlukların boyutu, karışım oranı ve kür koşullarına göre değişebilmektedir. 534 kg/$m^3$ yoğunluğa ve 0.22-0.24 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip inorganik köpüğün yapılarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılabileceği belirtilmiştir (Prud'homme ve diğ., 2010).

Jeopolimer esaslı köpük betonların dayanım, ısı iletkenlik katsayısı ve mikroyapı özelikleri üzerinde bileşimin, kür sıcaklığının ve yoğunluğun etkilerini araştırmıştır. Alüminosilikat kaynağı olarak % 100 metakaolin ve % 75 metakaolin + % 25 uçucu kül, aktivatör olarak $Na_2SiO_3$ çözeltisi ve agrega olarak 4.75 mm'den daha küçük tanecik boyuna sahip yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. Köpük betonun içerisinde hava kabarcıkları Al tozu ile üretilmiştir. Numuneler 20 ve 75 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, Al tozunun alkali aktivatör ile reaksiyona girmesiyle

$H_2$ gazı üretilerek boşluklu bir içyapı kazanan malzemenin, köpük beton olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Köpükleştirilen numunelerde yoğunluğun azalmasına bağlı olarak basınç ve eğilmede çekme dayanımı azalmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 1.3-14.5 MPa arasındadır. Metakaolinin % 25 ucuçu külle yer değiştirmesi basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir. 600, 900, 1200 kg/m$^3$ yoğunluğa sahip köpük betonların ısı iletkenlik katsayısı sırasıyla 0.49, 0.62 ve 1.22 W/mK olarak tespit edilmiştir (Aguilar ve diğ., 2010).

Alüminyum tozunun boşluk oluşturucu özelliğinden yararlanılarak % 30-70 poroziteye sahip ve ısı yalıtım malzemesi amacıyla kullanılabilecek metakaolin esaslı jeopolimer köpük geliştirilmiştir. Alkali aktivatör olarak 7.5 M NaOH+$Na_2SiO_3$ veya KOH+$Na_2SiO_3$ kullanılmıştır. Alüminyum tozu miktarının malzeme özelikleri üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, Al tozu oranı alkali çözeltinin ağırlıkça % 5, 10, 15 ve 20'si olmak üzere deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, jeopolimer bağlayıcıda boşluk gelişimi mekanizmasının alkali çözelti ile boşluk oluşturucu ajan arasındaki reaksiyonla ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Boşluk oluşturucu ajan konsantrasyonunun artması, üretilen gaz miktarını arttırmış ve bunun sonucunda toplam porozite ve ortalama boşluk çapı artmıştır. 0.15-0.40 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip olan köpük jeopolimer, köpürtülmemiş jeopolimere (0.60 W/mK) nazaran daha iyi ısıl performans göstermiştir (Kamseu ve diğ., 2012).

Metakaolinin KOH+$K_2SiO_3$ ile aktive edilmesiyle üretilen jeopolimer bağlayıcı silis dumanı ile boşluklu hale getirilmiştir. Üretilen jeopolimer köpük 0.12 W/mK ısı iletkenlik katsayısına, % 85 poroziteye ve 0.40 g/cm$^3$ birim hacim ağırlığa sahip olup ısıl performans açısından olumlu özelikler göstermektedir (Henon ve diğ., 2013).

Uçucu kül, alkali aktivatör (NaOH+$Na_2SiO_3$) ve köpük üretme makinesiyle önceden üretilmiş köpük karışımından oluşan hafif betonun ideal karışım oranı ve kür koşulları araştırmıştır. Puzolan/aktivatör oranı 2/1, aktivatör oranı 2.5 ve köpük/jeopolimer bağlayıcı oranı 1/1, 2/1, 3/1 olarak hazırlanan karışımlar 21 ve 60 °C'de kürlenmiştir. İdeal birim hacim ağırlık (1667 kg/m$^3$), en düşük porozite (% 6.78) ve su emme (% 1.22) ve en yüksek basınç dayanımı (17.60 MPa), puzolan/alkali aktivatör oranı 2/1, $Na_2SiO_3$/NaOH oranı 2.5/1 ve köpük/jeopolimer bağlayıcı oranı 2/1 olan ve 60 °C'de kürlenen numunelerde elde edilmiştir. Bu karışım oranına ait numunenin basınç dayanımının büyük ölçüde 7 gün içinde tamamlanması, jeopolimerleşme reaksiyonunun gelişimini hızlandırmak için ısı kürünün gerekliliğini göstermiştir.

Diğer yandan, ortam koşullarında kürleme, jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimini sağlamak için ısının yetersiz olmasından dolayı daha düşük yoğunluk ve basınç dayanımına neden olmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen malzemenin özelikleri, hafif jeopolimer beton üretimi amacını taşıyan diğer çalışmalar için bir referans kaynak oluşturabilecek niteliktedir (Al Bakrı Abdullah ve diğ., 2014).

Liu ve arkadaşları (2014), yapay puzolan esaslı ve hafif agregalı jeopolimer köpük betonun fiziksel, mekanik ve ısıl özeliklerini araştırmışlardır. % 80 uçucu kül ve % 20 palmiye yağı külü karışımından elde edilen bağlayıcıya, kaba agrega olarak 2.36-9.5 mm tanecik boyuna sahip palmiye ağacı kabuğu ve ince agrega olarak 300 μm-2.36 mm tanecik boyuna sahip ince kum eklenmiştir. Kaba agrega/bağlayıcı oranı 0.6 ve ince agrega/bağlayıcı oranı 1.7'dir. Alkali aktivatör olarak 14 M NaOH+$Na_2SiO_3$ (aktivatör oranı=2.5) çözeltisi kullanılmıştır. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranı kütlece 0.55'tir. Köpükleştirici ajan, köpük üreten makinede üretilerek bağlayıcıya karıştırılmıştır. Numuneler PE kaplanarak 65 °C'de 48 saat kürlenmiştir. Erken dönemden itibaren 28 güne kadar basınç dayanımı gelişiminin çok yüksek olmaması, jeopolimer betonlarında jeopolimerleşme reaksiyonlarının ve dolayısıyla mekanik özeliklerin gelişiminin, kürlemenin ilk 48 saatinde gerçekleştiğini belirlemiştir. 1300 ve 1500 kg/$m^3$ yoğunluğa sahip olan jeopolimer köpük betonların basınç dayanımının sırasıyla 8 ve 13 MPa ve ısı iletkenlik katsayılarının 0.47 ve 0.50 W/mK olması, malzemenin strüktürel ve yalıtım betonu olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Liu ve diğ., 2014).

Uçucu kül esaslı jeopolimer köpüğün özelikleri üzerinde aktivatör oranının ($Na_2SiO_3$/NaOH=1.0, 2.5), aktivatör/puzolan oranının (0.25, 0.30 ve 0.35), Al tozu/puzolan oranının (ağırlıkça % 1.5, 3.0 ve 5.0) etkileri değerlendirilmiştir. Numuneler PE kaplanarak 24 saat ortam koşullarında bekletildikten sonra kalıptan sökülmüş ve 60 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, aktivatör/puzolan oranı 0.35 (yani en yüksek aktivatör oranında) olan numunelerin köpük oluşturma yeteneklerinin en iyi olduğu tespit edilmiştir. Al tozu oranının numunelerin köpük oluşturma yeteneği üzerindeki etkisi araştırıldığında, daha yüksek orandaki Al'un daha fazla köpük oluşturduğu belirlenmiştir. Al tozunun olumlu etkisi, sadece karışımdaki aktivatör sıvı oranı yeterli olduğunda görülmüştür. Yani jeopolimer hamurun başarılı bir köpürme işlemi iki temel etkene bağlıdır: alkali aktivatör miktarı ve Al tozu oranı. Numunelerin basınç dayanımı 0.90-4.35 MPa aralığında olup Al tozu miktarındaki

artış basınç dayanımını azaltmıştır. Basınç dayanımındaki azalışın nedeni, artan Al tozu miktarına bağlı olarak porozitenin artması ve yoğunluğun azalmasıdır. Uçucu kül oranı daha yüksek olan numunelerin basınç dayanımı daha yüksek olup bu durum, betondaki bağlayıcı (portland çimento) miktarının artmasıyla daha yüksek dayanımların elde edildiği sonucuyla örtüşmesi bakımından önemlidir. En yüksek basınç dayanımı (4.35 MPa) aktivatör oranı 2.5, aktivatör/puzolan oranı 0.25 ve Al tozu oranı % 1.5 olan numunelerde tespit edilmiştir (Sanjayan ve diğ., 2015).

Atık dip külünden ısı yalıtım tuğlası üretmek amacıyla çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Dip külü NaOH ile aktive edildikten sonra ağırlıkça % 25-55 oranında $Na_2SiO_3$ köpükleştirici ajan olarak kullanılmış ve mikrodalga kürüne tabi tutulmuştur. Üretilen malzeme 0.075 W/mK ısı iletkenlik, % 72 porozite ve 3.55 MPa basınç dayanımına sahip olmasından ötürü, yapılarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir (Haq ve diğ., 2015).

Uçucu külün SS ile aktive edilmesiyle üretilen jeopolimer bağlayıcı, hidrojen peroksit ($H_2O_2$) ile boşluklu hale getirilmiştir. $H_2O_2$ alüminosilikat kaynağının ağırlıkça % 0.05-0.1'i oranında eklenmiştir. Karışım 55 ve 85 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Boşluk oluşturucu ajan miktarının artmasına bağlı olarak azalan basınç dayanımı, kür sıcaklığının 55 °C'den 85 °C'ye arttırılmasıyla artmıştır. Çalışma sonunda ısı iletkenlik katsayısı, porozite ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 0.07-0.09 W/mK, % 74-81 ve 0.4-1.4 MPa olan jeopolimer köpüğün ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır (Feng ve diğ., 2015).

2/3 metakaolin ve 1/3 atık uçucu kül karışımının 12 M NaOH+$Na_2SiO_3$ karışımıyla aktive edilmesiyle üretilen jeopolimer bağlayıcı $H_2O_2$ ile köpürtülmüştür. Malzeme 40 °C sıcaklık % 65 bağıl nemde 24 saat kürlenmiştir. Çalışmada $H_2O_2$ oranının (ağırlıkça % 0.03, 0.15, 0.30, 0.90, 1.2) jeopolimerin fiziksel, mekanik ve ısıl özeliklerini tayin etmede kullanılan önemli bir etken olduğu belirlenmiştir. $H_2O_2$ oranının % 0.03'ten % 1.20'ye artmasıyla, ısı iletkenlik katsayısı 0.4 W/mK'den 0.1 W/mK'e ve basınç dayanımı yaklaşık 9 MPa'dan 1.5 MPa'a azalmıştır. Isı iletkenlik katsayısı bakımından diğer malzemelerle karşılaştırmalı bir değerlendirme yapıldığında, kütlece % 1.20 oranında köpükleştirici ajan içeren karışımın (0.1 W/mK), mantar pano (0.052-0.70 W/mK) ve mineral yünden (0.032-0.050 W/mK) daha yüksek, köpük beton (0.093-0.16 W/mK) ve genleşmiş kile (0.085-0.160 W/mK) yakın, alçı levha (0.25 W/mK) ve

ahşap lifli levhadan (0.11-0.26 W/mK) daha düşük bir ısı iletkenliğe sahip olduğu belirlenmiştir (Novais ve diğ., 2016a).

Alkali aktive edilmiş cüruftan jeopolimer köpük üretmek amacıyla tek-kısımlı (one-part, sadece su eklenen) jeopolimer üretme yöntemini kullanılmıştır. Tek-kısımlı jeopolimer karışımlar, çimentodakine benzer olarak, sadece suyun eklenmesiyle aktive edilen katı bir karışım olarak tasarlanmaktadır ve jeopolimerlerin ticari olarak kullanımını arttırmak için geliştirilmiştir. Bu çalışmada, yüksek fırın cürufu $NaOH+Na_2SiO_3$ karışımıyla aktive edilmiş ve önceden üretilmiş köpük (sodyum dodesil sülfat çözeltisi) ile boşluklu hale getirilmiştir. Bağlayıcı PE kaplanarak 60 °C'de 24 saat kürlenmiştir. En düşük ısı iletkenlik katsayısının 0.017 W/mK olduğu belirlenmiştir. Malzemenin içerisindeki hava boşluklarının, ısı iletkenlik katsayısının önemli ölçüde düşürerek bloğun içerisinden ısı akışına karşı etkili bir bariyer olarak rol aldığı belirtilmiştir (Hajimohammadi ve diğ., 2017).

Metakaolin esaslı jeopolimerin 2.5 mm çapındaki polistren tanecikleriyle karıştırılmasıyla yeni bir türde ısı yalıtım malzemesi geliştirilen çalışmada, aktivatör olarak $NaOH+Na_2SiO_3$ (aktivatör oranı=8.0) ve köpük oluşturucu ajan olarak $H_2O_2$ kullanılmıştır. Aktivatör/puzolan oranı 0.5'tir. Numuneler 28. güne kadar 20 °C ve % 95 bağıl nemde kürlenmiştir. Polistren/puzolan oranının 0.25'ten 1.0'a artmasıyla yoğunluk 375 kg/m$^3$'ten 100 kg/m$^3$'e ve ısı iletkenlik katsayısı 0.08 W/mK'den 0.03 W/mK'e azalmıştır. Buna paralel olarak, malzemenin basınç dayanımı 4 MPa'dan 3 MPa'a ve eğilmede çekme dayanımı 1.1 MPa'dan 0.6 MPa'a azalmıştır. Bu azalışın nedeni, polistiren taneciklerinin mukavemete sahip olmaması ve yüksek oranda sıkıştırılabilir olması nedeniyle tanecikler ile jeopolimer hamur ara kesitinde mikro çatlaklarının oluşumudur (Duan ve diğ., 2017).

Atık metakaolin, cam ve çelik fabrikası atıkları $NaOH+Na_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla aktive edildikten sonra ağırlıkça % 50 alüminyum tozu atığı ile köpükleştirilerek boşluklu jeopolimer üretilmiştir. Üretilen malzeme 80 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışma sonuçları ısı iletkenlik, porozite ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla 0.14-0.15 W/mK, % 83-86, ve 1.1-2.0 MPa olan yüksek boşluklu jeopolimer malzemelerin bina uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir (Dembovska ve diğ., 2017).

Jeopolimer köpüklerde su ve alüminyum tozu oranının etkisinin araştırıldığı çalışmada, alüminosilikat kaynağı olarak 2/3 metakaolin ve 1/3 atık uçucu kül,

aktivatör olarak 10 M NaOH+$Na_2SiO_3$ ve köpükleştirici ajan olarak Al tozu kullanılmıştır. Köpüğü stabilize etmek için ticari bir stabilize edici ajan kullanılmıştır. Karışım, PE kaplanarak 40 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışmada, köpük oluşumunun Al tozu jeopolimere eklendikten hemen sonra başladığı ve etüvdeki kürlemenin birkaç dakikası boyunca devam ettiği belirtilmiştir. Al tozu miktarının arttırılması ve karışımdaki katı/sıvı oranının azaltılmasıyla daha yüksek porozite değerleri elde edilmiştir. Ayrıca Al tozu ve su oranı boşlukların bağlantılarını etkilemiştir. Daha az Al tozuna sahip olan numunelerde boşluklar genellikle kapalı iken, 0.08 gr (en yüksek) Al tozu miktarına sahip numunelerde açık boşluk morfolojisi görülmüştür. Numunelerin birim hacim ağırlığı 430-850 kg/$m^3$, toplam porozitesi % 74-78 ve su emme oranı % 42-112'dir. Karışımdaki Al tozu oranın oranının artmasıyla birlikte ısı iletkenlik katsayısında görülen % 40'a varan azalma beklenen bir durumdur. En düşük ısı iletkenlik katsayısı (0.078 W/mK), katı/sıvı oranı 0.55 ve Al miktarı 0.08 gr olan numunelerde görülmüştür. Söz konusu ısı iletkenlik katsayısına sahip atık içeren jeopolimer malzemenin, ısı yalıtım uygulamalarında kullanım potansiyelinin olduğu belirtilmiştir (Novais ve diğ., 2018).

Isı yalıtım malzemesi üretmek amacıyla mekanik köpükleştirme yöntemi kullanılarak poroz yapılı bir jeopolimer köpük üretilmiştir. Alüminosilikat kaynağı olarak uçucu kül, aktivatör olarak $Na_2SiO_3$ ve köpükleştirici ajan olarak protein esaslı ticari bir madde kullanılmıştır. Köpükleştirici madde protein, su ve diğer inorganik maddelerden oluşan bir karışımdır ve su ile karıştırılarak ve hızlı mekanik karıştırma sonucunda kullanılmıştır. Karışım 24 saat ortam koşullarında nemini buharlaşmayla kaybetmesi için bekletilmiştir. Daha sonra kalıplar sökülmüş ve numuneler 45, 55 ve 60 °C sıcaklık ve % 95 bağıl nemde 24 saat kürlenmiştir. Karışımdaki köpükleştirici ajan miktarının artmasına bağlı olarak birim hacim ağırlığın azaldığı ve porozitenin arttığı tespit edilmiştir. Bağlayıcının köpükleşme kapasitesinin direkt olarak köpük miktarı tarafından belirlendiği tespit edilmiştir. Köpük miktarı arttığında, tanecikler arasındaki boşluklar daha büyük hale gelerek yoğunluğu ve basınç dayanımını azaltmış ve poroziteyi arttırmıştır. 0.0682 W/mK ısı iletkenlik katsayısı ve 0.51 MPa basınç dayanımı, inorganik ısı yalıtım malzemelerinin gereksinimlerini karşılaması bakımından önemlidir (Huang ve diğ., 2018).

Jeopolimer köpük üretiminde agrega olarak ince kum yerine cam tozu kullanma olanakları değerlendirilmiştir. Çalışmada, agregasız jeopolimer köpük kontrol

numunesi olarak hazırlanırken, atık ince cam tozunun (18 μm) ve ince kumun (250 μm) agrega olarak kullanıldığı iki farklı jeopolimer köpük üretilmiştir. Agregasız jeopolimer hamur ağırlıkça % 55.4 uçucu kül + % 36.8 yüksek fırın cürufu + % 7.8 katı SS'tan üretilmiştir. Bu bağlayıcıya aktivatör olarak katı SS eklenmesinin nedeni, çimentodakine benzer olarak, tek bileşenli (sadece su eklenen) karışım elde ederek jeopolimerlerin ticari olarak kullanımını kolaylaştırmaktır. Daha sonra karışıma, jeopolimer bağlayıcı kütlece % 70 olacak şekilde, kütlece % 30 kum ya da cam tozu agregası eklenmiştir. Taze haldeki jeopolimer hamurlar, köpük oluşturucu makinede önceden hazırlanan köpükle, yani mekanik köpürtme tekniğiyle, 1200, 1000, 800 and 600 kg/$m^3$ yoğunluk elde etmek için gereken miktarda karıştırılmıştır. Çalışma sonucunda, hafif jeopolimer köpük üretiminde, kum agrega yerine, ince cam agreganın kullanılabileceği, zaman içerisinde cam tozu taneciklerinin jeopolimer hamur ile reaksiyona girerek daha güçlü yapıya sahip malzeme üretildiği, 600 kg/$m^3$ yoğunlukta ve 0.15 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip cam agregalı karışımın ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir (Hajimohammadi ve diğ., 2018a).

Metakaolinin KOH+$K_2SiO_3$ ile aktive edilmesiyle üretilen jeopolimer bağlayıcı % 5-20 oranında $H_2O_2$ ile boşluklu hale getirilmiştir. Bağlayıcının içerisindeki köpüklerin stabilitesini sağlamak amacıyla stabilize edici ajan olarak bitkisel yağ katkısı kullanılmıştır. Numuneler 75 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, stabilize edici ajan kullanımına bağlı olarak daha homojen dağılmış bir boşluklu içyapıya sahip malzeme üretilmiştir. $H_2O_2$ miktarına bağlı olarak, 0.11-0.17 W/mK ısı iletkenlik, % 60.2-83.1 porozite ve 0.3-11.6 MPa basınç dayanımına sahip bir jeopolimer köpük üretmenin mümkün olduğu belirlenmiştir (Bai ve diğ., 2018).

Atık camın KOH+$K_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla aktive edilmesi ve ağırlıkça % 5 $H_2O_2$ ile köpürtülmesiyle üretilen bağlayıcıya ağırlıkça % 5 oranında Triton X-100 stabilite edici ajanı eklenmiştir. Üretilen numuneler 75 °C'de 7 gün boyunca kürlenmiştir. Numuneler 0.21 W/mK ısı iletkenliğe, % 55 poroziteye ve 7.3 MPa basınç dayanımına sahiptir. Daha sonra bu numuneler 700-900 °C sıcaklıkta 2 saat pişirilerek cam köpüğü üretilmiştir. Cam köpüğü üretilme işlemi numunelerde ikincil bir köpürmeye neden olmuştur. Böylece üretilen malzeme 0.11-0.15 W/mK ısı iletkenliğe, % 77-88 poroziteye ve 1.2-5.5 MPa basınç dayanımına sahip olmuştur (Bai ve diğ., 2019).

NaOH+$Na_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla aktive edilen uçucu kül esaslı jeopolimer köpüğün boşluk yapısı gelişimi ve mekanik özelikleri üzerinde farklı boşluk

oluşturucu ajan türlerinin (Al tozu ve $H_2O_2$) etkisi araştırılmıştır. Alkali aktivatör/puzolan oranı ağırlıkça 0.50 olarak sabit tutulmuştur. Bağlayıcının ağırlıkça % 0.07, 0.13 ve 0.20'si oranında Al tozu ve % 0.5, 1.0, 1.5 ve 2.0'si oranında $H_2O_2$ eklenerek köpük oluşturucu ajan oranındaki değişimin etkileri araştırılmıştır. Numuneler 70 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Al tozu oranının ağırlıkça % 0.07'den % 0.2'ye arttırılmasıyla, numunelerin birim hacim ağırlığı 0.74 g/cm$^3$'ten 0.64 g/cm$^3$'e azalırken basınç dayanımı 4.3 MPa'dan 3.3 MPa'a azalmıştır. $H_2O_2$ oranının ağırlıkça % 0.5'ten % 2.0'ye arttırılmasıyla numunelerin birim hacim ağırlığı 1.00 g/cm$^3$'ten 0.61 g/cm$^3$'e azalırken basınç dayanımı 9.3 MPa'dan 2.9 MPa'a azalmıştır. Her iki boşluk oluşturucu ajana sahip numunelerin boşlukları numune içerisinde homojen olarak dağılmıştır. Boşluk oluşturucu ajan miktarının artmasına bağlı olarak porozite artmış, boşluklar birbirleriyle daha fazla bağlantılı hale gelmiş, boşluk çapı artmış ve boşluk sayısı azalmıştır. Al tozu ile köpürtülen numunelerde porozite daha yüksek ve boşluklar daha geniştir (Ducman ve Korat, 2016).

Pirinç kabuğu + metakaolin, NaOH+$Na_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla aktive edilmiş ve $H_2O_2$ ile köpürtülmüştür. Karışımın aktivatör oranı 7.28 olarak sabit tutulmuştur. Numuneler 25 °C'de 24 saat ön kürlemenin ardından 70 °C'de 48 saat kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, 174-813 kg/m$^3$ birim hacim ağırlığa, % 28.3-93.6 su emme oranına, 0.26-7.24 MPa basınç dayanımına ve 0.082-0.184 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip malzemenin binalarda ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği vurgulanmıştır (Wang ve diğ., 2020).

Metakaolin ve uçucu kül esaslı (metakaolin/uçucu kül ağırlıkça 2.0) ve NaOH+$Na_2SiO_3$ aktivatör karışımıyla aktive edilmiş jeopolimer köpüğün özelikleri üzerinde köpürtücü ajan ($H_2O_2$)/puzolan oranı (0.01 ve 0.02), NaOH molaritesi (8, 10 ve 12 M) ve su/puzolan oranının (0.16 ve 0.32) etkileri değerlendirilmiştir. Karışımın aktivatör oranı 2.28 ve toplam aktivatör/puzolan oranı 1.27 olarak sabit tutulmuştur. Numuneler 40 °C ve % 65 bağıl nemde 24 saat kürlenmiştir. Jeopolimerleşme reaksiyonlarının hızının yalnızca alkali konsantrasyonuna bağlı olmadığı, aynı zamanda karışımın sıvı/katı oranından da etkilendiği tespit edilmiştir. Alkali konsantrasyonu yüksek ve sıvı/katı oranı düşük olan numunelerde jeopolimerleşmenin daha hızlı ve daha yüksek oranda gerçekleştiği vurgulanmıştır. Düşük NaOH molaritesine sahip numunelerde daha düşük basınç dayanımı tespit edilmiştir. En düşük birim hacim ağırlık (440 kg/m$^3$) ve ısı iletkenlik katsayısı (0.08 W/mK), 8 M

NaOH konsantrasyonuna sahip ve su/puzolan oranı 0.32 ve $H_2O_2$/puzolan oranı 0.02 olan numunelerde tespit edilmiştir. Söz konusu jeopolimer köpüğün binaların ısı yalıtımında kullanılabileceği öne sürülmüştür (Novais ve diğ., 2016b).

Uçucu külün ağırlıkça % 2, 4, 5 ve 7 oranında $H_2O_2$ ile köpürtülmesiyle üretilen jeopolimer köpüğün özelikleri üzerinde $H_2O_2$ oranının etkileri değerlendirilmiştir. Alkali aktivatör olarak 14 M NaOH ve $Na_2SiO_3$ karışımı (aktivatör oranı=2.5) kullanılmıştır. Numuneler 75 °C'de 24 saat kürlendikten sonra ortam koşullarında 28. güne kadar bekletilmiştir. Çalışma sonucunda, % 2 $H_2O_2$ içeren numunelerin yoğunluğu 0.64 g/cm$^3$, ısı iletkenlik katsayısı 0.12 W/mK ve basınç dayanımı 3.4 MPa iken, $H_2O_2$ oranının % 7'ye kadar arttırılmasıyla yoğunluk 0.40 g/cm$^3$, ısı iletkenlik katsayısı 0.09 W/mK ve basınç dayanımı 1.9 MPa'a kadar azalmıştır. Daha fazla miktarda eklenen boşluk oluşturucu ajan, malzemenin yoğunluğunu ve dolayısıyla basınç dayanımını azaltmıştır. Görsel analizler, malzemedeki boşluk dağılımının homojen olduğunu ve kapalı gözenek yapısına sahip olduğunu göstermektedir. Söz konusu malzemenin, yapılarda ısı yalıtımı amacıyla kullanılabilmesinin olanaklı olduğu ileri sürülmüştür (Łach ve diğ., 2016).

Alüminosilikat kaynağı olarak metakaolin ve uçucu kül karışımı, aktivatör olarak NaOH+$Na_2SiO_3$ (aktivatör oranı=4.63), köpük oluşturucu ajan olarak $H_2O_2$ ve hafif agrega olarak 2-4 mm boyutundaki EPS'den üretilen jeopolimer betonun özelikleri üzerinde, metakaolin/metakaolin+uçucu kül (ağırlıkça 0.1-0.5), $H_2O_2$ oranının ($H_2O_2$/alüminosilikat=0.0075, 0.015, 0.030) ve EPS oranının (EPS/alüminosilikat=0.023, 0.045, 0.067) etkileri değerlendirilmiştir. Hazırlanan numuneler 28 gün boyunca ortam koşullarında kürlenmiştir. Uçucu küle metakaolin eklemek, matrisin boşluk çapının ve toplam boşluk miktarının azalmasını sağlayarak malzemenin içyapısını geliştirmiş ve böylece mekanik özeliklerin artmasına neden olmuştur. EPS ve $H_2O_2$ miktarının artmasına bağlı olarak, numunelerin yoğunluğu ve basınç dayanımı azalmıştır. Ancak $H_2O_2$ oranının çok arttırılması, numunelerdeki boşlukların birbirleriyle birleşerek boşluk çapının artmasını beraberinde getirmiştir. Çalışma sonucunda, yoğunluğu 0.3-0.65 g/cm$^3$, ısı iletkenlik katsayısı 0.122-0.195 W/mK ve basınç dayanımı 2.0-5.5 MPa olan hafif jeopolimer betonun binaların dış duvarlarında yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceği ileri sürülmüştür (Shi ve diğ., 2020).

Metakaolinin fosforik asit ($H_3PO_4$) ile aktive edilmesiyle hazırlanan jeopolimer, diğer çalışmalarda kullanılan geleneksel boşluk oluşturucu ajanların aksine, kireçtaşı tozu kullanılarak boşluklu hale getirilmiştir. Boşluk oluşturucu ajan miktarının etkilerini değerlendirmek amacıyla kireçtaşı tozu ağılıkça % 1, 2, 3, 4 ve 5 oranında metakaolin ile yer değiştirmiştir. Numuneler 50 °C'de 3 saat kurutulduktan sonra 90 °C'de 21 saat kürlenmiştir. Çalışmada, fosforik asitin metakaolin esaslı jeopolimer üretimi için ideal bir aktivatör türü olduğu belirtilmiştir. Köpürtücü ajan kullanılmayan numunelerin ısı iletkenlik katsayısı 0.211 W/mK ve 7 günlük basınç dayanımı yaklaşık 5 MPa iken, % 5 eklenen kireçtaşı tozunun numuneyi boşluklu hale getirmesiyle ısı iletkenlik katsayısı 0.133 W/mK'e ve basınç dayanımı 3 MPa'a azalmıştır (Morsy ve diğ., 2019).

Metakaolin esaslı jeopolimer bağlayıcı, önceden köpürtülmüş bentonit ile boşluklu hale getirilmiştir. Alkali aktivatör olarak NaOH ve $Na_2SiO_3$ karışımı kullanılmıştır. Jeopolimer bağlayıcıya hacimce % 20-60 oranında eklenen köpük oluşturucu ajan katkısının etkileri değerlendirilmiştir. Numuneler, 24 saat PE kaplı halde ortam koşullarında bekletildikten sonra kalıplarından sökülerek 20 °C sıcaklık ve % 90 bağıl nemli ortam koşullarında 3, 7, 28 ve 56 gün kürlenmiştir. Bentonit köpük katkısının % 0'dan % 60'a kadar arttırılmasıyla toplam boşluk hacmi 0.035 mL/g'dan 0.626 mL/g'a artarken birim hacim ağırlık 1.45 g/cm$^3$'ten 0.76 g/cm$^3$'e ve basınç dayanımı 50.9 MPa'dan 1.0 MPa'a azalmıştır. Porozitedeki artıştan beklenildiği üzere, malzemenin ısı iltkenlik katsayısı 0.364 W/mK'den 0.104 W/mK'e azalmıştır (Yang ve diğ., 2020).

İnce öğütülmüş perlitin NaOH ile aktive edilmesi ve ağırlıkça % 0.5-3.0 $H_2O_2$ ile boşluklu hale getirilmesiyle üretilen jeopolimer köpük, 65 °C'de 24 saat kürlenmiştir. $H_2O_2$ oranının % 0.5'ten % 3.0'e artmasına bağlı olarak porozite artarken, yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayısı azalmıştır. 0.03-0.06 W/mK ısı iletkenliğe, % 74-89 poroziteye ve 0.2-0.8 MPa basınç dayanımına sahip olan malzemenin, binalarda ısı yalıtım malzemesi amacıyla kullanılabilmesi umut vaat etmektedir. Ayrıca, söz konusu jeopolimer köpüğün A1 yangın dayanımı sınıfında olması ve maksimum uygulama sıcaklığının 700 °C kadar yüksek olması, diğer organik ve inorganik ısı yalıtım malzemeleriyle kıyaslandığında üstünlük göstermektedir (Vaou ve Panias, 2010).

Alüminosilikat kaynağı olarak kullanılan Pakistan doğal toprağının 14 M NaOH+$Na_2SiO_3$ ile aktive edilmesiyle üretilen jeopolimer bağlayıcı ağırlıkça % 2 $H_2O_2$ ile boşluklu hale getirilmiştir. Alkali aktivatör/bağlayıcı oranının (30/70, 28/72,

26/74, 24/76, 22/78) malzemenin özelikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Malzeme 60 °C'de 24 saat kürlenmiştir. Çalışmada elde edilen en düşük ısıl iletkenlik (0.267 W/mK), en yüksek porozite (% 63.1) ve basınç dayanımı (2.41 MPa), 30/70 aktivatör/bağlayıcıdan üretilen numunelere aittir. Bağlayıcı madde oranının artmasına bağlı olarak porozite azalmış, ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı artmıştır (Zaidi ve diğ., 2017).

Yapılan literatür araştırmasına istinaden jeopolimer bağlayıcıların fiziksel, mekanik ve ısıl özeliklerinin gelişimi üzerinde alkali aktivatör türünün, alkali hidroksit konsantrasyonunun, aktivatör oranının, toplam alkali aktivatör/puzolan oranının ve kür sıcaklığı ve kürleme sırasındaki nemliliğin önemli etkileri bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, hafif jeopolimer (köpük) malzemenin özeliklerinin gelişiminde yukarıda sözü edilen değişkenlere ek olarak dolgu maddesi miktarının ve köpürtücü ajan/puzolan oranının etkileri de göz önünde bulundurulması gereken kriterlerdir. Bu bağlamda, bu doktora çalışmasında doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi üretimine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilirken, söz konusu etkenlerin etkinliği ayrı ayrı araştırılmakta ve elde edilen sonuçlar neticesinde ideal karışım oranları ve üretim koşulları altında monolitik duvar malzemesi üretilmeye çalışılmaktadır.

# 3. DOĞAL PUZOLAN ESASLI HAFİF JEOPOLİMER DUVAR MALZEMESİ

Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üç ana aşamadan oluşmaktadır:

- Birinci aşama, hedeflenen doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanını tasarlamak amacıyla bağlayıcı cinsi, karışım oranı ve kür koşullarının saptanmasından oluşmaktadır. Datça Puzolanı'nın alüminosilikat kaynağı olarak kullanılması ve 'jeopolimer bağlayıcı' oluşturacak şekilde alkali kimyasallarla aktive edilmesi koşullarını araştırmak hedeflenmektedir. Birinci aşamadaki deneysel çalışma kendi içerisinde dört alt aşamadan oluşmaktadır ve bu aşamalarda monolitik bölücü duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanının fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde ideal alkali aktivatör türü; sıcaklık kürü koşulları; alkali hidroksit konsantrasyonu ve aktivatör oranı; toplam aktivatör / puzolan oranının etkileri tespit edilmektedir.

- İkinci aşamada hedeflenen doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesinin ısıl performansa sahip çekirdek katmanını tasarlamak amaçlanmaktadır. Yüksek ısıl performans sağlamak amacıyla, birinci aşamada ideal karışım oranları ve kür koşulları belirlenmiş olan bağlayıcının içerisinde kimyasal yöntemle köpük oluşturulmaktadır. Köpükleştirici ajan olarak Al tozu kullanılmakta ve köpürtülmemiş numune referans olarak kabul edilmektedir. Köpükleştirici ajan oranının çekirdek katmanının fiziksel, mekanik ve ısıl performansı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Bu aşamanın sonunda gövde malzemesinin üretim olanaklarının değerlendirilmesi tamamlanmış olmaktadır.

- Çalışmanın son aşamasında, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıdan üretilen, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri belirlenen iç/dış koruyucu ve çekirdek katmanlarının, ülkemizin TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği ile belirlenmiş beş iklim bölgesi için dış duvar malzemesi olarak kullanım olanakları belirlenmektedir. Her bir iklim bölgesi için çeşitli kalınlıklarda oluşturulan kesitlerin gereken ısıl direnci sağlayıp sağlayamadığı ve kesit içinde yoğuşma oluşup oluşmadığı

İzoder TS 825 Hesap Programı ile denetlenerek, ortaya çıkan sonuçlar çizelgeler halinde verilmektedir. Sonuç olarak, üretilen monolitik duvar malzemesinin yapı sektöründeki yeri belirlenmeye çalışılmaktadır.

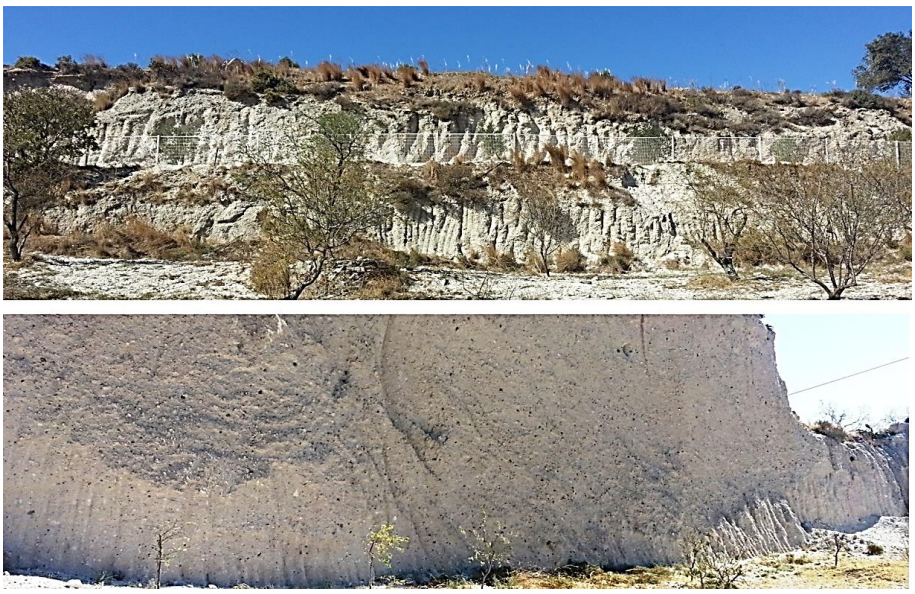
## 3.1 Kullanılan Malzemeler

### 3.1.1 Puzolan

Datça Yarımadası'nda Knidos Antik Kenti ile kentin doğusundaki Çeşmeköy, Yazıköy ve Cumalı olarak adlandırılan bölge, volkanik tüf bakımından zengin bir toprağa sahiptir (Şekil 3.1). Söz konusu toprak, bölge halkı tarafından "aktoprak" ya da "akkum" olarak adlandırılmakta (Şekil 3.2) ve bağlayıcılık özeliğine sahip olduğu bilinmektedir (Akgül ve Tanaçan, 2010).




**Şekil 3.1 :** Datça Puzolanı'nın alındığı bölgenin haritası.



**Şekil 3.2 :** Datça Puzolanı'nın alındığı alan.

Datça'dan İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'na getirilen toprak, bünyesinde bulundurduğu nemi atması için, Memmert Marka havalandırmalı etüvde 70 ºC'de kurutulmuştur (Şekil 3.3a). Daha sonra bilyalı değirmende öğütülen toprak (Şekil 3.3b), 90 µm elekten elenmiş ve PE kaplanarak muhafaza edilmiştir.



**Şekil 3.3 :** (a) Datça Puzolanı'nın etüvde kurutulması; (b) Datça Puzolanı'nın bilyalı değirmende öğütülmesi.

- **Puzolanın özgül kütlesinin hesaplanması:**

Deneyde kullanılan Datça Puzolanı'nın özgül kütlesini belirlemek için Bölüm 3.2.3.1'de açıklanan deney yöntemi uygulanmış ve toprağın özgül kütlesi 2.52 gr/cm³ olarak tespit edilmiştir.

- **Puzolanın özgül yüzey alanının tespit edilmesi:**

Doğal puzolanların özgül yüzey alanı en az 4000 cm²/gr ± % 25 olmalıdır (TS 25, 2008). Çimentonun özgül yüzey alanının belirlenmesi için TS EN 196-6 (2010)'da belirtilen yöntemlerden biri hava geçirgenlik (blaine) yöntemidir. Blaine yönteminde çimentonun özgül yüzeyi, belirlenmiş boyutlarda ve porozitedeki bir çimento yatağının içinden sabit miktarda bir havanın geçtiği sürenin gözlenmesiyle ölçülür. Blaine cihazı, geçirgenlik hücresi, delikli disk, manometre ve pistondan oluşur. Bu yöntem bir mukayese yöntemi olup ölçüm için özgül yüzeyi bilinen bir referans numunesi kullanılır.

Deney sırasıyla; numune hacminin ve miktarının belirlenmesi, akış süresinin saptanması, cihazın (K) sabit değerinin hesaplanması ve son olarak da özgül yüzey alanının hesaplanması aşamalarından oluşmaktadır. Datça Puzolanı'nın özgül yüzey alanı, Akçansa Büyükçekmece Fabrikası Fizik Laboratuvarı'nda blaine aleti ile ölçülmüştür (Şekil 3.4).



**Şekil 3.4 :** Blaine aleti.

Numune hacminin belirlenmesi:

Çimento ve mamul malzemenin hacmi aşağıdaki denklemle (3.1) ifade edilmektedir (TS EN 196-6, 2010):

$$V = (m_2 - m_3) / \rho_{Hg} \quad (3.1)$$

V : Numune hacmi, ($cm^3$)

$m_2$ : Çimento yokken tartılan civa kütlesi, (gr)

$m_3$ : Çimento varken tartılan civa kütlesi, (gr)

$\rho_{Hg}$ : Civanın deney sıcaklığındaki birim hacim ağırlığı ($gr/cm^3$)

$m_2$ = 107.624 gr

$m_3$(puzolan) = 73.368 gr

$m_3$(çimento) = 76.624 gr

$V_ç$ = (107.624-76.624) / 13.54 = 2.29 $cm^3$

$V_p$ = (107.624-73.368) / 13.54 = 2.53 $cm^3$

Numune miktarının belirlenmesi:

Kullanılacak numune miktarı aşağıdaki denklemle (3.2) ifade edilmektedir (TS EN 196-6, 2010):

$$m = \rho.V.(1-e) \quad (3.2)$$

m : Alınacak numune kütlesi, (gr)

ρ : Numunenin birim hacim ağırlığı, (gr/cm³)

V : Tayin edilen numune hacmi, (cm³)

e : Gözeneklilik (0.5)

Deneyde kullanılan referans çimentonun yoğunluğu=3.35 gr/cm³

Puzolanın özgül kütlesi=2.52 gr/cm³

$m_ç$ = 3.35 x 2.29 x (1-0.5) = 3.83 gr

$m_p$ = 2.52 x 2.53 x (1-0.5) = 3.18 gr

Akış süresinin saptanması:

Akış süresi her iki numune için ölçülerek elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Ortalama akış süresi t=57 sn alındı.

Blaine aletinin $K_b$ sabit değerinin belirlenmesi:

Blaine aletinin sabit değeri; referans çimentonun özgül yüzeyine, yoğunluğuna, ölçüm yapılan süreye ve ölçüm sıcaklığındaki hava viskozitesine bağlı bir büyüklüktür. Bu değer, aşağıdaki denklemle (3.3) ifade edilmektedir (TS EN 196-6, 2010):

$$K_b = [S_o \times \rho_o \times (1-e) \times (10.\eta)^{1/2}] / [(e)^{1/3} \times (t_o)^{1/2}] \quad (3.3)$$

$K_b$ : Alet sabiti

$S_o$ : Referans çimentonun özgül yüzeyi, (cm²/gr – deneyde kullanılan referans çimento için $S_o$:3970 cm²/gr)

$\rho_o$ : Referans çimentonun birim hacim ağırlığı, (gr/cm³)

e : Gözeneklilik (0.5)

η: Deney sıcaklığında hava viskozitesi (TS EN 196-6, 2010)

$t_o$ : Akış süresinin ortalaması, (sn)

$K_b$ = [3970 x 3.35 x (1-0.5) x 0.01352] / [0.354 x 7.54] = 33.69 olarak hesaplanmıştır.

Bütün verileri elde edilen puzolanın özgül yüzey alanı TS EN 196-6'da belirtilen aşağıdaki denklemle (3.4) ifade edilmektedir (TS EN 196-6, 2010):

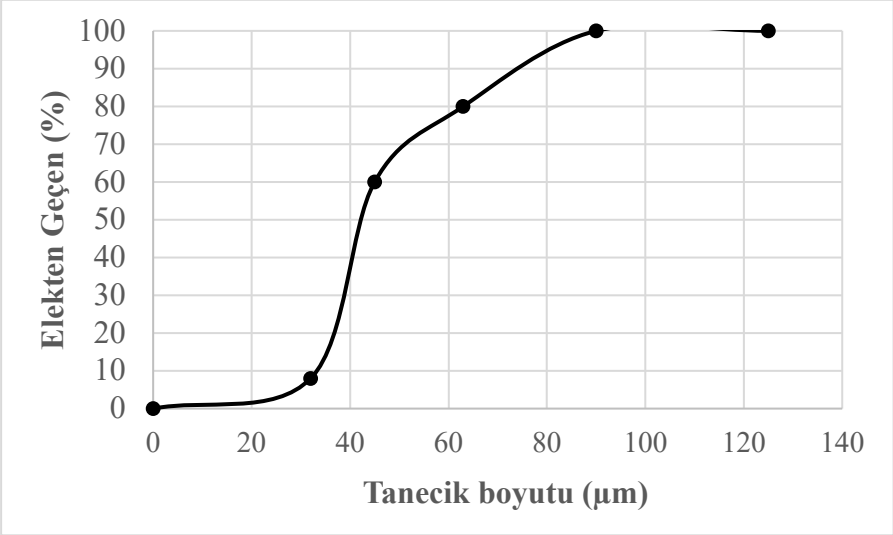
$$S = [K_b \times (e)^{1/3} \times (t_o)^{1/2}] / [\rho \times (1-e) \times (10.\eta)^{1/2}] \quad (3.4)$$

$S = (33.69 \times 0.354 \times 7.54) / [2.52 \times (1-0.5) \times 0.01352] = 5278.717$ cm²/gr

Puzolanın özgül yüzey alanı 5278.717 cm²/gr olarak hesaplanmıştır ve TS 25'te belirtilen gereksinimden (4000 cm²/gr ± % 25) büyüktür.

- **Puzolanın tanecik boyutu dağılımının tespit edilmesi:**

Datça Puzolanı'nın tanecik boyutu dağılımını belirlemek amacıyla 125, 90, 63, 45 ve 32 µm göz açıklığına sahip elekler kullanılmıştır. 125 µm göz açıklığındaki elek en üstte ve 32 µm göz açıklığındaki elek en altta olacak şekilde elekler sıralanmıştır. 70 °C etüvde kurutulmuş 100 gr Datça Puzolanı elek üzerine konulmuş ve elek dizisinin üzeri kapatılarak15 dakika elenmiştir. Sırasıyla bütün eleklerden geçen malzeme miktarı kayıt edilmiştir. Her iki tartım arasındaki fark 0.1'den daha az oluncaya kadar elemeye devam edilmiştir. Datça Puzolanı'nın tanecik boyutu dağılımı Şekil 3.5'te verilmiştir.




**Şekil 3.5 :** Datça Puzolanı'nın tanecik boyutu dağılımı.

- **Puzolanın kimyasal özeliği ve minerolojik analizi:**

Datça Puzolanı ve TS 25 (2008) uyarınca gerçekleştirilen puzolanik aktivite deneyi için üretilen kireç-puzolan harcının yarı kantitatif element (X-ray floresan spektometre-XRF) analizi, Philips 71 PW-2404 model XRF ekipmanı kullanılarak belirlenmiştir. Datça Puzolanı'nın $SiO_2$+$Al_2O_3$+$Fe_2O_3$ bileşenlerinin toplamı (% 92.26) % 70'den daha yüksek ve $SO_3$ ve Cl bileşenleri (sırasıyla % 0.1 ve % 0.092) %

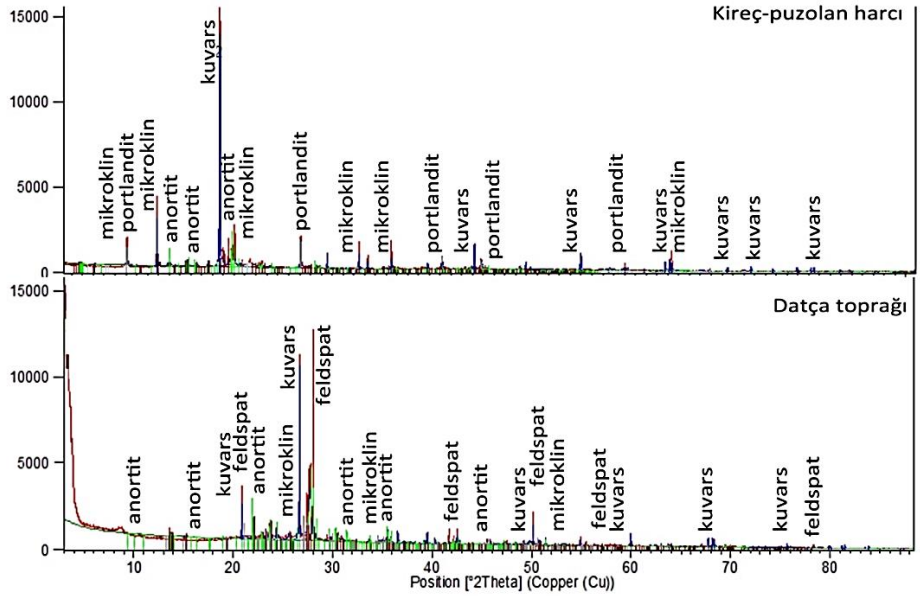
3.0 ve % 0.1'den daha düşük olmasından dolayı söz konusu toprak, çimento ve diğer bağlayıcı türlerinin içerisinde kullanılabilecek bir doğal puzolan olma kriterini taşımaktadır (Çizelge 3.1) (TS 25, 2008). Ayrıca puzolanik aktivite deneyindeki eğilmede çekme ve basınç dayanımı değerleri (sırasıyla 1.43 and 6.12 MPa), TS 25'te belirtilen minimum gereksinmeleri karşılamaktadır.

**Çizelge 3.1 :** Datça Puzolanı, sönmüş kireç ve kireç-puzolan harcının kimyasal bileşimi.

| Bileşen | Sönmüş kireç (%) | Datça Puzolanı (%) | Kireç-puzolan harcı |
|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | - | 75.289 | 58.934 |
| $Al_2O_3$ | - | 15.991 | 11.510 |
| $Fe_2O_3$ | - | 0.984 | 0.829 |
| $Na_2O$ | - | 2.211 | 1.361 |
| $K_2O$ | - | 3.026 | 2.408 |
| CaO | 85 | 1.222 | 21.377 |
| $CO_2$ | 5 | - | - |
| MgO | 1.5 | 0.622 | 2.870 |
| $P_2O_5$ | - | 0.072 | 0.077 |
| $TiO_2$ | - | 0.149 | 0.148 |
| $MnO_2$ | - | 0.047 | 0.050 |
| $Cr_2O_3$ | - | 0.005 | - |
| NiO | - | 0.004 | 0.005 |
| CuO | - | 0.002 | - |
| ZnO | 2.23 | 0.002 | 0.006 |
| Rb | - | 0.006 | 0.007 |
| SrO | - | 0.015 | 0.019 |
| $V_2O_5$ | - | - | 0.022 |
| $Y_2O_3$ | - | 0.002 | 0.006 |
| $ZrO_2$ | - | 0.010 | 0.015 |
| $Nb_2O_5$ | - | 0.001 | 0.008 |
| BaO | - | 0.097 | 0.075 |
| Cl | - | 0.092 | 0.078 |
| $SO_3$ | 0.8 | 0.1 | 0.194 |
| PbO | - | - | - |
| $ThO_2$ | - | - | - |
| LOI | - | 0.15 | - |
| Toplam | 93.8 | 100.00 | - |

Datça Puzolanı ve TS 25 (2008) uyarınca gerçekleştirilen puzolanik aktivite deneyi için üretilen kireç-puzolan harcının kalitatif faz (XRD) analizi, Shimadzu XRD-6000 model XRD Cu X-ışını tüpü (1.5405 Angstrom) ekipmanı kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre, Datça Puzolanı'nda kuvars, anortit, feldspat ve mikroklin bileşikleri,

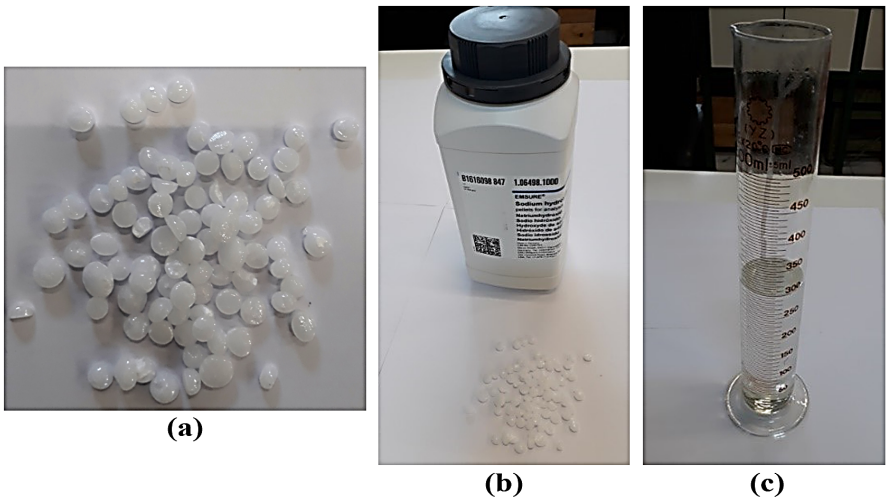
üretilen kireç-puzolan harcında ise kuvars, anortit, portlandit ve mikroklin gibi amorf yapı gösteren bileşiklerin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.6).




**Şekil 3.6 :** Datça Puzolanı ve kireç-puzolan harcının XRD analizi.

### 3.1.2 Alkali Aktivatörler

Sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat ($Na_2SiO_3$=SS) Balmumcu LTD.'den temin edilmiştir (Şekil 3.7).



**(a)** **(b)** **(c)**

**Şekil 3.7 :** (a) Sodyum hidroksit (NaOH); (b) Potasyum hidroksit (KOH); (c) Sodyum silikat ($Na_2SiO_3$) kimyasalları.

% 99 saflığa sahip olan NaOH ve KOH çözeltileri karışım içerisinde kullanılmadan 24 saat önce deiyonize suda çözülerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. NaOH ve KOH katılarının çözelti içerisindeki miktarı Molar konsantrasyon (M) ile ifade edilmektedir. NaOH ve KOH katılarının moleküler ağırlıkları sırasıyla 40 ve 56.1'dir. Söz konusu

çözeltiler hazırlanırken, 1 litre çözeltinin içerisine eklenmesi gereken NaOH ya da KOH katı madde miktarı molar konsantrasyonun NaOH ya da KOH katısının moleküler ağırlığıyla çarpılmasıyla hesaplanmıştır. Örneğin 7.5 M NaOH çözeltisi hazırlamak için 7.5x40= 300 gram NaOH katısı ya da 7.5 M KOH çözeltisi hazırlamak için 7.5x56.1= 420.7 gram KOH katısı kullanılmıştır.

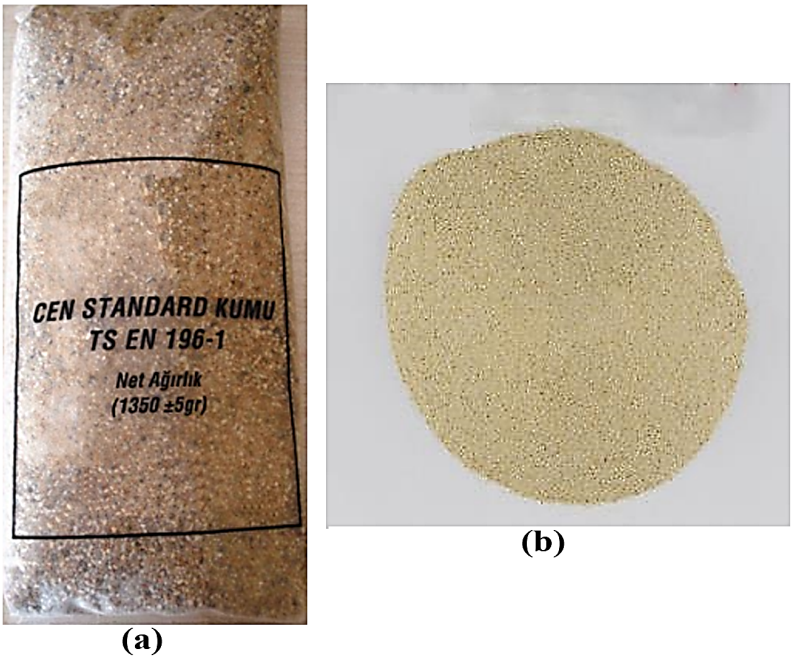
Sıvı halde temin edilen SS çözeltisinin molar oranı ($SiO_2/Na_2O$) 3.4 olup özelikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2 :** Sodyum silikatın (SS) özelikleri.

| Özelik | Değer |
|---|---|
| % $Na_2O$ | 7.5 |
| % $SiO_2$ | 25.5 |
| 20°C'deki yoğunluk | 1.296 g/ml |
| Fe | ≤50 ppm |
| Ağır metaller (Pb gibi) | ≤50 ppm |

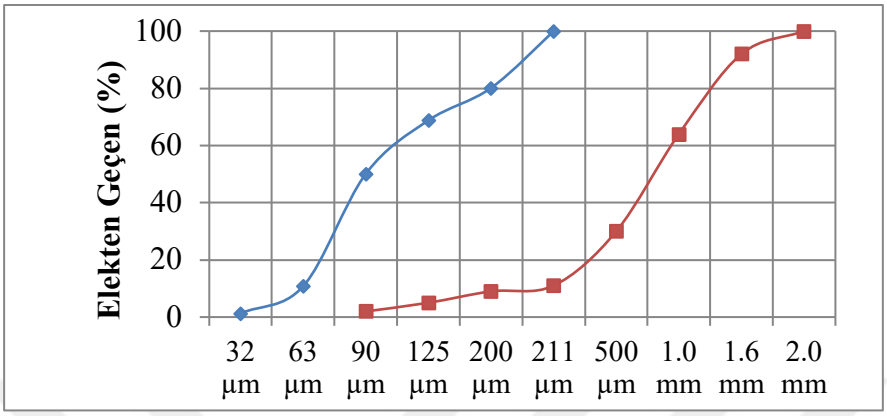
### 3.1.3 Dolgu maddeleri

Tasarlanan monolitik duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanının üretilebilmesi için "jeopolimer harç" elde edilmelidir. Bundan dolayı, Datça Puzolanı ve alkali aktivatörden oluşan bağlayıcı içerisine TS EN 196-1 (2009)'e uygun standart CEN kumu eklenmiştir. Standart kum, 1350 gr' lık poşetler halinde (Şekil 3.8a) Akçansa Çimento Fabrikası'ndan temin edilmiştir.




**Şekil 3.8 :** (a) CEN standart kumu; (b) İnce öğütülmüş silis kumu.

Tasarlanan monolitik duvar malzemesinin boşluklu çekirdek (jeopolimer köpük) katmanının üretilebilmesi için bağlayıcı içerisine Ytong Sanayi A.Ş'den temin edilen ince silis kumu eklenmiştir (Şekil 3.8b). Standart ve ince kumun tanecik boyutu dağılımları Şekil 3.9'da verilmiştir.




**Şekil 3.9 :** Standart ve ince kumun tanecik boyutu dağılımı.

### 3.1.4 Köpük oluşturucu ajan

Datça Puzolanı ve alkali aktivatör karışımından hazırlanan bağlayıcıdan boşluklu yapıya sahip bir jeopolimer köpük malzemesi üretimi için gereken Alüminyum (Al) tozu, Ytong Sanayi A.Ş.'den temin edilmiş olup % 99 saflıkta ve en büyük tanecik boyutu 50 µm'dir (Şekil 3.10).



**Şekil 3.10 :** Deneylerde kullanılan alüminyum tozu (Al).

## 3.2 Deneysel Yöntem

### 3.2.1 Doğal puzolan esaslı jeopolimer bağlayıcı üretimi

Monolitik duvar malzemesinin iç ve dış koruyucu katmanını üretebilmek amacıyla, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının ve bu bağlayıcıdan üretilmiş harcın fiziksel ve mekanik özeliklerinin gelişimi üzerinde etkili olabilecek parametreler dört

aşamalı olarak değerlendirilmiştir. Her bir aşama kendisinden sonraki aşamanın parametrelerini belirlemektedir:

(i) Alkali aktivatör türünün etkisi (NaOH (N), KOH (K), SS($Na_2SiO_3$)+NaOH (SN), ve SS($Na_2SiO_3$)+KOH (SK);
(ii) Sıcaklık kürü koşullarının etkisi;
(iii) Karışıma kum ilave edilerek üretilen harçta alkali hidroksit (NaOH, KOH) konsantrasyonunun (7.5, 10, 12.5, ve 15 M) ve aktivatör oranının (SS/ NaOH ve SS/ KOH) (ağırlıkça 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5) etkileri;
(iv) Karışıma kum ilave edilerek üretilen harçta toplam alkali aktivatör / puzolan oranının (ağırlıkça 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5) etkisi.

#### 3.2.1.1 Karışım oranları ve kabul edilen esaslar

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının fiziksel ve mekanik özeliklerinin gelişimi üzerinde alkali aktivatör türünün ve sıcaklık kürü koşullarının etkisinin değerlendirildiği ilk iki aşamada, Datça Puzolanı'nın jeopolimer bağlayıcı üretmedeki davranışını belirlemek amacıyla karışıma kum katılmamıştır. Bu aşamalarda toplam alkali aktivatör / puzolan oranı ağırlıkça 0.3 olarak sabit tutulmuştur.

İlk aşamada jeopolimer bağlayıcı içerisinde kullanılan alkali aktivatör türünün jeopolimerik reaktivite üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Doğal minerallerin alkali aktivasyonu için gereken alkali hidroksit konsantrasyonu 5-10 M arasında ideal olduğundan (Bondar ve diğ., 2011a), NaOH ve KOH'ın molar konsantrasyonu bu aşamada 7.5 M olarak sabit tutulmuştur. Taze haldeki bağlayıcının işlenebilirliği, ASTM C 1437-01 (2020) uyarınca gerçekleştirilen sarsma tablası deneyiyle belirlenmiştir. ASTM C 109 (2020)'a göre çimento esaslı harçların yayılma değeri 110±5 olmasına rağmen, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının kalıptan sızma olmadan yerleşebildiği ideal yayılma değeri 100 olarak tespit edilmiştir. Bu değeri sağlayan toplam su/toplam katı madde oranı 0.27 olarak hesaplanmıştır. Bu aşamanın sonuçları değerlendirildiğinde, SK (SS+KOH) ideal alkali aktivatör türü olarak belirlenmiş ve bundan sonraki aşamalarda sabit tutulmuştur.

İkinci aşamada aktivatör türü SK olarak belirlenmiş bağlayıcının ideal kür koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. Numuneler kalıplandıktan sonra bünyelerindeki nemin buharlaşmaması için PE kaplanarak 20±2 °C ve % 95±5 bağıl nemde 24 saat ön kürlemeye tabi tutulmuştur. Ön kürlemenin ardından kalıplar sökülmüştür. Kür

sıcaklığının ve kürleme sırasındaki nemliliğin etkilerini değerlendirmek amacıyla, numuneler 70 °C ve 90 °C sıcaklıkta PE kaplı ve PE kaplamasız halde 24 saat etüv kürüne tabi tutulmuştur. Bu aşamanın sonuçları değerlendirildiğinde, aktivatör türü SK olan bağlayıcının 90 °C'de PE kaplı halde etüvde 24 saat kürlenmesi, çalışmanın bundan sonraki aşamalarında sabit tutulmuştur.

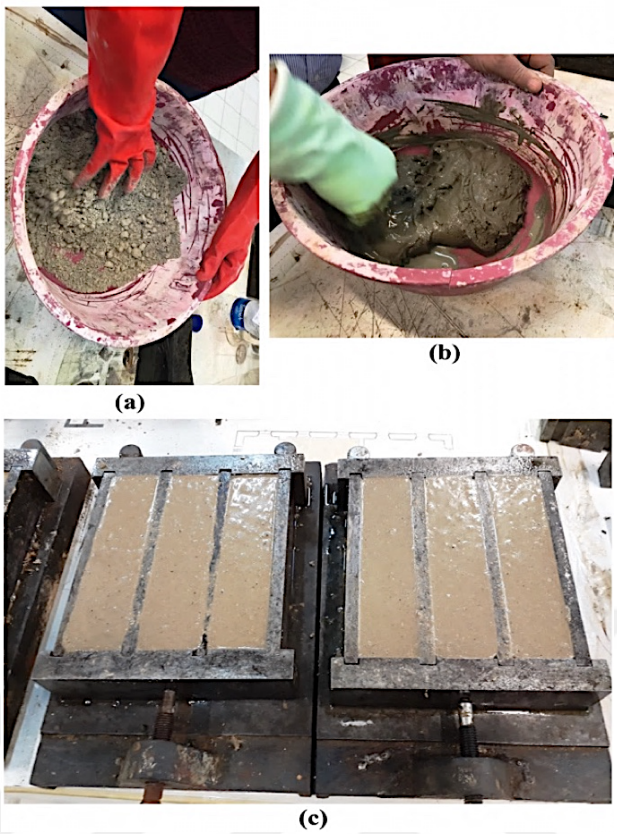
İdeal alkali aktivatör türünün (SK) ve kür koşulunun (90 °C'de PE kaplı halde 24 saat) belirlenmesinin ardından, üçüncü ve dördüncü aşamada, bağlayıcıya TS EN 196-1 (2009)'e uygun standart CEN kumu eklenerek, 1/3 puzolan/kum oranına sahip jeopolimer harç hazırlanmıştır. Kum katkısının jeopolimerin işlenebilirliğini azaltmasından dolayı yeniden sarsma tablası deneyi yapılmış ve ideal işlenebilirlik yayılma oranı 60 iken sağlanabilmiştir. Bu aşamada, sırasıyla alkali hidroksit konsantrasyonunun (7.5, 10, 12.5 ve 15 M) ve aktivatör oranının (1.0, 1.5, 2.0, 2.5) jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. 12.5 M alkali hidroksit konsantrasyonu ve 2.5 aktivatör oranı ideal olarak saptanmıştır.

Dördüncü aşamada, önceki aşamalarda belirlenmiş olan ideal karışım oranları (aktivatör türü (SK), kür koşulu (90 °C'de PE kaplı halde 24 saat), alkali hidroksit konsantrasyonu (12.5 M) ve aktivatör oranı (2.5), puzolan/kum oranı (1/3)) esas alınarak hazırlanan jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde, toplam aktivatör / puzolan oranının (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5) etkileri belirlenmiştir. Bu aşama sonunda ideal toplam aktivatör / puzolan oranının 0.3 olduğu saptanmıştır.

Her aşamada elde edilen ideal durumlarla ilgili değerlendirme ve irdeleme Bölüm 4'te yer almaktadır.

#### 3.2.1.2 Karışımların hazırlanması

Karışımlar hazırlanırken ilk olarak puzolan ve standart kum (kum katılan harçlarda) kuru halde 5 dk karıştırılmıştır (Şekil 3.11a). Daha sonra, bu karışıma 24 saat önceden hazırlanmış olan NaOH veya KOH çözeltileri, sıvı SS çözeltisi ve su eklenerek 5 dk daha karıştırılmıştır (Şekil 3.11b). Taze haldeki karışım 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 3.11c).



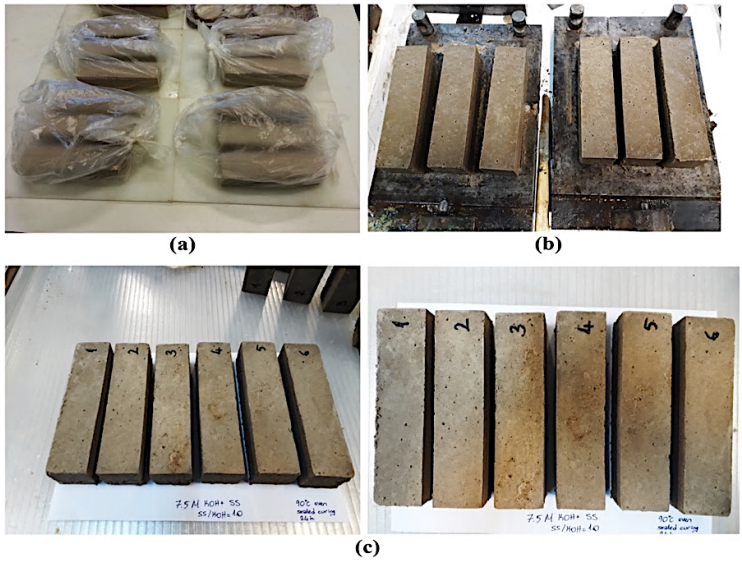

**Şekil 3.11 :** (a) Kuru hammaddelerin karıştırılması; (b) Karışıma alkali aktivatörlerin eklenmesi; (c) Numunelerin kalıplanması.

### 3.2.1.3 Kür koşulları

Kalıplara yerleştirilen taze haldeki karışım bünyesinde sahip olduğu nemi kaybetmemesi için PE kaplanarak 20±2 °C ve % 95±5 bağıl nemde 24 saat ön kürlemeye tabi tutulmuştur (Şekil 3.12a). Ön kürlemenin ardından kalıplar sökülmüştür (Şekil 3.12b). Numuneler, ikinci aşamada belirlenen ideal kür koşullarında (90 °C sıcaklıkta ve PE kaplı halde) 24 saat etüv kürüne tabi tutulmuştur. Kürlemenin ardından numuneler 20±2 °C ve % 50±5 bağıl nemli ortam koşullarında 7 gün bekletildikten sonra deneyler uygulanmıştır (Şekil 3.12c).

### 3.2.1.4 Üretilen numunelerin kodlanması

Üretilen numuneler [XX-X-X] formatında kodlanmıştır. Buna göre ilk sembol grubu alkali hidroksit konsantrasyonu ve türünü; ikinci sembol grubu aktivatör oranını; üçüncü grup ise toplam aktivatör / puzolan oranını sembolize etmektedir. Örneğin 12.5SK-2.5-0.3 koduna sahip numune 12.5 M konsantrasyonlu KOH+SS ile aktive edilen, aktivatör oranı (SS/KOH) ağırlıkça 2.5 olan ve toplam aktivatör / puzolan oranı ağırlıkça 0.3 olan karışımı sembolize etmektedir.




**Şekil 3.12 :** (a) Numunelerin PE kaplanarak ön kürlemeye tabi tutulması; (b) Ön kürleme sonrasında kalıpların sökülmesi; (c) Etüv kürü sonunda üretilen numuneler.

Her aşamada etkinliği araştırılan parametreler, karışım oranları, kodları ve kür koşulları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

**Çizelge 3.3 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının karışım oranları ve kür koşulları.

| Aşama | Numune kodu | Alkali aktivatör türü | Alkali hidroksit konsantrasyonu (MOH) | Aktivatör oranı (SS/MOH) | Toplam aktivatör/puzolan (ağırlıkça) | Kuru puzolan /kum (ağırlıkça) | Kür koşulları |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| i | 7.5N-0-0.3 | N | 7.5 | - | 0.3 | - | 70°C, PE kaplı |
| | 7.5K-0-0.3 | K | | - | | | |
| | 7.5SN-1-0.3 | SN | | 1.0 | | | |
| | 7.5SK-1-0.3 | SK | | 1.0 | | | |
| ii | 7.5SK-1-0.3 | SK | 7.5 | 1.0 | 0.3 | - | 70°C, PE kaplı<br>70°C, PE'siz<br>90°C, PE kaplı<br>90°C, PE'siz |
| iii | 7.5SK-1-0.3 | SK | 7.5 | 1.0 | 0.3 | 1/3 | 90°C, PE kaplı |
| | 7.5SK-1.5-0.3 | | | 1.5 | | | |
| | 7.5SK-2-0.3 | | | 2.0 | | | |
| | 7.5SK-2.5-0.3 | | | 2.5 | | | |
| | 10SK-1-0.3 | | 10 | 1.0 | | | |
| | 10SK-1.5-0.3 | | | 1.5 | | | |
| | 10SK-2-0.3 | | | 2.0 | | | |
| | 10SK-2.5-0.3 | | | 2.5 | | | |
| | 12.5SK-1-0.3 | | 12.5 | 1.0 | | | |
| | 12.5SK-1.5-0.3 | | | 1.5 | | | |
| | 12.5SK-2-0.3 | | | 2.0 | | | |
| | 12.5SK-2.5-0.3 | | | 2.5 | | | |
| | 15SK-1-0.3 | | 15 | 1.0 | | | |
| | 15SK-1.5-0.3 | | | 1.5 | | | |
| | 15SK-2-0.3 | | | 2.0 | | | |
| | 15SK-2.5-0.3 | | | 2.5 | | | |
| iv | 12.5SK-2.5-0.1 | SK | 12.5 | 2.5 | 0.1 | 1/3 | 90°C, PE kaplı |
| | 12.5SK-2.5-0.2 | | | | 0.2 | | |
| | 12.5SK-2.5-0.3 | | | | 0.3 | | |
| | 12.5SK-2.5-0.4 | | | | 0.4 | | |
| | 12.5SK-2.5-0.5 | | | | 0.5 | | |

### 3.2.2 Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer köpük üretimi

#### 3.2.2.1 Karışım oranları ve kabul edilen esaslar

Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer köpük üretiminde yüksek ısıl performans sağlamak amacıyla, önceki aşamalarda ideal karışım oranları belirlenen (aktivatör türü (SK), alkali hidroksit konsantrasyonu (12.5 M) ve aktivatör oranı (2.5), toplam aktivatör / puzolan oranı (0.3), kür koşulları (90°C, PE kaplı, 24 saat)) ve sabit tutulan jeopolimer bağlayıcıya, Al tozu katılarak kimyasal yöntemle köpük oluşturulmaktadır. Bu aşamada, ince kum / puzolan (İK/P) oranının ve Al tozu / puzolan (Al/P) oranının numunelerin fiziksel, mekanik ve ısıl performansı üzerindeki etkileri araştırılmaktadır. Her bir aşama kendisinden sonraki aşamanın parametrelerini belirlemektedir:

(i) İnce kum / puzolan oranının (ağırlıkça 20/100, 25/100, 33/100, 50/100 ve 100/100) etkileri;
(ii) Al tozu / puzolan oranının (ağırlıkça 0, 0.25, 0.5, 1.0 ve 1.5) etkileri.

Literatürdeki çalışmalarda, düşük ısı iletkenliğe sahip yüksek gözenekli jeopolimerlere genellikle agrega/dolgu maddesi eklenmediği tespit edilmiştir (Vaou ve Panias, 2010; Kamseu ve diğ., 2012; Henon ve diğ., 2013; Feng ve diğ., 2015; Haq ve diğ., 2015; Novais ve diğ., 2016a; Dembovska ve diğ., 2017; Bai ve diğ., 2018; Bai ve diğ., 2019). Dolgu maddeleri, bağlayıcıları harçlara dönüştürür, harçlara hacimsel stabilitelerini, rijitliklerini ve sertliklerini verir (Hajimohammadi ve diğ., 2018b) ve stabiliteyi sağlamasından dolayı kuruma rötresini kısıtlayıcı bir etkiye sahiptir (Wang ve diğ., 2021). Ayrıca, dolgu maddesi kullanılması bağlayıcı (puzolan ve kimyasal aktivatörler) miktarını azaltarak üretim maliyetinin düşmesine katkı sağlayabilir. Jeopolimer köpük üretimiyle ilgili yapılan ilk deneysel çalışmalarda, jeopolimer bağlayıcıya kum eklenmeden, yalnızca Al tozu eklenerek bağlayıcıda köpük oluşturulmaya çalışılmıştır. Taze bağlayıcı, kalıplara döküldükten sonra 10 dakika içinde hacimsel olarak yaklaşık 3.5 kat genleşmiştir (Şekil 3.13a). Ancak, 30 dakika sonra bağlayıcının katı ve gaz fazlarının ayrıldığı ve ardından çöktüğü gözlenmiştir (Şekil 3.13b). Bu durum, boşluklu bir yapı kazanan bağlayıcının plastik yoğunluğunun (taze bağlayıcı/harç yoğunluğu) önemli derecede düşük olması ($\leq$0.5 g/cm$^3$) nedeniyle olabilmektedir. Çünkü bağlayıcının plastik yoğunluğu düşük olduğunda kabarcık sınırlama kuvveti (Fc) önemli derecede azalmakta ve daha büyük ve birbirine daha yakın kabarcık oluşumuna yol açmaktadır. Kabarcık çapının artması, kabarcık

kaldırma kuvvetinde (Fb) bir artışa neden olmaktadır. Fb, çevreleyen Fc'yi yendiğinde, kabarcıklar yüzer hale gelmekte ve gözenekli bağlayıcının yüzeyine doğru yüzmekte, yüzeye ulaşmakta ve çökme meydana gelmektedir (Jones ve diğ., 2015). Bundan dolayı, Al tozu ile köpükleştirilen bağlayıcıya ince silis kumu eklenerek plastik haldeki yoğunluğun 0.5 g/cm$^3$'ün altına düşmesi engellenmiştir. Böylece, ince kum/puzolan oranının (ağırlıkça 20/100, 25/100, 33/100, 50/100 ve 100/100) boşluklu bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması hafif jeopolimer üretiminin ilk aşamasını oluşturmaktadır. Bu aşamada, Al tozu/puzolan oranı 0.5 olarak sabit tutulmuştur.



**(a)** **(b)**

**Şekil 3.13 :** (a) Kalıpları yerleştirdikten 10 dakika sonra numuneler; (b) Kalıpları yerleştirdikten 30 dakika sonra gözlenen çökme olayı.

Söz konusu aşamanın sonuçları değerlendirildikten sonra, ideal ince kum/puzolan oranı 20/100 olarak seçilmiştir. Bundan sonraki aşamada, Al tozu / puzolan oranının (ağırlıkça 0, 0.25, 0.50, 1.0 ve 1.5) köpüğün fiziksel, mekanik ve termal özelikleri üzerindeki etkileri test edilmiştir. Buna göre, ideal Al tozu / puzolan oranı % 0.5 olarak tespit edilmiştir.

Her aşamada elde edilen ideal durumlarla ilgili değerlendirme ve irdeleme Bölüm 4'te yer almaktadır.

### 3.2.2.2 Karışımların hazırlanması

Karışımlar hazırlanırken, ilk olarak puzolan ve ince silis kumu kuru halde 5 dk karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışıma 24 saat önceden hazırlanmış olan KOH ve SS çözeltisi ve su eklenerek 5 dk daha karıştırılmıştır. Al tozunun ilave edilerek 2 dakika

daha karıştırılmasının ardından karışım, 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Burada, Al tozunun karışıma eklenmesinden hemen sonra köpürmenin başladığı vurgulanmalıdır. Karışımın hacimsel genleşmesi için reaksiyon süresi yaklaşık 10 dakika sürmüştür.

Taze haldeki jeopolimer köpüğün hacimsel genleşme oranı, karışıma eklenen Al tozu miktarına bağlı olarak değiştiğinden, her bir Al tozu katkı oranı için, 500 ml'lik cam deney tüpü kullanılarak harcın hacimsel genleşme oranı belirlenmiştir. Üretilen taze harç, bu deney tüpüne 100 ml seviyesine kadar doldurulmuştur. Kabarma tamamlandıktan sonra hacimsel genleşme oranı ($R_{ve}$) denklem (3.5) uyarınca hesaplanmıştır. Böylece kalıplara yeteri miktarda taze haldeki karışım dökülerek genleşme sırasında karışımın kalıptan taşması önlenmiştir.

$$R_{ve}= (V_f-V_i) /V_i \tag{3.5}$$

$V_i$= taze harcın ilk hacmi (ml),

$V_f$=genleşmiş harcın son hacmi (ml).

### 3.2.2.3 Kür koşulları

Kalıplanmış jeopolimer köpük, hızlı nem kaybını önlemek için PE kaplanarak 90 °C'de ve % 95±5 bağıl nemde 24 saat kürlenmiştir. Kürlenen numuneler 7 gün boyunca 20±2 °C, % 50±5 bağıl nemde ortam kürüne bırakıldıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2.4 Üretilen numunelerin kodlanması

Deneysel çalışmada üretilen numuneler [XX-X-X] formatında kodlanmıştır. Buna göre ilk sembol grubu alkali hidroksit türünü; ikinci sembol grubu ince kum/puzolan oranını; ve üçüncü grup Al tozu/puzolan oranını sembolize etmektedir. Örneğin SK-20/100-0.5 koduna sahip numune KOH+SS ile aktive edilen, ince kum/puzolan oranı ağırlıkça 20/100 ve Al tozu/puzolan oranı ağırlıkça 0.5 olan karışımı sembolize etmektedir.

Deneysel tasarımın her aşamasında etkinliği araştırılan parametreler, karışım oranları, kodları ve kür koşulları Çizelge 3.4'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün karışım oranları ve kür koşulları.

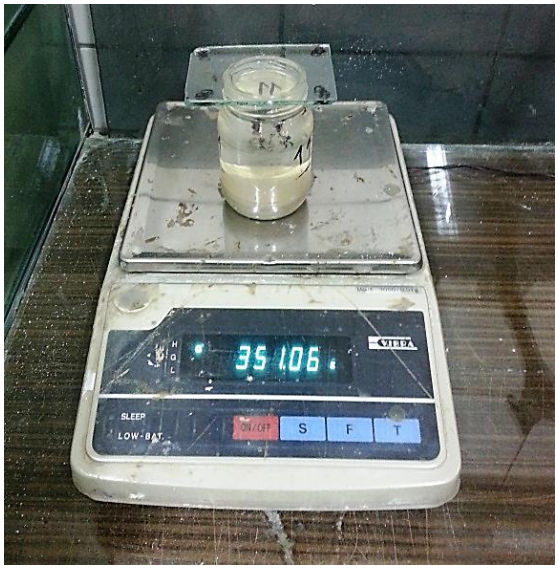
| Aşama | Numune kodu | Aktivatör oranı (SS/ MOH) | Toplam aktivatör/ puzolan | İK/P (ağırlıkça) | Al/P (%, ağırlıkça) | Kür koşulları |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | SK-20/100-0.5 | | | 20/100 | | |
| | SK-25/100-0.5 | | | 25/100 | | |
| i | SK-33/100-0.5 | 2.5 | 0.3 | 33/100 | 0.5 | 90 °C, |
| | SK-50/100-0.5 | | | 50/100 | | PE |
| | SK-100/100-0.5 | | | 100/100 | | kaplı, 24 |
| | SK-20/100-0 | | | | 0 | saat |
| | SK-20/100-0.25 | | | | 0.25 | |
| ii | SK-20/100-0.5 | 2.5 | 0.3 | 20/100 | 0.5 | |
| | SK-20/100-1.0 | | | | 1.0 | |
| | SK-20/100-1.5 | | | | 1.5 | |

### 3.2.3 Deneyler

#### 3.2.3.1 Fiziksel özeliklerin belirlenmesi için uygulanan deneyler

**Özgül kütle**

Sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar sıcaklığı 70±5 °C'de havalandırmalı etüvde kurutulmuş malzemenin, boşluksuz haldeki birim hacminin kütlesi özgül kütle olarak adlandırılmaktadır (TS 699, 2009). Sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar 70 °C'de kurutulan 90 µm inceliğe sahip malzeme, özgül kütlesi 1 gr/cm³ damıtılmış su ile dolu cam kaba eklenerek üç gün bekletilmiştir. Bekleme süresi sonunda içinde hava kabarcığı olmadığından emin olunan cam kap hassas terazide tartılmıştır (Şekil 3.14).




**Şekil 3.14 :** Su dolu cam kabın içesinde bekletilen malzemenin tartımı.

Malzemenin özgül kütlesi aşağıdaki formül (3.6) ile hesaplanmaktadır (TS 699, 2009):

$$\rho r = \frac{mkn - mk}{(mkn - mk) - (mkns - msd)} \quad (3.6)$$

$\rho r$ = Özgül kütle, (gr/cm$^3$)

$m_{kn}$= Kap+numunenin kütlesi, (g)

$m_k$=Kabın kütlesi, (g)

$m_{kns}$= Kap+su+numunenin kütlesi, (g)

$m_{sd}$= Su dolu kabın kütlesi, (g)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait özgül kütle deney sonuçları Çizelge A.1'de, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait özgül kütle deney sonuçları Çizelge A.2'de verilmektedir.

**Birim hacim ağırlık**

Bir malzemenin birim hacim ağırlığı, kuru haldeki kütlesinin görünür hacmine oranıdır. Görünür hacim, malzemenin boşluklarının dahil olduğu dış yüzeyiyle sınırlı hacmidir (TS EN 1936, 2010). Üretilen numuneler düzgün biçimli prizmalar olmasına rağmen birim hacim ölçümleri aynı zamanda, düzgün olmayan cisimlerin birim hacim ağırlığını belirleyen su emme deneyi ile belirlenmiştir. Birim hacim ağırlık aşağıdaki denklemle (3.7) ifade edilmektedir (TS EN 1015-10, 2001):

$$\rho = m_d / (m_s - m_h) \quad (3.7)$$

$\rho$ : Birim hacim ağırlık, (gr/cm$^3$)

$m_d$ : Kuru deney numunesinin kütlesi, (gr)

$m_h$ : Su içerisine batırılmış deney numunesinin kütlesi, (gr)

$m_s$ : Doymuş deney numunesinin kütlesi, (gr)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge A.3'te, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge A.4'te verilmektedir.

**Kapiler su emme**

Yapı malzemelerinin yüzeyleri suyla temas ettiğinde, suyun yüzey gerilimi dolayısıyla malzemedeki boşluklar suyu kapiler olarak yukarı doğru çekerler (Kocataşkın, 2000). Bu özelik kapiler su emme deneyiyle araştırılmaktadır. Kapiler su emme deneyinde, sabit kütleye kadar kurutulan deney numunesinin suyla temas eden yüzey alanı hesaplanır. Numune, su haznesindeki mesnet dayanaklarının üzerine yerleştirilir (Şekil 3.15). Ardından numunenin tabanı 3±1 mm su içerisine daldırılır ve kronometri çalıştırılır. 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, 81, 100, 121ve 144. dakikada numunenin ağırlığı ölçülür ve kapiler su emme (kapilarite) katsayısı aşağıdaki denklemle (3.8) ifade edilir (TS EN 1925, 2000):

$$N_k = (m_i - m_d) / A.\ (t)^{1/2} \qquad (3.8)$$

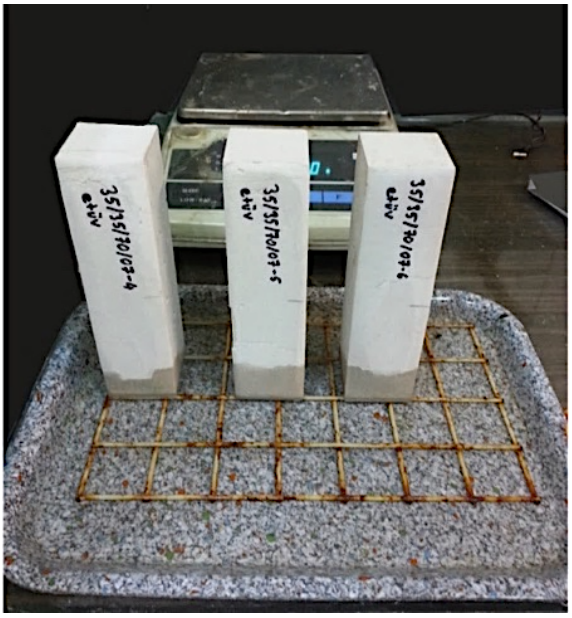
$N_k$ : Kapilarite katsayısı, ($cm^2$/sn)

$m_d$ : Kuru deney numunesinin kütlesi, (gr)

$m_i$ : Deney esnasında deney numunesinin ardışık kütleleri, (gr)

A: Suya batırılmış yüzeyin alanı, ($cm^2$)

t : Deney başlangıcından ardışık $m_i$ kütlelerinin ölçüldüğü süreler, (dk)



**Şekil 3.15 :** Kapiler su emme deneyinin uygulanması.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları Çizelge A.5'te verilmektedir.

**Atmosfer basıncı altında su emme**

Malzemenin içerisindeki boşluklara fiziksel olarak su alınması işlemi "su emme" olarak adlandırılmaktadır. Su emme deneyi, kütlece ve hacimce olmak üzere iki şekilde hesap edilmektedir. Deney numuneleri, 70±5 °C'de sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulur ve tartılır ($m_d$). Numuneler su haznesi içerisine aralarında en az 15 mm mesafe olacak şekilde yerleştirilir (Şekil 3.16). Daha sonra deney numunesi yüksekliğinin yarısına kadar 20±10 °C sıcaklıkta su ilave edilir ($t_0$ zamanı). Zaman olarak $t_0$+(60±5) dakikaya gelindiğinde, su seviyesi deney numunesi yüksekliğinin 3/4'üne ulaşıncaya kadar su eklenir. Zaman olarak $t_0$+(120±5) dakikaya gelindiğinde, deney numuneleri 25±5 mm su derinliğine tamamen batırılıncaya kadar su eklenir. Zaman $t_0$+(48±2)'ye ulaştığında, numuneler sudan çıkarılır ve tartılır ($m_i$). Sabit bir kütleye ulaşılıncaya kadar deneye devam edilir. Son tartma işleminde belirlenen değer, numunenin doymuş kütlesidir ($m_s$).



**Şekil 3.16 :** Su emme deneyinin uygulanması.

Atmosfer basıncı altındaki kütlece su emme değeri, aşağıdaki denklemle (3.9) ifade edilmektedir (TS EN 13755, 2009):

$$A_b = [(m_s - m_d) / m_d] \times 100 \qquad (3.9)$$

$A_b$ : Atmosfer basıncı altında kütlece su emme, (%)

$m_d$ : Kuru numunenin kütlesi, (gr)

$m_s$ : Doymuş numunenin kütlesi, (gr)

Atmosfer basıncı altındaki hacimce su emme, numunenin açık gözeneklerinin hacminin görünür hacime oranıdır ve aşağıdaki denklemle (3.10) ifade edilmektedir (TS EN 13755, 2009):

$$p_0 = [(m_s-m_d) / (m_s-m_h)] \times 100 \quad (3.10)$$

$m_h$ : Su içerisine batırılmış deney numunesinin kütlesi, (gr)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait su emme deney sonuçları Çizelge A.6'da, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait su emme deney sonuçları Çizelge A.7'de verilmektedir.

**Kompasite ve porozite**

Sabit kütleye ulaşıncaya kadar kurutulmuş malzemenin, boşlukları hariç hacminin, boşlukları dahil hacmine oranı malzemenin kompasitesi yani doluluk oranıdır. Kompasite aşağıdaki denklemle (3.11) ifade edilmektedir:

$$k = (\rho / \rho r) \times 100 \quad (3.11)$$

k : Kompasite, (%)

ρ : Birim hacim ağırlık, (gr/cm³)

ρr : Özgül ağırlık, (gr/cm³)

Porozite (gözeneklilik oranı) aşağıdaki denklemle (3.12) ifade edilir:

$$P = [1-( \rho / \rho r)] \times 100 \quad (3.12)$$

P : Porozite, (%)

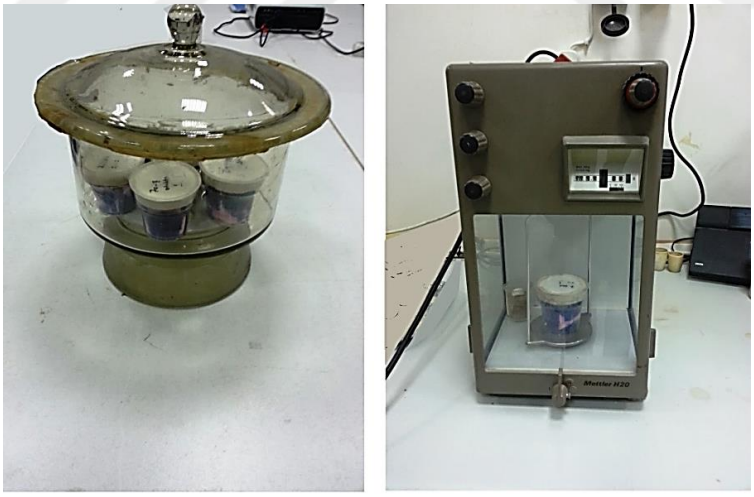
ρ : Birim hacim ağırlık, (gr/cm³)

ρr : Özgül ağırlık, (gr/cm³)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kompasite ve porozite deney sonuçları Çizelge A.8'de, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait kompasite ve porozite deney sonuçları Çizelge A.9'da verilmektedir.

**Buhar geçirgenlik direnci**

Havanın su buharı geçirgenliğinin, malzemenin su buharı geçirgenliğine oranı buhar difüzyon direnç faktörü olarak tanımlanmaktadır. Yani buhar difüzyon direnç faktörü, malzemenin su buharı direncinin aynı sıcaklıkta ve aynı kalınlıktaki durgun bir hava tabakasına nazaran büyüklüğünü ifade etmektedir (TS EN 12086, 2013). Buhar geçirgenlik direnci deneyinde, önceden hazırlanmış çapı 7 cm ve kalınlığı 1.5 cm olan 6 adet dairesel numune, içerisinde $CaCl_2$ bulunan plastik kapların üzerine yerleştirilmiş ve etrafı parafinle sızdırmazlık sağlayacak şekilde tespit edilmiştir. Deney düzeneği olarak TS EN 12086'da yer alan üç deney şartından B (23-0/85) şartı seçilmiştir. Yani deney ortamının sıcaklığı 23±2 °C ve bağıl nemi kuru halde % 0 ve nemli halde % 85±5 olmalıdır. Bunu sağlamak amacıyla, içerisinde su bulunan desikatöre numuneler yerleştirilmiş ve desikatörün kapağı sıkıca kapatılmıştır. Desikatörün içindeki ve deney kabı içindeki kısmi su buharı basınç farklarından dolayı, su buharı deney numunesinden geçmeye başlamaktadır. Su buharı geçirgenlik hızı sabit hale ulaşıncaya kadar, numunelerin ağırlığı 24 saat aralıkla Mettler H20 marka 3000/0.01 gr hassasiyetteki terazide ölçülmüş ve ardışık tartım arasındaki fark değişmeyinceye kadar ölçümlere devam edilmiştir (Şekil 3.17).



**Şekil 3.17 :** Buhar geçirgenlik direnci deneyinin uygulanması.

Buhar difüzyon direnç faktörü aşağıdaki aşamalardan geçilerek hesaplanmaktadır (TS EN 12086, 2013):

- **Deney düzeneğinin kütle değişiminin hesaplanması**

Seçilen zaman aralığında, her bir deney numunesinin kütlesindeki değişme ($G_{1,2}$) aşağıdaki denklemle (3.13) ifade edilmektedir:

$$G_{1,2} = (m_2-m_1) / (t_2-t_1) \quad (3.13)$$

$m_1$ : Numunenin $t_1$ zamandaki kütlesi, (mg)

$m_2$ : Numunenin $t_2$ zamandaki kütlesi, (mg)

$t_1$ ve $t_2$: Ardışık tartım süreleri, (sa)

Ardışık beş adet $G_{1,2}$ tayininin ortalaması olarak, mg/sa birimiyle, her bir deney numunesi için "G" hesaplanır.

- **Su buharı iletim debisinin hesaplanması**

Su buharı iletim debisi (g), mg/m$^2$.h birimiyle aşağıdaki denklemle (3.14) ifade edilmektedir:

$$g = G / A \quad (3.14)$$

G: Numune kütlesinin ortalama değişimi, (mg)

A: Deney numunesinin etkiye maruz alanı, (m$^2$)

- **Su buharı geçiş hızının hesaplanması**

Su buharı geçiş hızı (W), mg/(m$^2$ .h.Pa) birimiyle aşağıdaki denklemle (3.15) ifade edilmektedir:

$$W = G / (A \times \Delta p) \quad (3.15)$$

W: Su buharı geçiş hızı, (mg/m$^2$ .h.Pa)

Δp: Su buharı basınç farkı = 2390 Pa. Su buharı basınç farkı TS EN 12086'de bulunan deney şartlarına bağlı olarak (B (23-0/85)) standartta yer alan çizelgeden alınmıştır.

- **Su buharı geçirgenliğinin hesaplanması**

Su buharı geçirgenliği (δ), mg/(m.h.Pa) birimiyle aşağıdaki denklemle (3.16) ifade edilmektedir:

$$\delta = W \times d \quad (3.16)$$

d : Numunenin ortalama kalınlığı, (m)

- **Havanın su buharı geçirgenliğinin hesaplanması**

Havanın su buharı geçirgenliği (δh), deney sırasındaki ortalama barometrik basınca bağlıdır ve aşağıdaki denklemle (3.17) ifade edilmektedir:

$$\delta h = [0.083 / (R_d \times T)] \times (p_0 / p) \times (T / 273)^{1.8} \quad (3.17)$$

$R_d$ : Su buharın gaz sabiti, 462 x $10^{-8}$ Nm/(mg.K)

T : ºK cinsinden deney sıcaklığı (mutlak sıcaklık)

$p_0$ : Normal barometrik basınç, 1013.25 hPa

p : Deney sırasındaki ortalama barometrik basınç, hekto Pascal

- **Su buharı difüzyon direnç faktörünün hesaplanması**

Su buharı difüzyon direnç faktörü (μ), birimsiz olarak aşağıdaki denklemle (3.18) ifade edilmektedir:

$$\mu = \delta h / \delta \quad (3.18)$$

δ: Su buharı geçirgenliği, (mg/m.h.Pa)

**Ultrases hızı**

Duyulabilen ses titreşimleri 16-16.000 Hz arasında olup frekansı 16.000'in üzerinde olan ses dalgalarına "ultrases" denilmektedir. Bu dalgaların yayılabilmesi için cismin katı, sıvı veya gaz halde olması gerekmektedir. Aksi halde, ultrases dalgaları boşlukta yayılamamaktadır. (Postacıoğlu, 1981). Ses dalgaları, yörüngelerinde bir boşluğun bulunması durumunda, bu boşluğu geçemeyerek çevresinden dolanırlar. Bu durum, malzemenin bir ucundan diğer ucuna ses geçiş süresinin uzamasına, dolayısıyla ses geçiş hızının azalmasına yol açmaktadır. Ses geçiş hızının düşük olması, malzemenin porozitesinin yüksek olduğunun bir göstergesidir (Postacıoğlu, 1981).

Ultrases hızını belirlemek amacıyla Proceq Marka cihaz (Şekil 3.18) kullanılmıştır. Numunenin bir yüzeyine ultrases üreten verici prob ve diğer yüzeyine de malzeme içinden geçen ses dalgalarını toplayan alıcı prob yerleştirilmektedir. Ses dalgaları, alıcı prob tarafından toplanmakta ve sesin iki yüzey arasında geçiş süresi mikrosaniye cinsinden tespit edilmektedir.



**Şekil 3.18 :** Ultrases hızı deney cihazı.

Ses geçiş hızı aşağıdaki denklemle (3.19) ifade edilmektedir (TS EN 14579, 2006):

$$v_u = L / t \tag{3.19}$$

$v_u$ : Ultrases hızı, (km/s)

L : Numunenin uzunluğu, (mm)

t : Ses geçiş süresi, (µs)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait ultrases hızı deney sonuçları Çizelge A.10'da, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ultrases hızı deney sonuçları Çizelge A.11'de verilmektedir.

**Elastiklik Modülü**

Elastiklik modülü (rijitlik), malzemenin yük altındaki deformasyona karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Elastisite, malzemenin kuvvet altında deformasyon yapma (uzama ya da kısalma) ve kuvvet kaldırıldığında orijinal şekil ve boyutlarına geri dönebilme kabiliyeti olarak tanımlanır. Plastiklik ise, malzemenin kuvvet altında kırılma olmaksızın plastik deformasyon geçirme ve kuvvet kaldırıldığında yeni kazandığı şeklini sürdürme yeteneğini ifade eder.

Ultrases geçiş hızı bulunan numunelerin elastiklik modülü aşağıdaki denklemle (3.20) ifade edilir:

$$E = v_u^2 \times \rho \times 1000 \tag{3.20}$$

E : Elastiklik modülü, (MPa)

$v_u$ : Ultrases hızı, (km/s)

ρ : Birim hacim ağırlık, (g/cm$^3$)

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait ultrases hızı deney sonuçları Çizelge A.12'de, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ultrases hızı deney sonuçları Çizelge A.13'te verilmektedir.

### 3.2.3.2 Mekanik özeliklerin belirlenmesi için uygulanan deneyler

**Eğilmede çekme dayanımı**

Eğilmede çekme dayanımı deneyi, TS EN 196-1 (2009)'e uygun olarak İTÜ Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan MFL marka 100 kN kapasiteli Üniversal Deney Makinesiyle yapılmıştır. Cihaz, birbirinden uzaklığı 100 mm olan 10 mm çapında iki adet çelik mesnet silindir ile her ikisi arasına merkezi olarak yerleştirilen üçüncü bir çelik yükleme silindirinin oluşturduğu eğilme düzeneğinden ibarettir. Numune cihaza, yan yüzeylerinden biri mesnet silindirleri üzerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yük, yükleme silindiri vasıtasıyla numunenin mesnetlere oturan yüzünün karşıt yüzüne düşey olarak ve 0.5 N/mm$^2$ sabit hızla numune kırılıncaya kadar uygulanmıştır (Şekil 3.19).



**Şekil 3.19 :** Numunelerin eğilmede çekme dayanımı deneyine tabi tutulması.

Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$), aşağıdaki denklemle (3.21) ifade edilmektedir (TS EN 196-1, 2009):

$$R_f = (1.5 \times F_f \times l) / (b \times h^2) \qquad (3.21)$$

$R_f$ : Eğilmede çekme dayanımı, (MPa)

$F_f$ : Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük, (N)

l : Mesnet silindirleri arasındaki mesafe, 100 mm,

b: Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

h : Numunenin yüksekliği, mm

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge A.14'te, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait eğilmede çekme dayanımı deney sonuçları Çizelge A.15'te verilmektedir.

**Basınç dayanımı**

Basınç dayanımı deneyi, eğilmede çekme dayanımı deneyleri sonucunda iki parçaya ayrılan örneklerin her bir parçası üzerinde, eğilme dayanımı deneylerinde kullanılan deney makinesiyle yapılmıştır. Numuneler, alt ve üst yüzeylerine birbirine paralel olacak şekilde düzenlenmiş 10 mm kalınlıkta plakalar arasına dik açı ile yerleştirilerek kırılma gerçekleşinceye kadar yük uygulanmıştır.

Basınç dayanımı ($R_c$), aşağıdaki denklemle (3.22) ifade edilmektedir (TS EN 196-1, 2009):

$$R_c = F_{co} / (40 \times b) \quad (3.22)$$

$R_c$ : Basınç dayanımı, (MPa)

$F_{co}$ : Kırılma anındaki en büyük yük, (N)

b: Prizma şekilli numunenin kare kesitinin kenar uzunluğu, mm

40 : Yükleme plakalarının genişliği, mm

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge A.14'te, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge A.15'te verilmektedir.

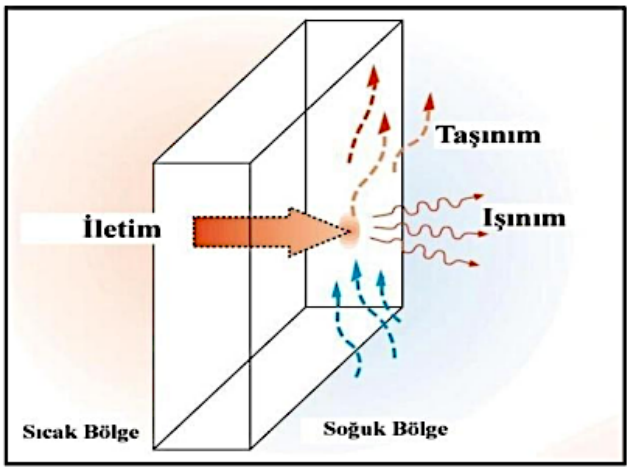
### 3.2.3.3 Isıl performansın belirlenmesi için uygulanan deneyler

Termodinamiğin temel yasalarına göre, enerji transferi bir sistemin çevresiyle etkileşimi ile açıklanabilmektedir. Isı enerjisinin sıcaklıkları farklı bir ortamdan diğer bir ortama geçişi üç şekilde oluşur (Prud'homme ve diğ., 2015):

• Isı iletimi (kondüksiyon)

• Isı taşınımı (konveksiyon

• Isı ışınımı (radyasyon) (Şekil 3.20).




**Şekil 3.20 :** Isı akımlarının gösterimi (XCO2, 2002).

Bir malzemenin ısı iletkenliği (λ); (i) katı ($\lambda_{iletim,katı}$) ve hava ($\lambda_{iletim,hava}$) yoluyla iletimin, (ii) hava yoluyla taşınımın ($\lambda_{taşınım}$) ve (iii) ısı akış yönüne dik gözeneklerin bitişik yüzleri arasındaki ışınımın ($\lambda_{radyasyon}$) toplamıdır (3.23) (Ghazi Wakili ve diğ., 2015):

$$\lambda = \lambda_{iletim,katı} + \lambda_{iletim,hava} + \lambda_{taşınım} + \lambda_{radyasyon} \quad (3.23)$$

Isı iletimi katı cisimlerde ısı enerjisinin geçiş şeklidir. Enerji, cismi oluşturan moleküllerin titreşimi sonucu bir molekülden diğerine aktarılarak yayılır. Gözenekli bir malzeme için, iletim temel ısı transfer türüdür (Prud'homme ve diğ., 2015) ve $\lambda_{iletim,katı}$ oda sıcaklığındaki ısı iletiminin çoğunu oluşturur (Ghazi Wakili ve diğ., 2015). Bu nedenle, malzemelerin ısı iletkenliği, malzemenin katı ve hava miktarı arasındaki oranın (yani toplam gözenekliliğin) bir fonksiyonudur (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Genellikle yüksek poroziteye ya da düşük yoğunluğa sahip boşluklu malzemelerin λ değeri daha düşüktür (Liu ve diğ., 2014; Huang ve diğ., 2018; Cui ve diğ., 2018; Bai ve diğ., 2019). Çünkü hareketsiz havanın ısı iletkenliği (0.026 W/mK), kendisini çevreleyen katı jeopolimer matrisinkine nazaran (genellikle 1.0-1.2 W/mK) daha düşüktür ve malzemenin daha yüksek poroziteye sahip olması, ısı yalıtımı işlevi görebilecek daha fazla boşluk bulundurduğu anlamına gelmektedir (Prud'homme ve diğ., 2015). Bununla birlikte, toplam porozitenin birbirine yakın olduğu malzemelerde daha küçük boşluk çapına sahip gözeneklerin oranı arttıkça, ısı iletim mesafesi uzar ve dolayısıyla ısı iletkenlik azalır (Dong ve diğ., 2019).

Isı taşınımı, ısı enerjisinin sıvı ve gaz gibi akışkanlardaki geçiş şeklidir ve moleküllerin hareket edip enerjiyi taşımaları yolu ile olmaktadır. Farklı sıcaklıklardaki iki çeper arasında bulunan hava, hareket edebilecek bir hacime ve ortama sahipse, konveksiyon yoluyla ısıyı iletmeye başlar. Boşluklu malzemelerde gözenek boyutları 4 mm'den daha küçük olduğundan dolayı taşınım yoluyla ısı akışlarının ($\lambda_{taşınım}$) etkisi önemsenmemektedir (Schulle ve Schlegel, 1991; Wei ve diğ., 2013).

Isı ışınımı; katı ve sıvı cisimler yüzey sıcaklığına ve yüzey özeliklerine bağlı olarak yüzeylerinden elektromanyetik dalgalarla yani radyasyon yoluyla ısıyı iletirler. Bu ısı ışınımının taşınabilmesi için herhangi bir taşıyıcı ortama gerek yoktur. Mutlak sıfır sıcaklığında (-273 °C) olmayan her cisim elektromanyetik dalga şeklinde bir enerji akışı yayar (Toydemir ve diğ., 2007). Işınım, özellikle yüksek sıcaklıktaki katılarda etkilidir (Incropera ve DeWitt, 2002) ve 600 °C'den düşük sıcaklıklarda ısıl transfer üzerindeki etkisi ihmal edilebilmektedir (Prud'homme ve diğ., 2015).

**Isı iletkenlik katsayısı**

Al tozu/puzolan oranının (% 0, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5) jeopolimer köpük özelikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı her bir karışım oranındaki 6'şar adet 100 mm çap ve 10 mm kalınlığa sahip (Şekil 3.22a) dairesel numunelerin ısı iletkenlik katsayısı ASTM C518-17 (2017)'ye göre kararlı durum koşullarında ısı akış ölçer cihazı kullanılarak İTÜ Makine Fakültesi Isı ve Kütle Geçişi Laboratuvarı'nda ölçülmüştür. Isı akış ölçer cihazı alt ve üst soğutucu tabla, ortada yer alan ısıtıcı, iki bakır plaka ve ısı kaybını önlemek için ısı yalıtımlı bir koruyucu katmandan oluşmaktadır (Şekil 3.21). Her bir ölçümde aynı çap ve kalınlıktaki iki adet numune kullanılmaktadır (Şekil 3.22a). Alt tablanın üzerine bakır plaka ve bu plakanın üzerine numunelerden biri yerleştirilir. Numunenin üzerine ısıtıcı, ısıtıcının üzerine diğer numune ve onun da üzerine diğer bakır plaka ve üst tabla yerleştirilir (Şekil 3.22b). Daha sonra, sistem ısı kaybı oluşmaması için ısı yalıtım malzemesiyle sarılarak (Şekil 3.22c) koruyucu kapak ile kaplanır. Ortada yer alan ısıtıcıdan çıkan ısı akımının her iki numuneden eşit olarak geçtiği kabul edilir. Sistem çalıştırılarak denge rejimi sağlanana kadar (yani sıcaklık artışını gösteren doğrusal eğriler yatay hale geldiğinde) yaklaşık 40 dk beklenir. Denge rejimi sağlandığında, ısıtıcıdan ve alt ve üst bakır plakalardaki sıcaklık sensörlerinden okunan sıcaklık değerleri Keithley ExceLINX Programı kullanılarak sürekli olarak kayıt edilir. Ölçüm tamamlandığında, ısı iletkenlik katsayısını hesaplamak için

Fourier'in ısı iletimi yasasındaki denklemler (3.24 ve 3.25) kullanılır. Deney düzeneğinde alt ve üste yerleştirilen her iki numunenin ısı iletkenlik katsayılarının ortalaması alınarak hesaplanır.

$$Q_1 = \lambda 1 \frac{T1 - T2}{d1} \tag{3.24}$$

$$Q_2 = \lambda 2 \frac{T3 - T4}{d2} \tag{3.25}$$

$Q_1$= Üstteki numuneden geçen ısı akısı (W/m$^2$)

$Q_2$= Alttaki numuneden geçen ısı akısı (W/m$^2$)

$\lambda 1$ = Üstteki numunenin ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)

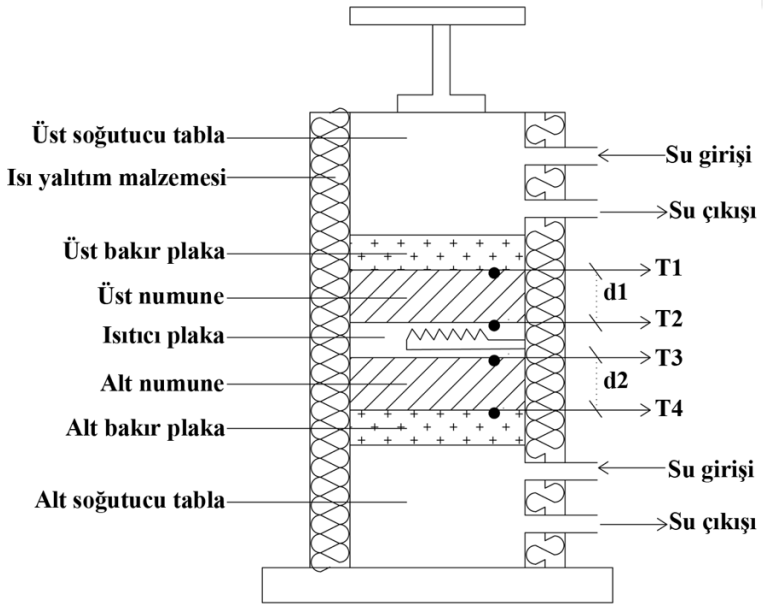
$\lambda 2$ = Alttaki numunenin ısı iletkenlik katsayısı (W/mK)

$T_1$-$T_2$ = Üstteki numunenin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı (K)

$T_3$-$T_4$ = Alttaki numunenin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı (K)

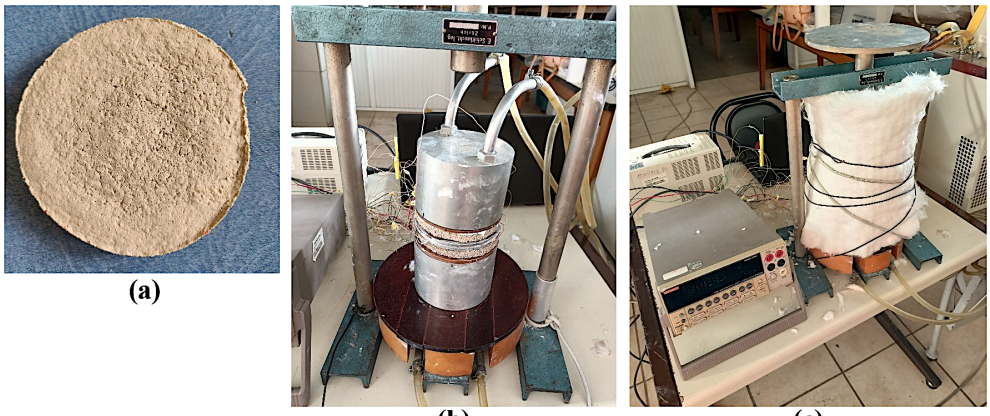
$d_1$= Üstteki numunenin kalınlığı (m)

$d_2$= Alttaki numunenin kalınlığı (m)




**Şekil 3.21 :** Isı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı kesit şeması.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları Çizelge A.16'da verilmektedir.



(a) (b) (c)

**Şekil 3.22 :** (a) Isı iletkenlik katsayısı deneyinin uygulandığı 100 mm çap ve 10 mm kalınlığa sahip dairesel numuneler; (b) Numunelerin bakır plakalar arasına yerleştirilmesi; (c) Deney düzeneğinin ısı yalıtım malzemesi ile kaplanması.

### 3.2.3.4 Makro boyutlu boşluk yapısının belirlenmesi için uygulanan deneyler

**Optik analiz**

Boşluklu jeopolimer malzemelerin gözenek yapısı özelikleri; gözenek boyutu, gözenek boyutu dağılımı, homojenlik, gözenekler arasındaki bağlantı ve toplam gözenekliliktir (porozite) (Dhasindrakrishna ve diğ., 2021). Bu gözenek yapısı özelikleri jeopolimerlerin yoğunluk, mukavemet, ısı iletkenlik, su emme ve ses emme özeliklerini optimize etmede önemli rol oynamaktadır. Özellikle makro ölçekli (ortalama genişliği > 10 µm olan) gözenekler, malzemenin temel özeliklerini belirlemektedir (Cui ve diğ., 2018). Bundan dolayı, makro ölçekli gözenek (> 10 µm) morfolojisini (gözenek miktarı, boyutu, şekli ve birbirleriyle bağlantısı) karakterize etmek amacıyla gözeneklerin iki-boyutlu detaylı bir resmini veren optik analiz gerçekleştirilmiştir. Jeopolimer köpük karışımlarına ait ince kum / puzolan oranının (ağırlıkça 20/100, 25/100, 33/100, 50/100 ve 100/100) ve Al tozu / puzolan oranının (ağırlıkça 0, 0.25, 0.50, 1.0 ve 1.5) etkilerinin araştırıldığı herbir karışıma ait 3'er adet numune İTÜ Maden Fakültesi İnce Kesit Hazırlama Laboratuvarı'nda taş kesme makinesi kullanılarak 40x40x10 mm kalınlıkta kesilmiştir (Şekil 3.23a). Kesilen parçaların yüzeyi düzeltme diski üzerinde inceltilerek pürüzsüz ve temiz bir hale getirilmiştir. Daha sonra, bu parçalar 1 mm kalınlığındaki camın üzerine iki bileşenli şeffaf epoksi ile yapıştırılmış, düzeltme diskinde 600 mesh zımpara ile zımparalanarak 30 mikron kalınlığa kadar inceltilmiş ve kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.23b).



**(a)** **(b)**

**Şekil 3.23 : (**a) Jeopolimer köpüğün kesilmesi; (b) Jeopolimer köpüğün ince kesit haline getirilmesi.

Hazırlanan ince kesitlerin Nikon LV 100 Pol Marka optik mikroskop yardımıyla (10×) dörder adet görüntüsü elde edilmiştir. Ancak, yalnızca mikroskobik görüntüleri analiz ederek gözenek morfolojisi hakkında detaylı bilgi edinmek mümkün değildir. Bundan dolayı, numunelerin makro boyuttaki gözenek karakterizasyonu Image-pro plus yazılımı kullanılarak görüntü analizi yöntemiyle tespit edilmiştir. Gözenek boyutları eşdeğer daire çapı ile ölçülmüş ve numunelerin porozite, ortalama ve maksimum gözenek çapı, gözenek boyutu dağılımı belirlenmiştir. Ortalama gözenek çapı 300 ölçüm sonucundan elde edilmiştir. Gözenekler dairesel iki boyutlu şekiller olup elde edilen eşdeğer daire çapı ($D_{eşdeğer}$) aşağıdaki bağıntıyla (3.26) hesaplanmıştır (Prud'homme ve diğ., 2015). Orta ölçekli gözeneklerin (100 nm -10 μm) dağılımının, jeopolimer malzemelerin özeliklerini etkilemede önemsiz olduğu varsayıldığından, söz konusu boşluk çapı aralığı dikkate alınmamıştır (Cui ve diğ., 2018).

$$D_{eşdeğer} = 2 \text{ x } [S_{pi} / \pi]^{1/2} \qquad (3.26)$$

$D_{eşdeğer}$ : Eşdeğer daire çapı, (μm)

$S_{pi}$: Boşluğun ölçülen yüzey alanı, $(\mu m)^2$

### 3.2.4 Deney sonuçları

Bütün deney sonuçlarının aritmetik ortalaması, standart sapması ve variasyon katsayısı hesaplanmış ve sonuçlar istatistiksel olarak "chauvenet" (şovöne) kriterine göre analiz edilmiştir. Şovöne kriteri, ölçüm sonucunda elde edilen bulguların şüpheli olanlarının elenmesi amacıyla kullanılır. Kriter, aritmetik ortalamadan sapma olasılığı 1/2N'den

daha küçük olan değerlerin alınmamasını önerir. N ölçüm sayısıdır. Bütün deney sonuçları 6 adet ölçüm üzerinden hesaplanırken yalnızca basınç dayanımı sonuçları 12 adet ölçüme dayanmaktadır. Şovöne Kriteri çizelgesine göre (Çizelge 3.5), kabul edilebilir maksimum sapma fiziksel, mekanik ve ısıl performans deneyleri için 1.73 ve basınç dayanımı deneyi için 2.04'tür (Bayless, 2005). Kabul edilebilir maksimum sapmadan daha fazla sapan tüm ölçümler elendikten sonra kalan sonuçlarla yeniden aritmetik ortalama hesaplanmaktadır (Akman, 1978).

**Çizelge 3.5 :** Bir sonucu elemek için gereken Şovöne kriteri.

| Okuma sayısı (N) | Kabul edilebilir maksimum sapma/standart sapma oranı |
|---|---|
| 2 | 1.15 |
| 3 | 1.38 |
| 4 | 1.54 |
| 5 | 1.65 |
| 6 | 1.73 |
| 7 | 1.80 |
| 8 | 1.87 |
| 9 | 1.91 |
| 10 | 1.96 |
| 12 | 2.04 |
| 15 | 2.13 |
| 20 | 2.24 |
| 25 | 2.33 |
| 50 | 2.57 |
| 100 | 2.81 |
| 300 | 3.14 |
| 500 | 3.29 |
| 1000 | 3.48 |

# 4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE İRDELENMESİ

Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimerin geliştirilmesi amacıyla, Bölüm 3'te açıklanan ön kabuller, malzeme bileşenleri ve deneysel süreç izlenerek deneysel çalışmaya ait veriler elde edilmiştir. Doğal puzolan esaslı jeopolimer üretimine yönelik olarak etkinliği araştırılan parametrelere ait toplu deney sonuçları Çizelge 4.1'de, doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer üretimine yönelik olarak etkinliği araştırılan parametrelere ait toplu deney sonuçları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu verilere dayanarak, bu bölümde doğal puzolan esaslı jeopolimer bağlayıcı ve köpük haline getirilmiş jeopolimer geliştirmek üzere yapılan deneylerde elde edilen veriler:

- Jeopolimer bağlayıcının kimyasal bileşimi, aktivatör türü, kür koşulları, alkali hidroksit konsantrasyonu, aktivatör oranı, toplam alkali aktivatör / puzolan oranı parametreleri açısından;
- Hafif jeopolimer köpüğün ince kum / puzolan ve alüminyum tozu / puzolan oranı parametreleri açısından

değerlendirilmiş ve irdelenmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Doğal puzolan esaslı jeopolimer üretimi deney sonuçları.

| Aşama | Numune kodu | Kür koşulları | Özgül kütle ($g/cm^3$) | | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | | Kapilarite katsayısı ($cm/\sqrt{dk}$) | | Kütlece su emme oranı (%) | | Porozite (%) | | Ultrases hızı (km/s) | | Eğilmede çekme dayanımı (MPa) | | Basınç dayanımı (MPa) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Variasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) |
| i | 7.5N-0-0.3 | 70°CPE kaplı | | | | | | | | | | | | | 1.33 | 1.07 | 3.02 | 0.80 |
| | 7.5K-0-0.3 | | | | | | | | | | | | | | 1.40 | 1.67 | 3.33 | 0.84 |
| | 7.5SN-1-0.3 | | | | | | | | | | | | | | 1.45 | 1.42 | 3.75 | 0.92 |
| | 7.5SK-1-0.3 | | | | | | | | | | | | | | 1.75 | 1.32 | 5.78 | 0.56 |
| ii | 7.5SK-1-0.3 | 70°C PE kaplı | | | | | | | | | | | | | 1.75 | 1.32 | 5.78 | 0.56 |
| | | 70°C PE'siz | | | | | | | | | | | | | 0.45 | 1.09 | 4.26 | 0.58 |
| | | 90° PE kaplı | | | | | | | | | | | | | 1.90 | 1.51 | 9.36 | 0.68 |
| | | 90°C PE'siz | | | | | | | | | | | | | 0.68 | 1.76 | 5.60 | 1.00 |
| iii | 7.5SK-1-0.3 | 90°C PE kaplı | 2.60 | 0.21 | 2.00 | 0.28 | 0.1040 | 1.35 | 7.61 | 1.73 | 23.08 | 0.00 | 2.51 | 0.85 | 2.59 | 1.25 | 4.62 | 1.48 |
| | 7.5SK-1.5-0.3 | | 2.60 | 0.35 | 2.00 | 0.52 | 0.1070 | 1.32 | 7.43 | 0.69 | 22.90 | 1.47 | 2.63 | 1.13 | 2.75 | 1.48 | 4.80 | 1.79 |
| | 7.5SK-2-0.3 | | 2.59 | 0.55 | 2.01 | 0.26 | 0.1119 | 1.32 | 7.31 | 1.68 | 22.50 | 1.68 | 2.73 | 1.45 | 2.83 | 1.24 | 5.51 | 1.20 |
| | 7.5SK-2.5-0.3 | | 2.58 | 0.20 | 2.01 | 0.53 | 0.1200 | 1.24 | 7.19 | 1.48 | 22.25 | 1.68 | 2.84 | 1.19 | 3.25 | 1.64 | 6.16 | 1.46 |
| | 10SK-1-0.3 | | 2.62 | 0.13 | 2.02 | 0.28 | 0.1220 | 1.16 | 7.01 | 1.42 | 22.52 | 0.70 | 2.80 | 1.62 | 3.41 | 1.38 | 4.82 | 1.70 |
| | 10SK-1.5-0.3 | | 2.61 | 0.28 | 2.03 | 0.50 | 0.1251 | 1.23 | 6.98 | 1.21 | 22.30 | 1.20 | 2.86 | 1.17 | 3.67 | 1.72 | 5.00 | 1.18 |
| | 10SK-2-0.3 | | 2.61 | 0.28 | 2.03 | 0.27 | 0.1270 | 1.32 | 6.92 | 1.03 | 22.17 | 0.60 | 2.90 | 1.64 | 3.74 | 1.03 | 5.64 | 1.31 |
| | 10SK-2.5-0.3 | | 2.61 | 0.20 | 2.04 | 0.44 | 0.1292 | 1.14 | 6.86 | 1.51 | 21.84 | 0.95 | 2.94 | 1.22 | 4.23 | 1.30 | 6.29 | 1.65 |
| | 12.5SK-1-0.3 | | 2.61 | 0.17 | 2.05 | 0.49 | 0.1255 | 0.96 | 6.38 | 1.33 | 21.47 | 1.25 | 2.90 | 1.59 | 4.63 | 1.16 | 6.17 | 0.95 |
| | 12.5SK-1.5-0.3 | | 2.62 | 0.24 | 2.06 | 0.31 | 0.1270 | 0.84 | 5.87 | 1.66 | 21.29 | 0.52 | 2.93 | 1.71 | 4.76 | 1.71 | 6.25 | 1.41 |
| | 12.5SK-2-0.3 | | 2.62 | 0.52 | 2.07 | 0.33 | 0.1291 | 0.82 | 5.76 | 1.73 | 21.20 | 0.76 | 2.96 | 1.26 | 4.82 | 1.20 | 7.9 | 1.57 |
| | 12.5SK-2.5-0.3 | | 2.63 | 0.38 | 2.08 | 0.25 | 0.1310 | 0.89 | 5.48 | 1.68 | 21.00 | 0.94 | 3.13 | 1.73 | 5.47 | 1.69 | 10.57 | 2.86 |
| | 15SK-1-0.3 | | 2.62 | 0.39 | 1.99 | 0.17 | 0.1051 | 1.25 | 8.00 | 1.46 | 23.85 | 0.43 | 2.46 | 1.79 | 2.49 | 1.68 | 4.34 | 2.10 |
| | 15SK-1.5-0.3 | | 2.61 | 0.20 | 1.99 | 0.23 | 0.1085 | 1.17 | 7.76 | 1.74 | 23.76 | 0.45 | 2.67 | 1.68 | 2.70 | 1.47 | 4.65 | 1.37 |
| | 15SK-2-0.3 | | 2.61 | 0.51 | 2.00 | 0.42 | 0.1120 | 1.19 | 7.55 | 1.34 | 23.45 | 0.42 | 2.80 | 1.56 | 2.87 | 1.04 | 5.38 | 0.94 |
| | 15SK-2.5-0.3 | | 2.61 | 0.30 | 2.00 | 0.48 | 0.1156 | 1.12 | 7.31 | 1.05 | 23.30 | 1.17 | 2.86 | 1.70 | 3.16 | 1.63 | 6.00 | 0.78 |

**Çizelge 4.1 (devam) :** Doğal puzolan esaslı jeopolimer üretimi deney sonuçları.

| Aşama | Numune kodu | Kür koşulları | Özgül kütle (g/cm$^3$) | | Birim hacim ağırlık (g/cm$^3$) | | Kapilarite katsayısı (cm/√dk) | | Kütlece su emme oranı (%) | | Porozite (%) | | Ultrases hızı (km/s) | | Eğilmede çekme dayanımı (MPa) | | Basınç dayanımı (MPa) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) |
| iv | 12.5SK-2.5-0.1 | 90°CPE kaplı | 2.64 | 0.39 | 1.14 | 0.31 | 0.0816 | 0.82 | 9.14 | 1.49 | 56.65 | 0.17 | 1.90 | 1.14 | 1.00 | 1.02 | 2.50 | 1.81 |
| | 12.5SK-2.5-0.2 | | 2.63 | 0.26 | 1.40 | 0.63 | 0.1123 | 0.91 | 7.65 | 1.10 | 46.96 | 0.61 | 2.58 | 1.68 | 2.21 | 1.70 | 4.88 | 0.75 |
| | 12.5SK-2.5-0.3 | | 2.63 | 0.38 | 2.08 | 0.25 | 0.1310 | 0.89 | 5.48 | 1.68 | 21.00 | 0.94 | 3.13 | 1.73 | 5.47 | 1.69 | 10.57 | 2.86 |
| | 12.5SK-2.5-0.4 | | 2.54 | 0.38 | 1.30 | 0.92 | 0.0560 | 0.88 | 7.04 | 1.75 | 48.94 | 1.14 | 2.33 | 1.76 | 3.07 | 1.68 | 3.83 | 1.26 |
| | 12.5SK-2.5-0.5 | | 2.67 | 0.84 | 1.15 | 0.86 | -- | -- | 8.27 | 0.99 | 57.04 | 1.47 | 1.95 | 0.97 | 1.70 | 1.21 | 2.52 | 1.94 |

**Çizelge 4.2 :** Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer üretimi deney sonuçları.

| Aşama | Numune kodu | Özgül kütle (g/cm$^3$) | | Birim hacim ağırlık (g/cm$^3$) | | Kütlece su emme oranı (%) | | Porozite (%) | | Ultrases hızı (km/s) | | Eğilmede çekme dayanımı (MPa) | | Basınç dayanımı (MPa) | | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) | Ortalama | Varyasyon katsayısı (%) |
| i | SK-20/100-0.5 | 2.20 | 0.28 | 0.51 | 0.76 | 69.63 | 1.16 | 76.80 | 0.39 | 1.25 | 0.69 | 0.90 | 1.26 | 1.39 | 1.54 | | |
| | SK-25/100-0.5 | 2.00 | 0.73 | 0.55 | 0.73 | 66.09 | 1.14 | 72.72 | 0.68 | 1.28 | 0.81 | 1.02 | 1.13 | 1.63 | 1.84 | | |
| | SK-33/100-0.5 | 2.02 | 0.63 | 0.59 | 0.88 | 59.15 | 1.46 | 70.62 | 0.28 | 1.32 | 0.52 | 1.15 | 1.35 | 1.76 | 1.58 | | |
| | SK-50/100-0.5 | 2.03 | 0.47 | 0.64 | 1.12 | 54.04 | 1.66 | 68.47 | 0.51 | 1.44 | 1.16 | 1.37 | 1.01 | 1.95 | 1.62 | | |
| | SK-100/100-0.5 | 2.36 | 0.39 | 0.85 | 0.66 | 48.02 | 1.10 | 64.01 | 0.38 | 1.60 | 0.86 | 1.62 | 1.69 | 2.52 | 0.91 | | |
| ii | SK-20/100-0 | 2.28 | 0.62 | 1.29 | 0.78 | 28.69 | 1.68 | 43.72 | 1.10 | 1.95 | 0.87 | 3.92 | 1.27 | 5.69 | 0.78 | 0.312 | 1.59 |
| | SK-20/100-0.25 | 2.17 | 0.65 | 0.60 | 0.58 | 63.68 | 1.53 | 72.31 | 0.37 | 1.41 | 0.68 | 1.22 | 1.03 | 2.09 | 1.25 | 0.134 | 0.66 |
| | SK-20/100-0.5 | 2.20 | 0.28 | 0.51 | 0.76 | 69.63 | 1.16 | 76.80 | 0.39 | 1.25 | 0.69 | 0.90 | 1.26 | 1.39 | 1.54 | 0.088 | 0.89 |
| | SK-20/100-1.0 | 2.37 | 0.61 | 0.48 | 1.23 | 74.75 | 1.68 | 79.69 | 0.11 | 0.90 | 0.71 | 0.33 | 1.28 | 0.85 | 1.57 | 0.085 | 1.64 |
| | SK-20/100-1.5 | 2.68 | 0.33 | 0.46 | 0.62 | 79.32 | 1.65 | 82.66 | 0.41 | 0.65 | 0.40 | 0.12 | 1.00 | 0.40 | 1.82 | 0.076 | 1.21 |

## 4.1 Doğal Puzolan Esaslı Jeopolimer Bağlayıcı Üretimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

### 4.1.1 Datça Puzolanı'nın kimyasal bileşiminin jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

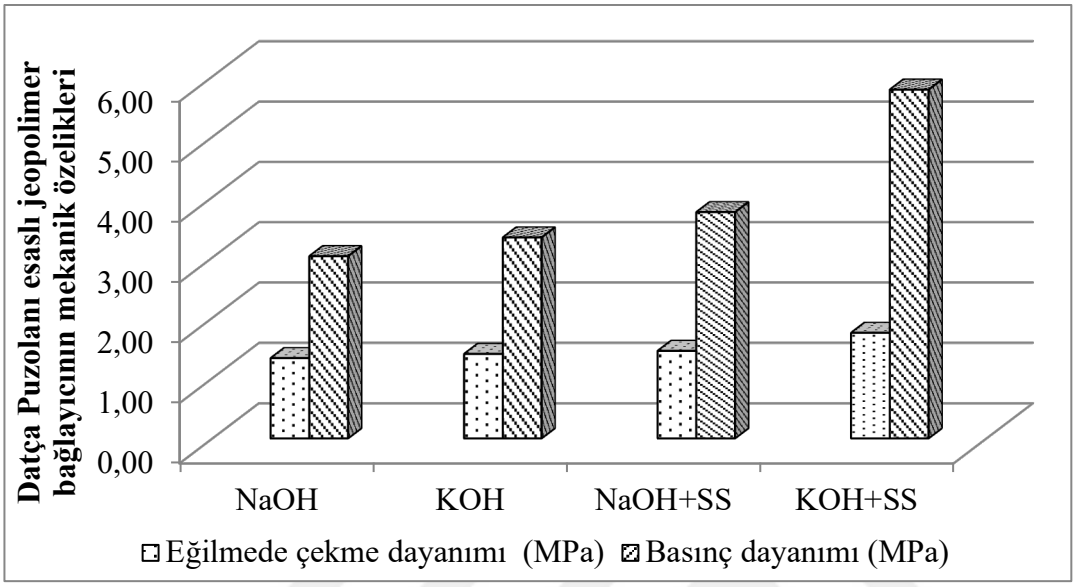
Jeopolimer kimyasındaki yaygın oksitler ($SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$ ve CaO) içerisinde, alümin ($Al_2O_3$) ve silis ($SiO_2$) jeopolimerik ağ oluşumunu ve mukavemet gelişimini kontrol eden iki temel oksittir. Si-O-Al-O bağlarından oluşan üç boyutlu polimerik zincir ve halka yapısının oluşmasını sağlamak için reaksiyona giren bileşenlerin kalsiyum oranı düşük olmalıdır (Firdous ve diğ., 2018). Çizelge 4.3'te Datça Puzolanı'nın kimyasal bileşimi ve Datça Puzolanı ile üretilen harcın karışım oranı ve basınç dayanımı değerleri diğer doğal puzolan esaslı jeopolimer harçlarınkiyle kıyaslanmaktadır. Çizelge 4.3'teki kimyasal bileşim, alkali hidroksit konsantrasyonu, aktivatör oranı, aktivatör/puzolan ve kum/puzolan oranları ve kür koşulları dikkate alındığında, Bigadiç puzolanı (Değirmenci, 2018) ve Nevşehir volkanik tüfünün (Kantarcı, 2019) basınç dayanımı aralığı Datça Puzolanı esaslı bağlayıcıya yakındır. Ancak Ürdün doğal puzolanı-esaslı jeopolimer harcın (Haddad ve Lababneh, 2020) basınç dayanımı (17 MPa), Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harca nazaran yaklaşık 1.60 kat daha yüksektir. Bunun nedeni Ürdün Puzolanı'nın $SiO_2/Al_2O_3$ molar oranının (2.9) Datça Puzolanı'na (4.70) nazaran daha düşük olması gösterilebilir. Çünkü yüksek miktarda amorf silis ($SiO_2$) ve alümin ($Al_2O_3$) sahip ve düşük $SiO_2/Al_2O_3$ molar oranı içeren numunelerin basınç dayanımı daha yüksektir (Ferna´ndez-Jime´nez ve Palomo, 2003; Ndjock ve diğ., 2017; Tchadjie ve Ekolu, 2018). Örneğin 3.4-3.8 aralığında $SiO_2/Al_2O_3$ molar orana sahip metakaolin yüksek dayanım gelişimi göstermekte iken (De Silva ve diğ., 2007); 3.8'den daha yüksek reaktif $SiO_2/Al_2O_3$ molar oranına sahip uçucu külde zeolitik fazlar gelişmiş ve basınç dayanımı gelişimi düşmüştür (Tennakoon ve diğ., 2015). Ancak, kimyasal bileşim ve malzemenin reaktivitesi arasındaki karşılıklı ilişki o kadar karmaşık bir konudur ki, jeopolimerik reaktivitenin sadece reaksiyon öncüsü malzemelerin kimyasal bileşimine dayalı olduğu kesin olarak ifade edilemez. Tanecik şekli, boyutu, tanecik boyutu dağılımı, puzolanik maddenin camsı faz miktarı gibi jeopolimerik reaktiviteyi etkileyebilecek diğer faktörlerin tümü birbiriyle ilişkilidir ve belirli bir hammadde incelenirken tek tek ele alınamayabilir (Tchadjie ve Ekolu, 2018).

**Çizelge 4.3 :** Farklı doğal puzolanların kimyasal bileşimlerinin ve bu puzolan esaslı jeopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımlarının karşılaştırılması.

| Referans | Alüminosilikat kaynağı | Puzolanın kimyasal bileşimi | | | | Karışım parametreleri | | | | Kür koşulları[1] | 7 günlük basınç dayanımı | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $SiO_2/Al_2O_3$ | CaO | Alkali hidroksit konsantrasyonu | Aktivatör oranı | Aktivatör/ puzolan | Kum/ puzolan | | | |
| Haddad ve Lababneh, 2020 | Ürdün doğal puzolanı, Ürdün | 40.17 | 13.86 | 2.89 | 9.70 | 10-12 M | 2.0-2.5 | 0.3 | 3.0 | 60 °C 24 saat | 10M SS/NaOH=2.0<br>10M SS/NaOH=2.5<br>12M SS/NaOH=2.0<br>12M SS/NaOH=2.5 | 17.0<br>17.5<br>15.2<br>15.5 |
| Değirmenci, 2018 | Bigadiç doğal zeoliti, Türkiye | 68.3 | 10.97 | 6.22 | 3.24 | 8-12 M | 1.0-3.0 | 0.3 | 3.0 | 30 °C 7 gün | 10M SS/NaOH=2.0<br>10M SS/NaOH=3.0<br>12M SS/NaOH=2.0<br>12M SS/NaOH=3.0 | ~3<br>~4<br>~5<br>~6 |
| Kantarcı ve diğ., 2019 | Nevşehir volkanik tüfü Türkiye | 77.22 | 18.89 | 4.08 | 0.27 | 10-16M | 1.2-2.5 | 0.35 | 2.0 | 90 °C 24 saat | 10 M SS/NaOH=1.5<br>10 M SS/NaOH=2.0<br>10 M SS/NaOH=2.4 | 9.5-13<br>13-15<br>10.5-14 |
| **Bu çalışma** | **Datça Puzolanı, Türkiye** | 75.28 | 15.99 | 4.70 | 1.22 | 7.5-15 M | 1.0-2.5 | 0.3 | 3.0 | 90 °C 24 saat | 10M SS/KOH=1.0<br>10M SS/KOH=1.5<br>10M SS/KOH=2.0<br>10M SS/KOH=2.5<br>12.5M SS/KOH=1.0<br>12.5M SS/KOH=1.5<br>12.5M SS/KOH=2.0<br>12.5M SS/KOH=2.5 | 4.82<br>5.00<br>5.64<br>6.29<br>6.17<br>6.25<br>7.9<br>10.57 |

### 4.1.2 Alkali aktivatör türünün jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının mekanik özelikleri üzerinde alkali aktivatör türünün etkisi Şekil 4.1'de verilmiştir.




**Şekil 4.1 :** Çeşitli alkali aktivatörlerle aktive edilmiş Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının mekanik özelikleri.

KOH esaslı aktivatörler NaOH esaslı aktivatörlere nazaran daha yüksek dayanıma sahip numune üretilmesine olanak tanımaktadır. Yalnızca KOH aktive edilmiş bağlayıcının eğilmede çekme ve basınç dayanımı yalnızca NaOH aktive edilmiş muadiline nazaran sırasıyla 1.06 ve 1.11 kat daha yüksektir. Ayrıca, SS+KOH ile aktive edilmiş numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı aynı koşullar altında SS+NaOH ile aktive edilmiş numunelere nazaran sırasıyla 1.21 ve 1.54 kat daha yüksektir.

Mekanik özeliklerdeki bu farklılık alkali aktivatör türünün, jeopolimerleşmenin çözünme ve polikondansasyon reaksiyonlarının gelişimini etkilemesiyle ilişkili olabilmektedir. Daha düşük iyon çapına sahip olan $Na^+$, daha yüksek derecede çözünmeye yol açar ve daha küçük silikat oligomerleriyle katyon-anyon iyon çifti reaksiyonu gösterir. Bu tür iyon çiftleri, başka bir silikat anyonuyla eşleşmediğinden daha büyük silikat oligomerlerinin oluşumu engellenir. Buna ek olarak, $Al(OH)^{4-}$ bileşiği monomer gibi daha küçük silikat oligomerleriyle kolayca bağ yapamaz. Diğer yandan, daha büyük iyon çapına sahip olan $K^+$, $Al(OH)^{4-}$ bileşiğinin kolayca bağ yapabileceği daha büyük silikat oligomerlerinin oluşumunu sağlar. Bundan dolayı,

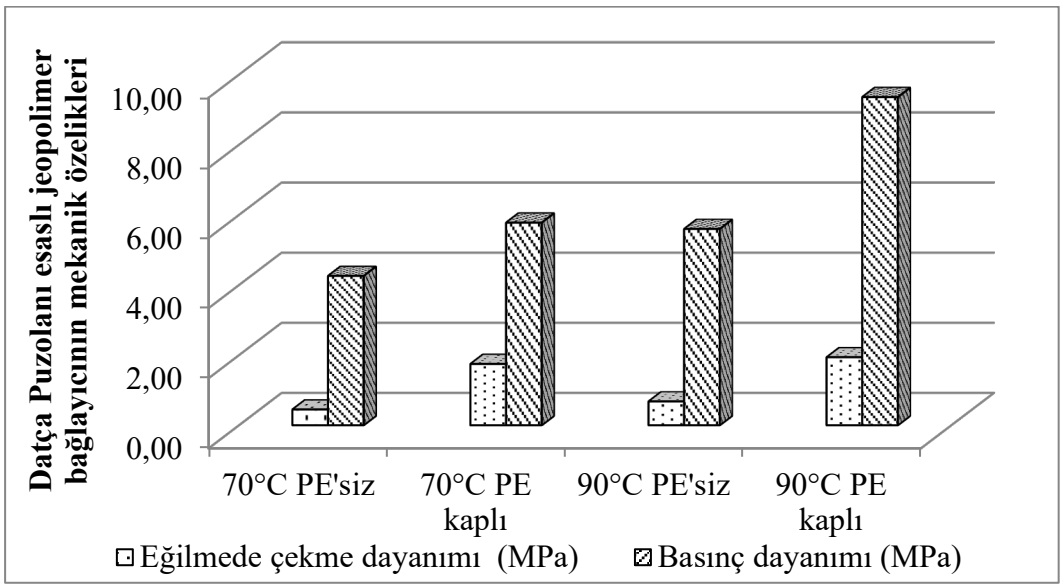
KOH ile aktive edilmiş karışımlarda daha fazla miktarda jeopolimer öncüsü oluşur ve daha yüksek mekanik özeliklere sahip malzeme üretilir (Xu ve Van Deventer, 2000). Ayrıca KOH, matrisin mekanik özeliklerini daha da arttıran ve daha yüksek dayanıma sahip jeopolimer malzeme üretmeye yarayan polikondansasyon reaksiyonlarının derecesini arttırır (Phair ve Van Deventer, 2002). NaOH aktive edilmiş numunelere nazaran KOH aktive edilmiş numunelerde görülen daha yüksek mekanik özelikler literatürde Taftan ve Shahindej doğal puzolanı (Bondar ve diğ., 2011a), Kamerun volkanik külü (Lemougna ve diğ., 2013), yüksek fırın cürufu ve Taftan puzolanı (Nadoushan ve Ramezanianpour, 2016; Szklorzova ve Bilek, 2008) ve dip külü (Chen ve diğ., 2012) esaslı jeopolimer bağlayıcılarda da tespit edilmiştir.

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcı karışımında SS ($Na_2SiO_3$) çözeltisinin bulunması mekanik özeliklerde artışa neden olmuştur. Yalnızca NaOH ile aktive edilen numunelere nazaran SS+NaOH ile aktive edilen numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı sırasıyla 1.10 ve 1.24 kat daha yüksektir. Ayrıca, yalnızca KOH ile aktive edilen numunelere nazaran SS+KOH ile aktive edilen numunelerin eğilmede çekme ve basınç dayanımı sırasıyla 1.25 ve 1.73 kat daha yüksektir. NaOH veya KOH esaslı karışımlara SS eklenmesiyle mekanik özeliklerde görülen artış şu etkenlere bağlı olabilmektedir: (i) SS alüminosilikat kaynağındaki Si ve Al'un çözünme oranını artırmaktadır; (ii) Alüminosilikat kaynağındaki Al–O bağları Si–O bağlarından daha zayıf olduğundan alkali ortamda Al iyonları kolayca çözünür. Eğer puzolanın çözülmesinden önce reaksiyon ortamına ek olarak Si iyonları eklenirse jeopolimerleşme derecesi artabilir (Nadoushan ve Ramezanianpour, 2016).

Basınç dayanımının jeopolimerleşme derecesinin bir göstergesi olduğu bilinmektedir (Galiano ve diğ., 2016). Ayrıca, karışımda SS'ın bulunması daha güçlü iyon çifti oluşumu sağlar ve bu, Al–O–Si bileşeni yani diğer bir değişle jeopolimer öncülerinin yanısıra, daha fazla miktarda uzun-zincirli silikat oligomerlerinin oluşumuna neden olur. Daha fazla miktarda uzun-zincirli silikat oligomerlerinin bulunması, jeopolimer öncülerinin daha kolay oluşması anlamına gelmektedir (Xu ve Van Deventer, 2000). Bundan dolayı, karışıma SS eklemek jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimini desteklemek için önemlidir.

### 4.1.3 Kür koşullarının jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Jeopolimer bağlayıcının mekanik özeliklerinin kür koşullarına karşı çok duyarlı olduğu bilinmektedir. 25-90 °C arasında kür sıcaklığı jeopolimerleşme reaksiyonlarının gelişimi için gereklidir (Allahverdi ve diğ., 2008b). Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının özelikleri üzerinde farklı kür koşullarının etkisi Şekil 4.2'de verilmiştir.




**Şekil 4.2 :** 7.5 M SS+KOH ile aktive edilen Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının farklı kür koşulları altındaki mekanik özelikleri.

Kür sıcaklığının 70 °C'den 90 °C'ye arttırılmasıyla, PE kaplanmadan (% 10±5 bağıl nemde) kürlenen numunelerin basınç dayanımı 1.31 kat artarken, PE kaplanarak (% 90±5 bağıl nemde) kürlenen numunelerinki 1.62 kat artmıştır. Buna paralel olarak, PE kaplanmadan ve kaplanarak kürlenen numunelerin eğilmede çekme dayanımları sırasıyla 1.51 ve 1.10 kat artmıştır. Kür sıcaklığındaki artış, katı alüminosilikat kaynağındaki silis ve alümin bileşenlerinin çözünme ve polikondansasyon reaksiyonlarının hızını arttırmaktadır (Ahmari ve Zhang, 2012). Diğer yandan, daha yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleşen polikondansasyon ve jeopolimer jelin daha hızlı oluşumu, silis ve alümin bileşenlerinin daha fazla çözünmesini engelleyebilmekte ve bu durum mekanik özelikleri negatif yönde etkileyebilmektedir. Buna ek olarak, daha yüksek sıcaklıklar altında numunenin su oranının buharlaşmayla hızlıca azalması jeopolimerleşmenin tamamlanmasını engelleyebilmekte (Ahmari ve Zhang, 2012) ve rötre çatlakları oluşarak malzemede dayanım kaybı görülebilmektedir (Takeda ve diğ.,

2014; Haddad ve Alshbuol, 2016). Bu nedenlerden dolayı, malzemedeki nemliliği koruması bakımından PE kaplı koşullarda kürleme yapmak önemlidir.

70 °C ve 90 °C'de PE kaplı halde kürlenen numunelerin basınç dayanımları, PE kaplanmadan kürlenen numunelerinkine nazaran sırasıyla 1.35 ve 1.67 kat daha yüksektir. Ayrıca, PE kaplı halde kürlenen numunelerin eğilmede çekme dayanımı da PE kaplanmadan kürlenenlere nazaran 3.88 ve 2.79 kat daha yüksektir. PE kaplanmadan kürlenen numunelerdeki dayanım azalması, numunelerin önemli ölçüde nem kaybetmesinden kaynaklanabilmektedir. Buna ek olarak, PE kaplanmadan kürlenen numunelerin yüzeyindeki kuruma rötresinden kaynaklanan görünür çatlaklar, daha düşük mekanik dayanım sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Bundan dolayı, yüksek mekanik özeliklere sahip çatlaksız bir jeopolimer üretmek için hızlı kuruma önlenmeli (Haddad ve Alshbuol, 2016) ve ısı kürü nemli ortam koşullarında gerçekleştirilmelidir.

Kür sıcaklığının 70 °C'den 90 °C'ye artırılmasıyla PE kaplanarak kürlenen numunelerin eğilmede çekme dayanımının basınç dayanımına oranı 1/3.3'ten 1/4.9'a azalmıştır. Ayrıca, sıcaklığın artmasıyla PE kaplanmadan kürlenen numunelerin de eğilmede çekme dayanımının basınç dayanımına oranı 1/8.2'den 1/9.4'e azalmıştır. Bu sonuç, kür sıcaklığı artışının jeopolimer bağlayıcıyı daha gevrek ve kırılmalara karşı daha duyarlı hale getirdiğini gözler önüne sermektedir. Genellikle gevrek malzemelerin çekme dayanımı basınç dayanımlarının yaklaşık 1/10'udur (Tanaçan, 1993). Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen eğilmede çekme dayanımı/basınç dayanımı oranlarının 1/10'dan daha yüksek olması numunelerin çeşitli yükler ve darbe etkileri altında çatlak oluşumuna karşı daha dayanıklı olduğu anlamına gelmektedir.

### 4.1.4. Jeopolimer bağlayıcı ve harç özeliklerinin kıyaslanması

Bağlayıcı malzemelerin harç, yapı tuğlası ya da blok üretiminde kullanılabilmesi için agrega eklenmesi gerekmektedir. Agrega harçların ana bileşenidir ve harç sistemlerinin 'iskeleti' olarak adlandırılır (Santos ve diğ., 2018). Bağlayıcıya agrega eklenmesi, üretilen harca hacim stabilitesi, dayanıklılık ve mukavemet kazandırmak gibi avantajlar sağlamaktadır. Çalışmada, bağlayıcıya granülometrisi Bölüm 3.1.3'te belirtilen CEN standart kumu eklenmiştir. Ancak, kum eklenmesi bağlayıcının basınç dayanımını azaltmıştır. Örneğin, 90 °C'de PE kaplı halde kürlenen bağlayıcı ve harç numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla 9.36 ve 3.15 MPa olarak tespit edilmiştir. Basınç dayanımında görülen 3 kat azalma, kum eklenmesinin bağlayıcı üzerindeki

seyreltici etkisine bağlanabilmektedir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da tespit edilmiştir (Lemougna ve diğ., 2011; Barbosa ve MacKenzie, 2003). Dayanımı azaltıcı bir etki gösterse bile, jeopolimer bağlayıcıya kum eklemek, bağlayıcı miktarını ve bunun sonucunda da üretim maliyetini azaltmak bakımından önemlidir. Ancak, malzemeden beklenen performans kriterlerinden ödün verilmeksizin kum miktarı düzenlenmelidir. Üretilen harcın puzolan/kum oranı 1/3 olarak sabit tutulmuştur. Farklı puzolan/kum oranlarının harcın mekanik özelikleri üzerindeki etkisi de ayrıca araştırılması gereken bir konudur.

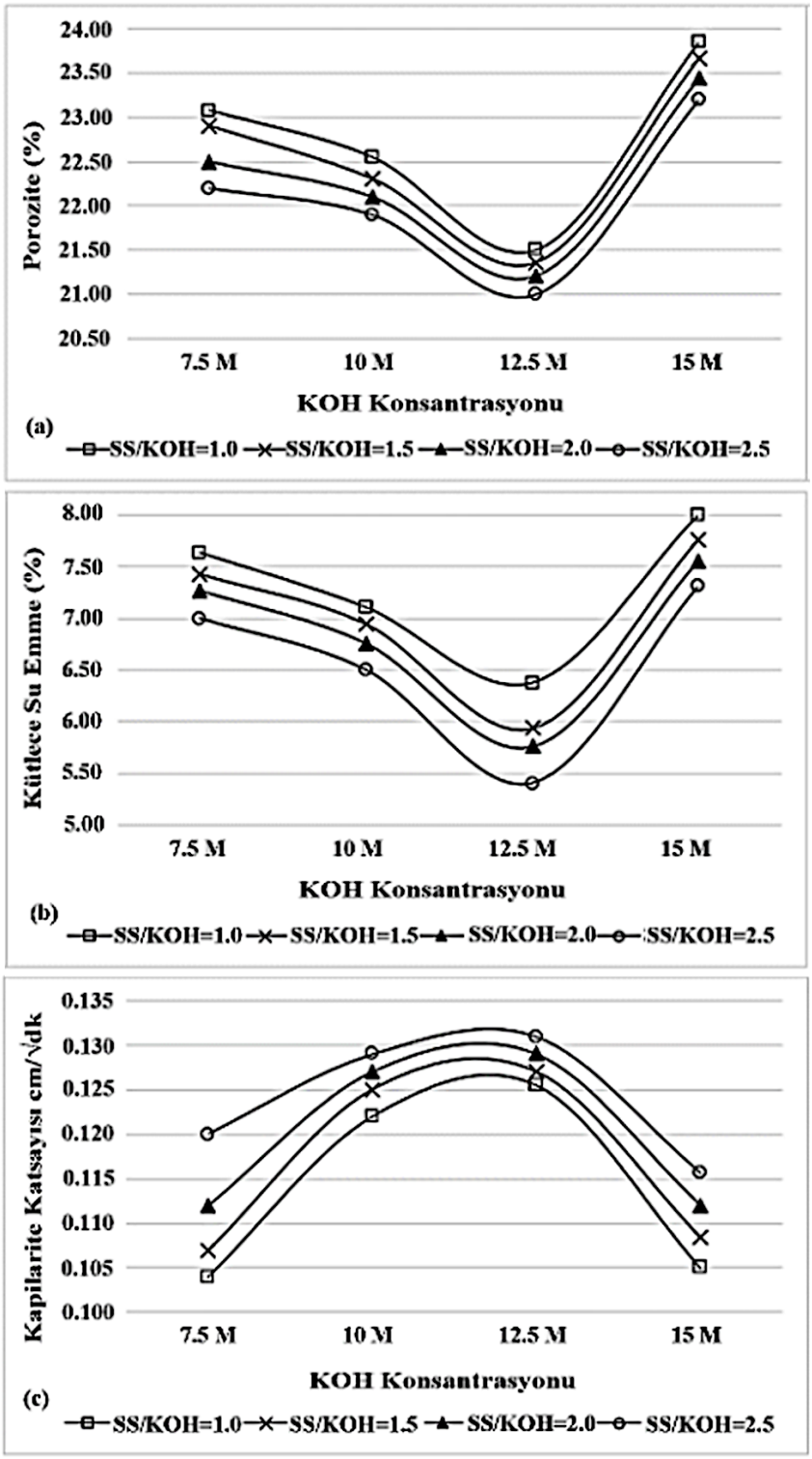
### 4.1.5. Alkali hidroksit konsantrasyonunun jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, değişen aktivatör oranlarına (SS/KOH: 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5) sahip SS+KOH ile aktive edilmiş jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde 7.5, 10, 12.5 ve 15 olarak belirlenen farklı alkali hidroksit (KOH) konsantrasyonlarının etkisi araştırılmış ve sonuçlar Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

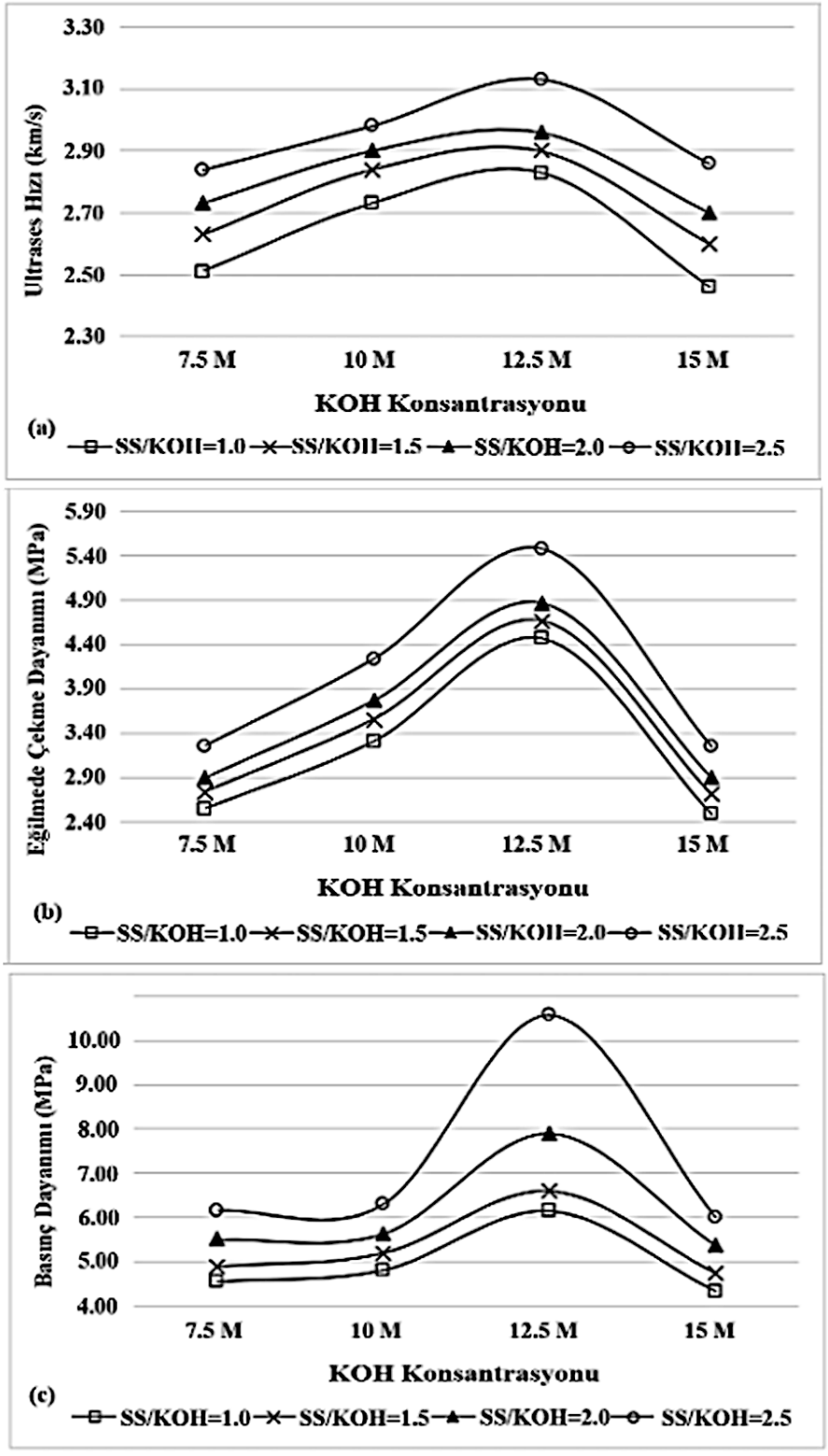
12.5 M KOH konsantrasyonu özeliklerin tersine çevrildiği noktadır. Aktivatör oranı sabit tutulduğunda, KOH molaritesinin 7.5 M'dan 12.5 M'a arttırılmasıyla numunelerin porozite ve su emme oranı azalmıştır. En düşük porozite (% 21.00) ve su emme oranı (% 5.48) 12.5 M KOH konsantrasyonuna ve 2.5 aktivatör oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. Kapilarite katsayısında görülen artış, harcın iç yapısındaki boşlukların daha dar ve birbirleriyle daha fazla bağlantılı olduğunu ve bunun sonucunda kapiler basıncın yüksek olduğunu gözler önüne sermektedir.

Fiziksel özeliklerde sözü edilen değişimler harcın strüktürel yapısının geliştiğini göstermektedir. Numunelerin ultrases hızı, elastiklik modülü, basınç ve eğilmede çekme dayanımları KOH molaritesinin artmasına bağlı olarak artmıştır. Özellikle aktivatör oranı 2.5 olan ve 12.5 KOH konsantrasyonuna sahip numunelerde mekanik özeliklerin artışı zirve yapmıştır ve bu numuneler en yüksek ultrases hızı (3.13 km/s), elastiklik modülü (20329 MPa), basınç (10.57 MPa) ve eğilmede çekme (5.47 MPa) dayanımına sahiptir. Bu gelişme, reaksiyon ortamında artan $OH^-$ konsantrasyonunun alüminosilikat kaynağının (yani Datça Puzolanı'nın) çözünmesini arttırması (Kani ve Allahverdi, 2009b) ve daha sonraki polikondansasyon reaksiyonlarının gelişimi için ortamda daha yüksek miktarda çözünmüş Si ve Al bileşiklerinin oluşması ile

açıklanabilir (Panagiotopoulou ve diğ., 2007). Bundan dolayı, Datça Puzolanı'nı 12.5 KOH çözeltisi ile aktive etmek, toprağın daha yüksek oranda çözünmesine ve böylece daha az boşluklu ve geçirgen ve daha yüksek mukavemetli bir jeopolimer yapının oluşmasını sağlamıştır.




**Şekil 4.3 :** Farklı aktivatör oranına sahip numunelerin fiziksel özelikleri üzerinde KOH konsantrasyonunun etkisi.




**Şekil 4.4 :** Farklı aktivatör oranına sahip numunelerin mekanik özelikleri üzerinde KOH konsantrasyonunun etkisi.

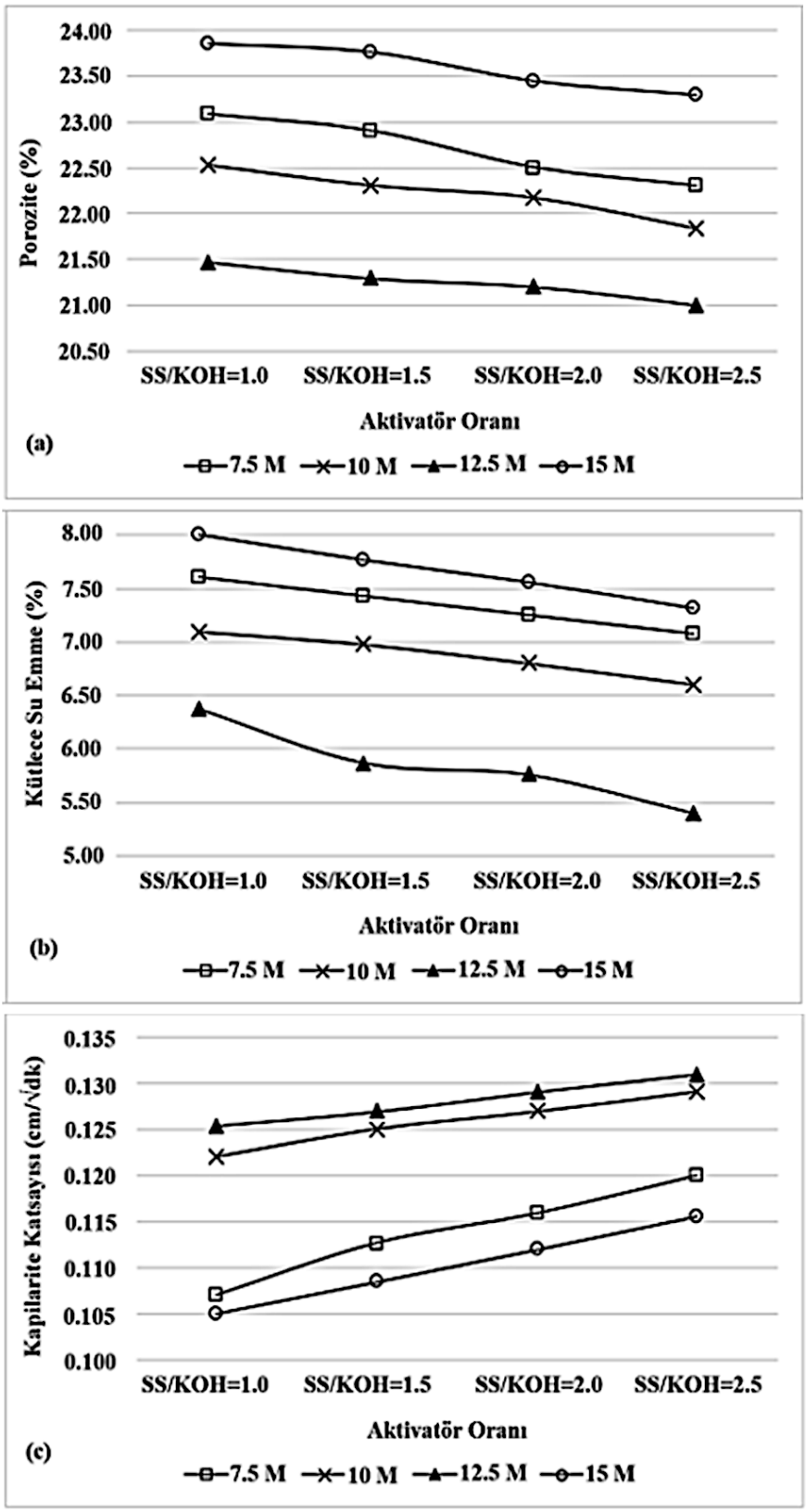
Aktivatör oranı sabit tutulduğunda, KOH molaritesinin 12.5 M'dan 15 M'a arttırılmasıyla numunelerin porozite ve su emme oranı artmıştır. En yüksek porozite (% 23.85) ve su emme oranı (% 8.00), 15 M KOH konsantrasyonuna ve 1.0 aktivatör

oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. Kapilarite katsayısında görülen azalış, harcın iç yapısındaki boşlukların genişleyerek kapiler basıncı azalttığının bir göstergesidir. Fiziksel özeliklerde sözü edilen değişimler harcın strüktürel yapısının deforme olduğunu göstermektedir. 15 M KOH ile aktive edilen numunelerin mekanik özelikleri, 7.5, 10 ve 12.5 M KOH ile aktive edilen numunelerin gerisine düşmüştür. En düşük ultrases hızı (2.46 km/s), elastiklik modülü (12095 MPa), basınç (4.34 MPa) ve eğilmede çekme (2.49 MPa) dayanımı, 15 M KOH konsantrasyonuna ve 1.0 aktivatör oranına sahip numunelerde elde edilmiştir. Yani, alkali hidroksit konsantrasyonunun ideal değerden daha fazla arttırılması, gelişmemiş bir moleküler içyapıya neden olarak fiziksel ve mekanik özelikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sonuç, reaksiyon ortamında aşırı miktarda bulunan $OH^-$ iyonlarının polikondansasyon reaksiyonlarının daha erken ve daha hızlı gerçekleştirmesiyle açıklanabilmektedir. Polikondansasyon hızlanınca çözünme reaksiyonlarının gelişimi engellenebilmekte ve alüminosilikat kaynağı çözünmek için yeterli zaman bulamamaktadır (Kani ve Allahverdi, 2009b).

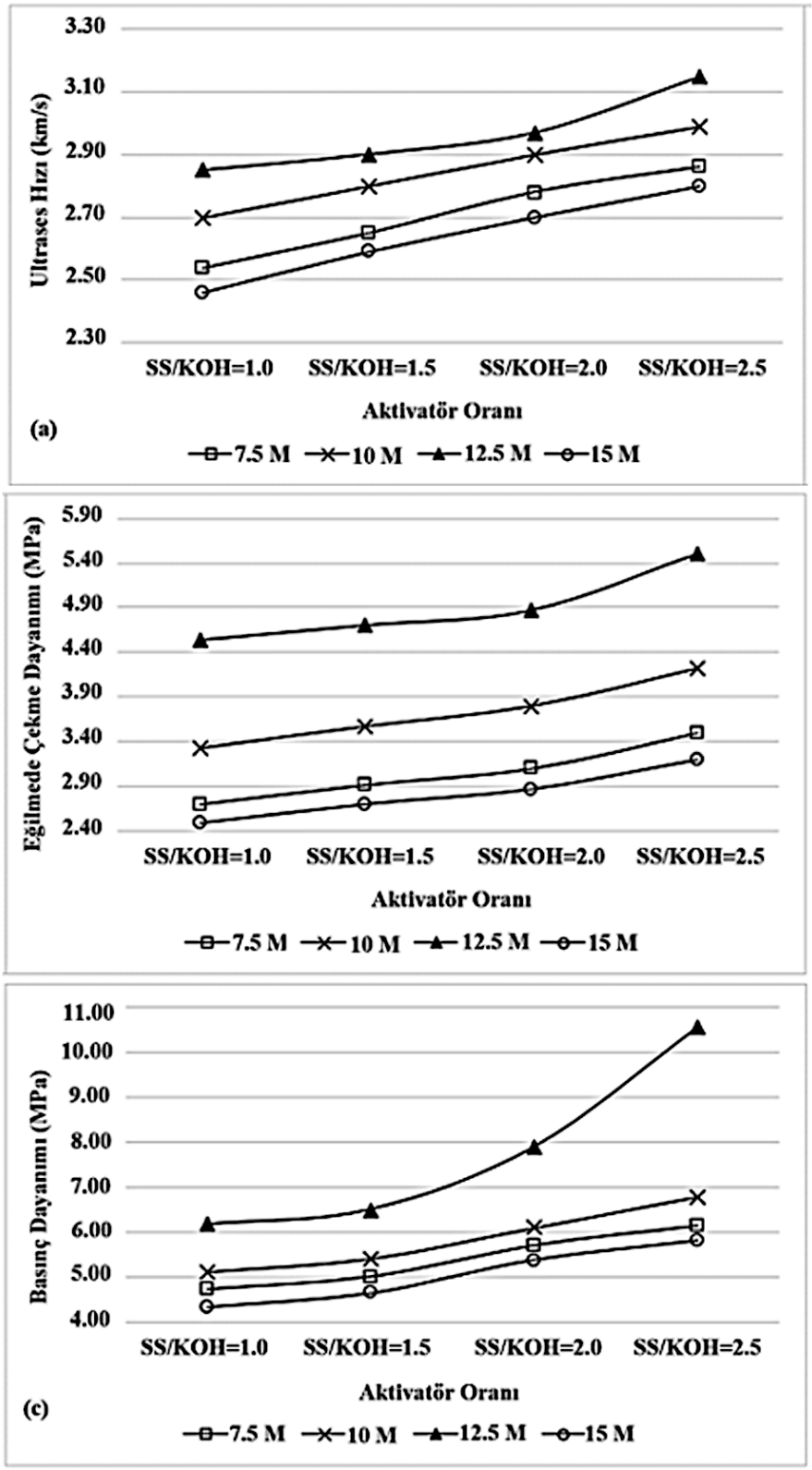
### 4.1.6. Aktivatör oranının jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, farklı KOH konsantrasyonlarına sahip SS+KOH ile aktive edilmiş jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri üzerinde farklı aktivatör oranlarının (SS/KOH: 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5) etkisi değerlendirilmektedir ve sonuçlar Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

KOH konsantrasyonu sabit tutulduğunda, aktivatör oranının 1.0'dan 1.5, 2.0 ve 2.5'a arttırılması porozite ve su emme oranında hafif bir azalmaya ve kapilarite katsayısında hafif bir artışa neden olmuştur. En düşük porozite (% 21.00) ve su emme oranı (% 5.48) ve en yüksek kapilarite katsayısı (0.1310 cm/√dk), aktivatör oranı 2.5 olan numunelerde tespit edilmiştir.




**Şekil 4.5 :** Farklı KOH konsantrasyonuna sahip numunelerin fiziksel özelikleri üzerinde aktivatör oranının etkisi.



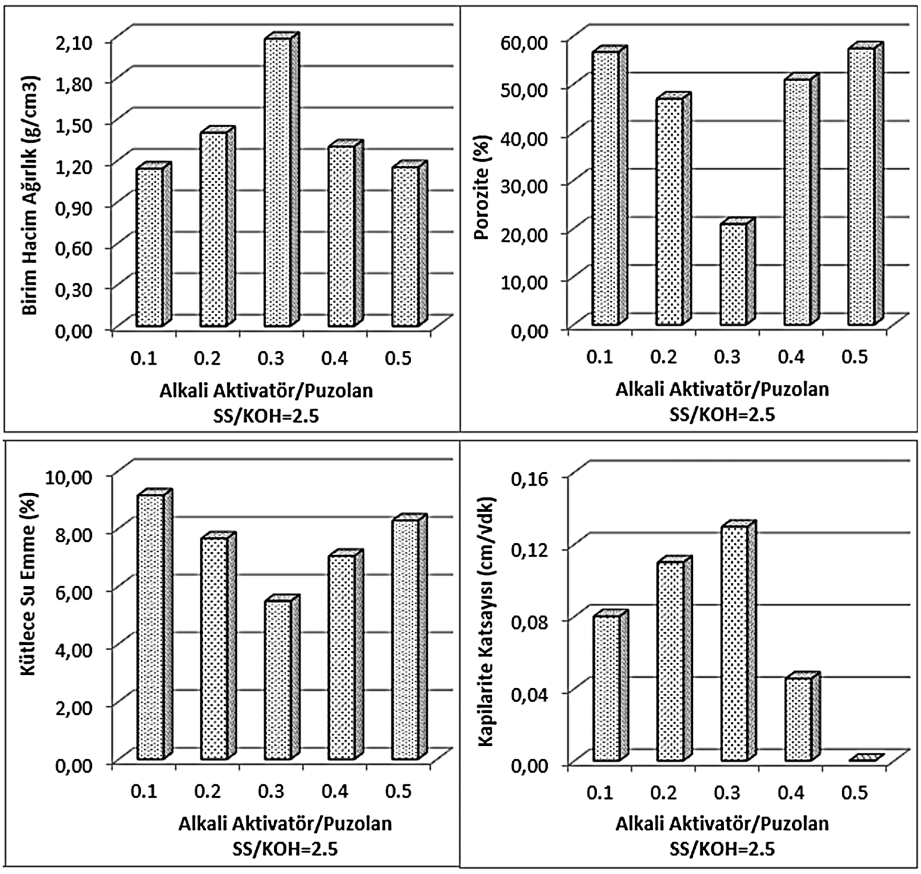

**Şekil 4.6 :** Farklı KOH konsantrasyonuna sahip numunelerin mekanik özelikleri üzerinde aktivatör oranının etkisi.

Fiziksel özeliklerdeki değişim çok fazla olmamasına rağmen mekanik özeliklerdeki artış oranı belirgindir. 12.5 M KOH konsantrasyonuna ve 2.5 aktivatör oranına sahip

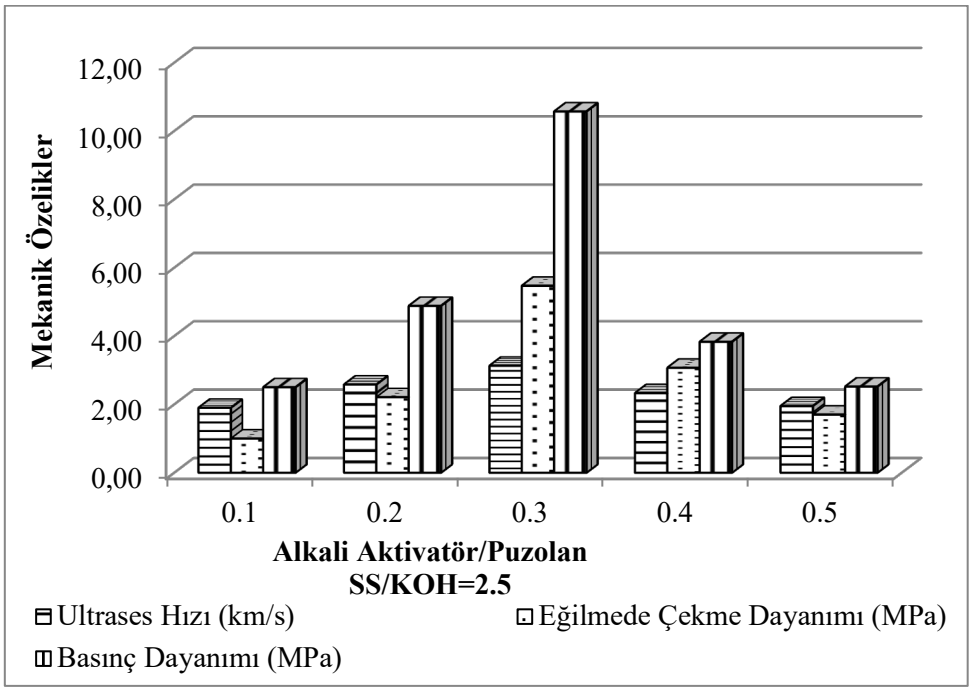
numuneler en yüksek ultrases hızı (3.13 km/s), elastiklik modülü (20329 MPa), basınç (10.57 MPa) ve eğilmede çekme (5.47 MPa) dayanımına sahiptir. Reaksiyon ortamına daha fazla SS eklenmesine bağlı olarak mekanik özeliklerde tespit edilen bu artışın nedeni Bölüm 4.1.2'de açıklanmıştı. Daha yüksek aktivatör oranı, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özeliklerini daha fazla yükseltmiştir. Ancak SS/KOH arasındaki oran düzenlenirken dikkatli olunmalıdır. Eğer daha fazla SS eklenirse, aşırı SS reaksiyon ortamındaki suyun buharlaşmasını engelleyebilir ve bu durum, malzemenin içyapısal gelişimini engelleyebilir ve böylece yukarıda sözü edilen özelikler azalabilir (Morsy, 2014). Bundan dolayı, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcı için ideal aktivatör oranı 2.5 olarak tespit edilmiştir. Öte yandan, ideal aktivatör oranı alüminosilikat kaynağının ve alkali aktivatörün türüne ve alkali/bağlayıcı oranına bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin, uçucu kül ve Pasuruan puzolanı karışımından üretilen jeopolimer bağlayıcının ideal aktivatör oranı 2.5 iken (Risdanareni ve diğ., 2015), yüksek fırın cürufundan üretilen jeopolimer bağlayıcı ve betonun ideal aktivatör oranı 2.0 (Hadi ve diğ., 2019) ve uçucu kül esaslı jeopolimer betonunki 1.5'tir (Nath ve Sarker, 2014).

### 4.1.7 Toplam alkali aktivatör / puzolan oranının jeopolimer harç özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Toplam alkali aktivatör / puzolan oranının SS+KOH ile aktive edilmiş jeopolimer harcın fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkisi Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Alkali aktivatör / puzolan oranının 0.1'den 0.2 ve 0.3'e kadar arttırılmasıyla jeopolimer harcın porozitesi ve kütlece su emme oranı azalmıştır. Daha az boşluklu bir içyapı gelişmesine bağlı olarak, birim hacim ağırlık azalmıştır. Kapilarite katsayısında tespit edilen artış, harcın iç boşluk çapının daha fazla küçülmesine bağlı olarak kapiler basıncın yükselmesiyle ilişkilidir. Alkali aktivatör / puzolan oranının 0.1'den 0.2 ve 0.3'e kadar arttırılmasıyla ultrases hızı, elastiklik modülü, eğilmede çekme ve basınç dayanımının artması harcın iç yapısının geliştiğinin bir diğer göstergesidir. Diğer yandan, alkali aktivatör / puzolan oranının 0.3'ten 0.4 ve 0.5'e kadar arttırılması, harç performansını olumsuz yönde etkilemiş, harç porozitesi 0.1 alkali / puzolan oranındaki seviyelerine kadar artarken birim hacim ağırlık azalmış ve kütlece su emme oranı artmıştır. Fiziksel özeliklerde tespit edilen azalma mekanik özeliklerdeki gerilemeyi de beraberinde getirmiş ve harcın ultrases hızı, elastiklik modülü, eğilmede çekme ve basınç dayanımı azalmıştır.

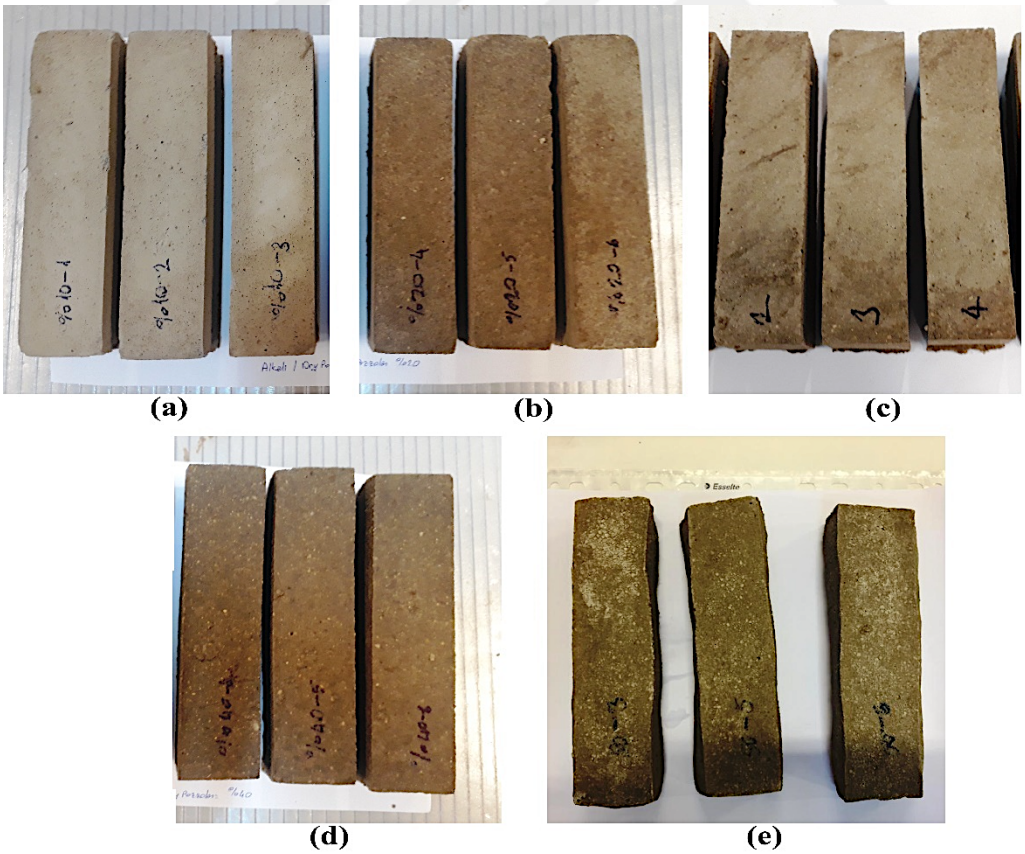



**Şekil 4.7 :** Toplam alkali aktivatör/puzolan oranının numunelerin fiziksel özelikleri üzerindeki etkisi.




**Şekil 4.8 :** Toplam alkali aktivatör/puzolan oranının numunelerin mekanik özelikleri üzerindeki etkisi.

Alkali aktivatör / puzolan oranı 0.1, 0.2 ve 0.3 olan numuneler, 90 °C'de PE kaplı halde 24 saat kürleme sonrasında kalıplarından homojen bir şekilde ayrılmış ve homojen görüntüsünü korumuştur (Şekil 4.9). Ancak alkali aktivatör / puzolan oranı 0.4 ve 0.5 olan numuneler, kalıptan ayrılırken hala ıslak kıvamda olduğundan dolayı, çeşitli boyutsal deformasyonlar gerçekleşmiş ve homojen bir görünüm sağlanamamıştır. Özellikle, 0.5 oranında aktivatör kullanılan numunelerde söz konusu deformasyon daha fazla olup kapilarite katsayısı deneyinin yapılmasını engellemiştir. Toplam su/katı madde oranının bütün karışımlarda sabit tutulmasına rağmen, 0.4 ve 0.5 aktivatör / puzolan oranına sahip numunelerin ıslak kıvamda olmasından, fazla miktardaki alkali kimyasalın suyun buharlaşmasını ve buna bağlı olarak harcın içyapı gelişimini engellediği sonucu çıkarılabilmektedir. Ayrıca, konu ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, KOH ve SS kimyasallarının daha fazla miktarda kullanılması malzemenin birim maliyetini arttırmaktadır. Bundan dolayı, üretilen malzemeden beklenen performans kriterlerinden ödün verilmeksizin söz konusu aktivatörlerin minimum miktarda kullanımına yönelmek gerekmektedir.




**Şekil 4.9 :** Toplam alkali aktivatör / puzolan oranındaki değişikliklere bağlı olarak üretilen numuneler: (a) 0.1 aktivatör/puzolan; (b) 0.2 aktivatör/puzolan; (c) 0.3 aktivatör/puzolan; (d) 0.4 aktivatör/puzolan; (e) 0.5 aktivatör/puzolan.

### 4.1.8 Datça Puzolanı esaslı jeopolimerin iç/dış koruyucu duvar katmanı olarak kullanım olanaklarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Yapıların dış duvarında kullanılan bitirme malzemeleri, yaşam süresi boyunca boyutsal stabilitesini ve fiziksel ve mekanik özeliklerini sürdürmelidir. Islanma kurumadan kaynaklanan herhangi bir boyutsal deformasyon, kondansasyon problemleri, çiçeklenme gibi kimyasal etkiler ve donma-çözülme etkilerinin neden olabileceği hasarı önlemek amacıyla malzemenin su emme oranı % 8-18 aralığında olmalıdır (Kocataşkın, 2000). Kapiler boşluklardaki suyun donmasıyla gerçekleşebilecek % 9 hacim artışının malzemenin boşluk duvarlarında oluşturacağı basınç nedeniyle çatlak oluşumunu önlemek için duvar malzemesinin doyma derecesi 0.78'den daha düşük olmalıdır (ASTM C 62-17). Malzemenin dayanıklılığında boşluk boyutları da önemli bir etkiye sahiptir (Robinson, 1984). Don etkilerine karşı dayanıklılık 3 μm'dan daha büyük çapa sahip boşlukların miktarıyla doğru orantılı iken, 0.5 μm'dan daha küçük çapa sahip boşluklar don etkileri açısından tehlikelidir (Maage, 1984). Koruyucu katman malzemeleri, ısıl farklılıklardan kaynaklanan boyutsal değişimlere, ıslanma kuruma, donma çözünme, tuz kristallenmesi ve atmosferik kirletici gazların etkilerine karşı dayanıklılığını sürdürmelidir.

Bu çalışmada Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın, tasarlanan monolitik duvar malzemesinde iç ve dış koruyucu katman olarak kullanılma olanaklarını belirlemek amacıyla, 12.5M KOH+SS (SS/KOH=2.5) ile aktive edilen numunelerin özelikleri ASTM C216 (2021) standardının cephe tuğlaları için belirlediği gereksinimlerle ve diğer kaynaklardan elde edilen gereksinimlerle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4).

**Çizelge 4.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harç özeliklerinin cephede kullanılan tuğla malzemelerin özelikleriyle karşılaştırılması.

| Referans | Cephe tuğlası türü | En yüksek su emme oranı (%) | En yüksek doyma derecesi |
|---|---|---|---|
| ASTM C216 | SW (sert iklim) | 17 | 0.78 |
| | MW (orta iklim) | 22 | 0.88 |
| Kocataşkın, 2000 | | 8-18 | - |
| ASTM C 62-17 | | - | 0.78 |
| Datça Puzolanı esaslı jeopolimer (12.5M KOH+SS, SS/KOH=2.5) | | 5.48 | 0.64 |

Çizelge 4.4'e göre, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer malzemenin su emme oranının (% 5.48) ve doyma derecesinin (0.64) kaynaklarda belirtilen maksimum değerlerden daha düşük olması, söz konusu karışımın, tasarlanan monolitik duvar malzemesinin iç

ve dış koruyucu katmanında kullanılabileceğini göstermektedir. Ancak, durabilite gibi diğer performans gereksinimleri derinlemesine araştırılmalıdır.

## 4.2 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Köpük Üretimi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

### 4.2.1 İnce kum / puzolan oranının hafif jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

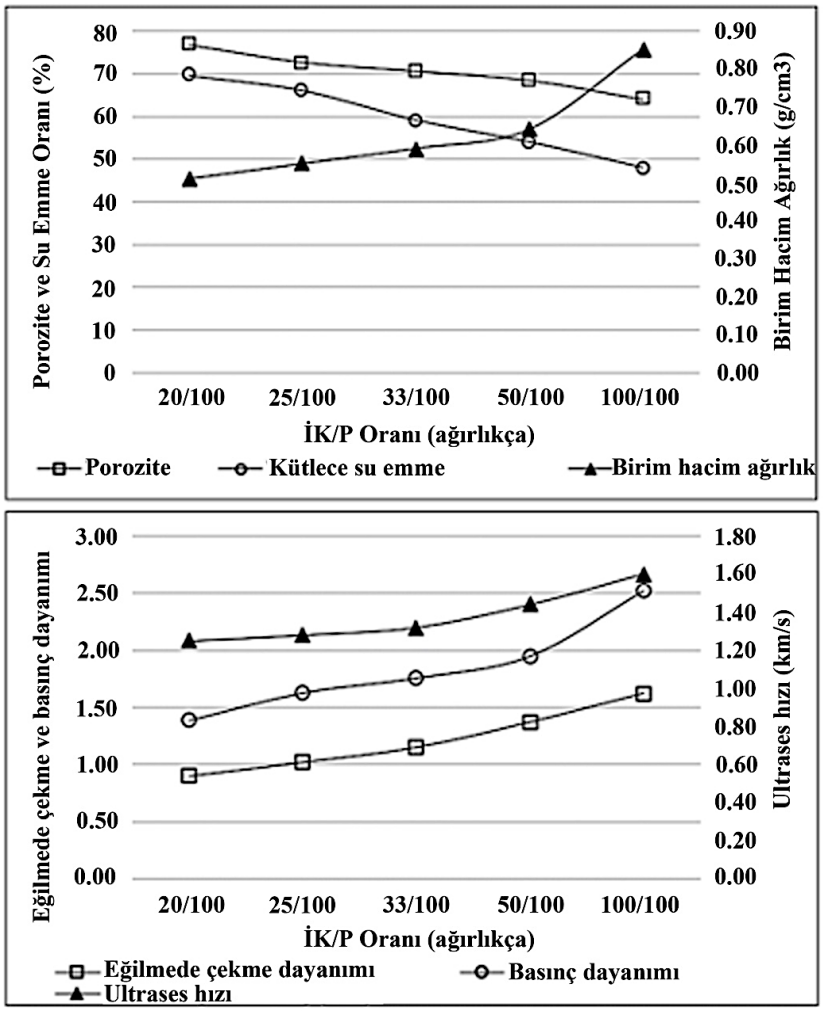
Boşluklar, jeopolimer karışımında Bölüm 2.2.1.1'de verilen denklemlerdeki (2.8; 2.13) gaz salan reaksiyonlarla üretilir ve malzeme sertleştiğinde hücresel bir iç yapı elde edilir. Jeopolimer karışımına Al tozu eklendikten sonra, reaksiyon sonucunda üretilen hidrojen gazı kabarcıkları, jeopolimer bağlayıcının hacimsel genleşmesine yol açmış ve bu olay 10 dakika boyunca devam etmiştir.

İnce kum/puzolan oranının harcın hacimsel genleşme oranı üzerindeki etkisi, genleşmiş numunelerin yüzey özeliklerinin gözlemlenmesiyle birlikte araştırılmıştır (Çizelge 4.5). Buna göre, 20/100 ince kum/puzolan oranı ile hazırlanan ilk serilerin hacmi ilk hacmine nazaran 3.0 kat artmıştır. Numunelerin hacimsel genleşme oranları, ince kum/puzolan oranının 25/100, 33/100, 50/100 ve 100/100'e arttırılmasıyla sırasıyla 2.8, 2.5, 2.2 ve 1.1 kat artmıştır. Yani jeopolimer karışımdaki ince kum miktarının artmasıyla, hacimsel genleşme oranı azalma eğilimi göstermiştir. Özellikle en yüksek kum içeriğine sahip numunelerde (100/100 İK/P oranı), Al tozu bağlayıcıyı şişirememiş ve hacimsel genleşme hemen hemen hiç olmamıştır (Çizelge 4.5-Şekil e). Kum miktarı ne kadar yüksek olursa, bağlayıcının köpürmesinden sorumlu olan alkali aktivatör, Al tozu ve puzolan oranı o kadar düşük olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca, 90 °C'de 24 saat etüv küründen sonra kumca zengin numunelerin (33/100, 50/100 ve 100/100 İK/P) üst yüzeylerinde alüminyuma benzeyen açık gri malzeme çökeltisi gözlemlenmiştir. Bu durum, numunelerde yüzey deformasyonuna neden olmuştur ve buna bağlı olarak numunelerin renk ve doku homojenliği bozulmuştur (Çizelge 4.5-Şekil c-e).

**Çizelge 4.5 :** İnce kum/puzolan oranının, genleşmiş numunelerin hacimsel genleşme oranı ve yüzey özelikleri üzerindeki etkileri.

| İK/P (ağırlıkça) | Hacimsel genleşme oranı | Yüzey özelikleri | 90 °C 24 saat kürleme sonunda üretilen numuneler |
|---|---|---|---|
| 20/100 | 3.0 kat | Homojen yüzey ve renk |  **(a)** |
| 25/100 | 2.8 kat | Homojen yüzey ve renk |  **(b)** |
| 33/100 | 2.5 kat | Yüzey ve renkte deformasyon |  |
| 50/100 | 2.2 kat | Yüzey ve renkte deformasyon |  |
| 100/100 | 1.1 kat | Yüzey ve renkte deformasyon |  |

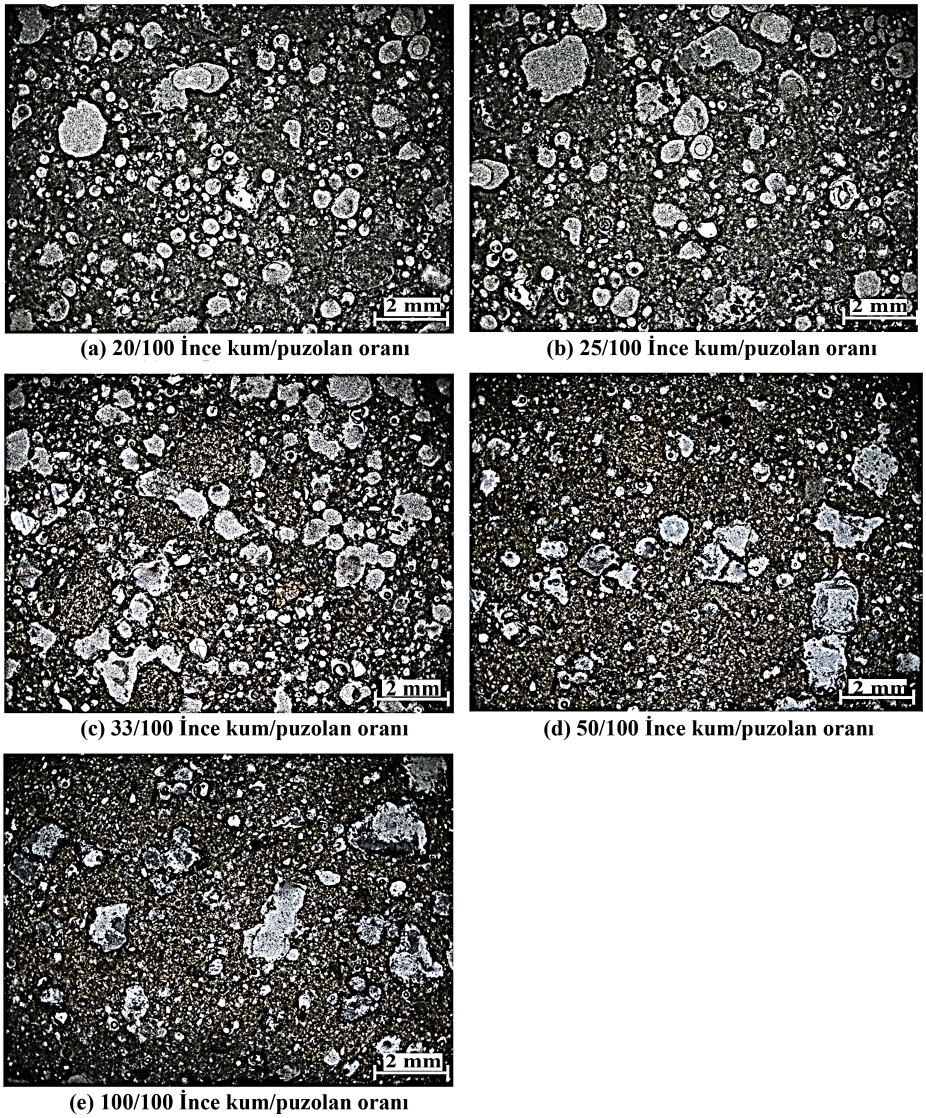
İnce kum / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri Şekil 4.10'da gösterilmektedir.




**Şekil 4.10 :** İnce kum / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri.

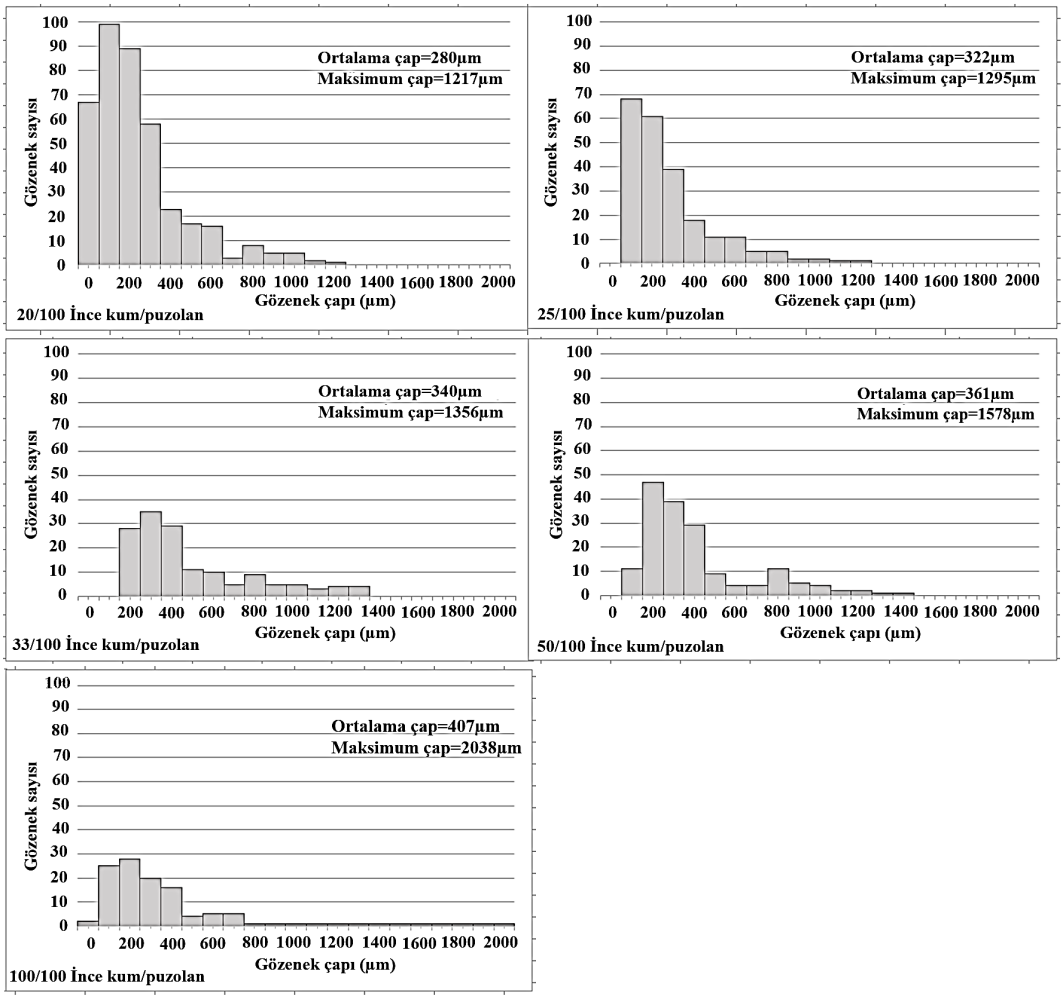
İnce kum / puzolan oranının 20/100'den 100/100'e kadar kademeli olarak arttırılması, numunelerin porozite ve su emme oranını sırasıyla 0.83 ve 0.68 kat azaltmıştır. Bu azalmaya paralel olarak, numunelerin birim hacim ağırlığında neredeyse iki katlık bir artış sağlanmıştır. Özellikle, 50/100-100/100 arasındaki kum katkı oranının iki kat arttığı bölgede yoğunlukta görülen ani artış oranı önemli düzeydedir. Numunelerin fiziksel özeliklerinde tespit edilen değişimler mekanik özeliklere de yansımış ve ultrases hızı, elastiklik modülü, eğilmede çekme ve basınç dayanımları sırasıyla 1.28, 1.72, 1.80 ve 1.81 kat artmıştır.

Şekil 4.11'de Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün ince kum/puzolan oranına bağlı olarak değişen ve 10 kat büyütülmüş optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Kum oranının kademeli olarak arttırılmasıyla malzemenin boşluk hacmi (porozite) ve boşluk sayısı azalma eğilimi göstermektedir ve bu sonuç, fiziksel deney sonuçlarıyla tutarlılık göstermektedir.




**Şekil 4.11 :** Çeşitli ince kum/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin optik mikroskop (10x) görüntüleri.

Boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları hazırlanmış ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Jeopolimer bir köpüğün yapısında dört farklı türde boşluk bulunmaktadır: (1) NASH jeli içerisinde bulunan ve ortalama genişliği 1 nm'den daha küçük olan katmanlar arası boşluklar, (2) NASH jellerinin arasında bulunan ve 1-10 nm boyuta sahip jel boşlukları, (3) çapı 5-100 nm arasında değişen kapiler boşluklar ve (4) ortalama çapı 50 μm'den daha büyük olan (makro boyutlu) hava kabarcıkları (Dhasindrakrishna, 2021). Makro ölçekteki boşluklar jeopolimer köpüklerin özeliklerini belirlemede etkin rol oynamaktadır (Cui ve diğ., 2018). Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'ye göre, üretilen bütün jeopolimer köpük numunelerinin boşluk çapı 61-2038 μm (0.061-2.038 mm) aralığında değişmektedir.

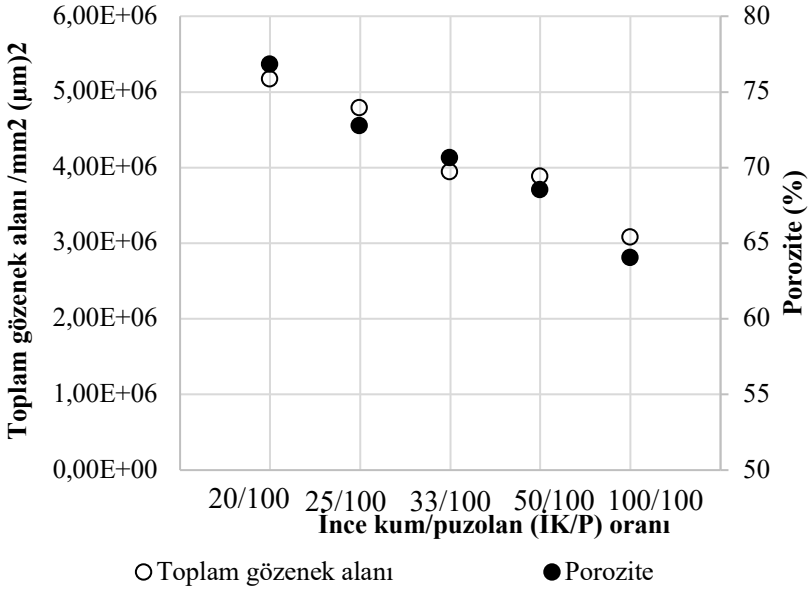



**Şekil 4.12 :** Artan ince kum/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları, ortalama ve maksimum boşluk çapı değerleri.

İnce kum/puzolan oranının 20/100'den 100/100'e kadar kademeli olarak arttırılması, boşluk boyutu dağılımının dar boşluklardan daha geniş boşluklara doğru değiştiğini gözler önüne sermektedir. 20/100 ince kum/puzolan oranına sahip numuneler, daha dar makro boyutlu boşluk (ortalama çapı 50 µm'den daha büyük olan hava kabarcığı) çapına ve daha homojen bir boşluk boyutu dağılımına sahiptir ve en büyük boşluk çapı 1217 µm'dir. Bağlayıcının dolgu maddesi oranı arttıkça, matris daha büyük boşluklardan oluşan ve daha heterojen bir yapı kazanmaktadır ve en büyük boşluk çapı 2038 µm'e kadar artmaktadır. 20/100 ince kum/puzolan oranına sahip numunelerdeki ortalama boşluk çapı 280 µm iken, 100/100 ince kum/puzolan oranına sahip numunelerdeki ortalama boşluk çapı 407 µm'a kadar artmaktadır. Bu bulguların nedeni, ince kum parçacıkları arasındaki ve ince kum-bağlayıcı ara yüzeyindeki boşluk oranının daha yüksek olması olabilir. Ayrıca, kum bakımından zengin numunelerin boşlukları birbirleriyle daha yüksek bir bağlantı derecesine sahipken, daha düşük kum

içeriğine sahip numunelerin boşlukları arasındaki bağlantı nispeten daha düşüktür. Bunun yanısıra, 20/100 ince kum/puzolan oranına sahip numunelerde $mm^2$'deki boşluk sayısı en yüksek iken, kum içeriğinin artması $mm^2$'deki boşluk sayısında azalmaya neden olmuştur. Bu bulgulardan, gözenekli jeopolimer karışımındaki toplam dolgu maddesi miktarının, boşlukların toplam hacmini, boyutunu ve boşluk boyutu dağılımını kontrol ettiği çıkarılabilir. Yani konu ısıl performans bağlamında değerlendirildiğinde, en düşük ısı iletkenliğin en yüksek porozite, en küçük boşluk çapı ve birbirleriyle daha az bağlantılı boşluğa sahip malzemede elde edilebileceği düşünülürse, gözenekli jeopolimer karışımındaki daha fazla miktardaki dolgu maddesi malzemenin toplam boşluk hacmini, boyutunu ve boşluk boyutu dağılımını ısıl performans açısından olumsuz yönde etkilemektedir.

İnce kum/puzolan oranının bir fonksiyonu olarak numunelerin toplam gözenek alanları ve poroziteleri Şekil 4.13'te verilmiştir.

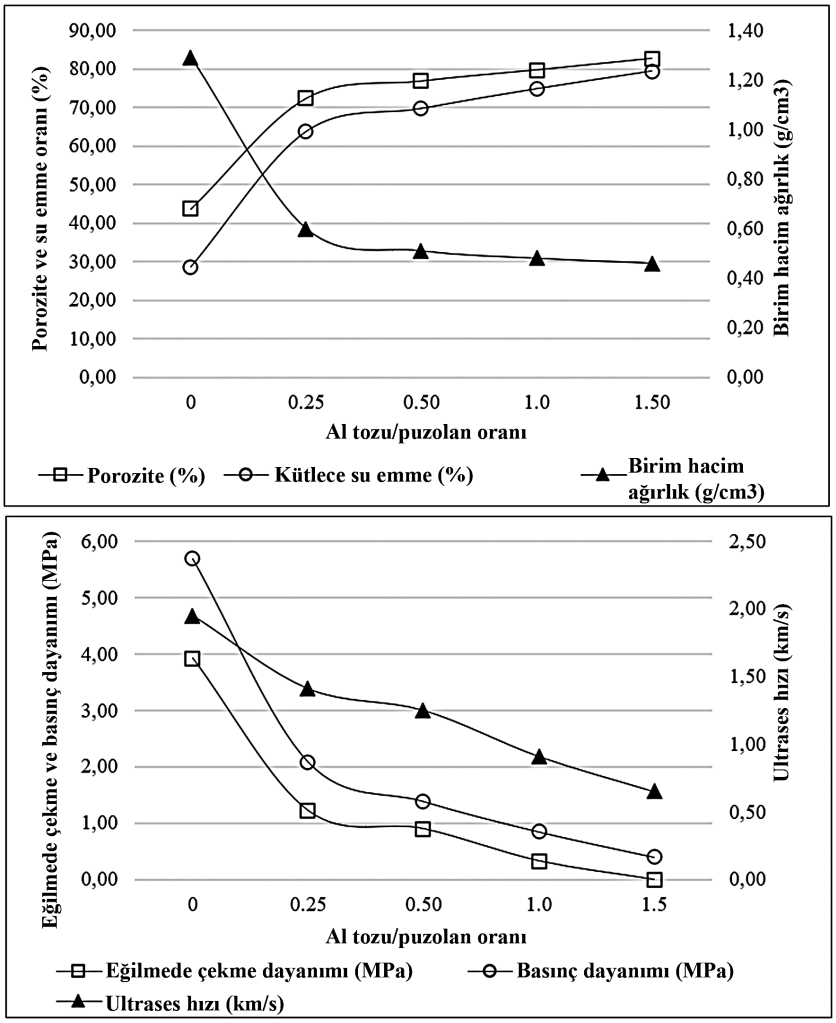



**Şekil 4.13 :** İnce kum/puzolan oranının bir fonksiyonu olarak Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin toplam gözenek alanı ve porozitesi.

Şekil 4.13'e göre, karışımın kum içeriğinin artmasıyla hem numunelerin poroziteleri (deneylerle elde edilen) hem de $mm^2$'deki toplam gözenek alanları (görüntü analizi ile elde edilen) azalmaktadır. Ayrıca, bu azalma eğiliminin her iki faktör için de önemli ölçüde benzer olması, görüntü analizi yönteminin jeopolimer köpüklerin boşluk hacmini belirlemek için uygun bir yöntem olduğunun bir göstergesi sayılabilmektedir.

### 4.2.2. Alüminyum tozu / puzolan oranının hafif jeopolimer özelikleri üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Al tozu / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı (20/100 ince kum/puzolan içeren) jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri Şekil 4.14'te verilmiştir.

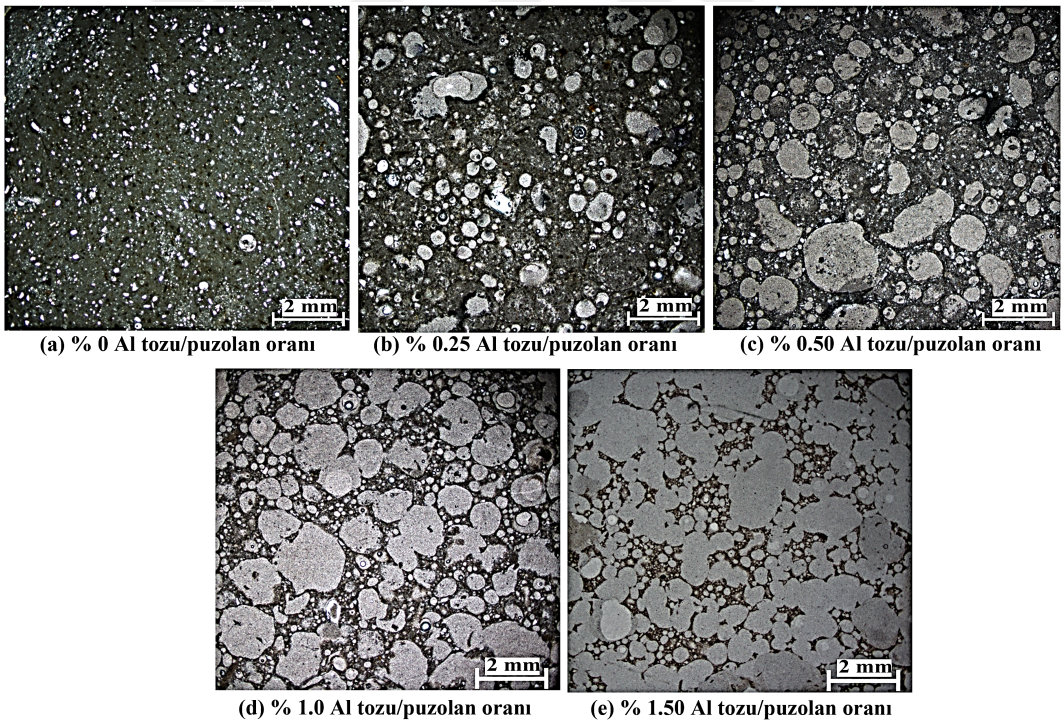



**Şekil 4.14 :** Al tozu / puzolan oranının Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkileri.

Şekil 4.14'e göre, Al tozu/puzolan oranı kademeli olarak % 0'dan % 1.5'e yükseldiğinde, özeliklerin gelişiminde iki farklı bölge belirgin hale gelmektedir. İlk başta, karışıma % 0.25 Al tozu ilavesiyle malzeme yoğunluğunun % 53 oranında azalması, Al tozunun bünyede boşluk oluşturmadaki yüksek etkinliğini gözler önüne sermektedir. Bu seviyenin ötesinde, % 1.5 Al tozu/puzolan oranına gelindiğinde, Al tozu oranında 1.25 kat artış olmasına rağmen yoğunluğun sadece % 23 azalması, Al tozunun gözenek oluşumundaki etkisinin azaldığını göstermektedir. Al tozu/puzolan

oranındaki artışın fonksiyonu olarak malzemenin diğer özelikleri, yoğunluğu ile hemen hemen uyumlu bir değişiklik göstermiştir. % 0.25 Al tozu/puzolan oranında gözeneklilik ve su emme oranı keskin bir şekilde 1.65 ve 2.21 kat artmış ve bu artışa paralel olarak numunenin ultrases hızı, elastiklik modülü, eğilmede çekme ve basınç dayanımları sırasıyla 0.72, 0.26, 0.31 ve 0.36 kat azalmıştır. Tüm alüminyum tozu artış aralığında ultrases hızında görülen kademeli azalma (% 54), gözenekli yapının kademeli oluşumunun sonucu olabilmektedir. Artan gözenek oluşturucu ajan içeriği ile fiziksel ve mekanik özeliklerde tespit edilen azalma eğilimi, literatürdeki diğer çalışma sonuçlarıyla da uyumludur (Feng ve diğ., 2015; Zaidi ve diğ., 2017; Gualtieri ve diğ., 2016).

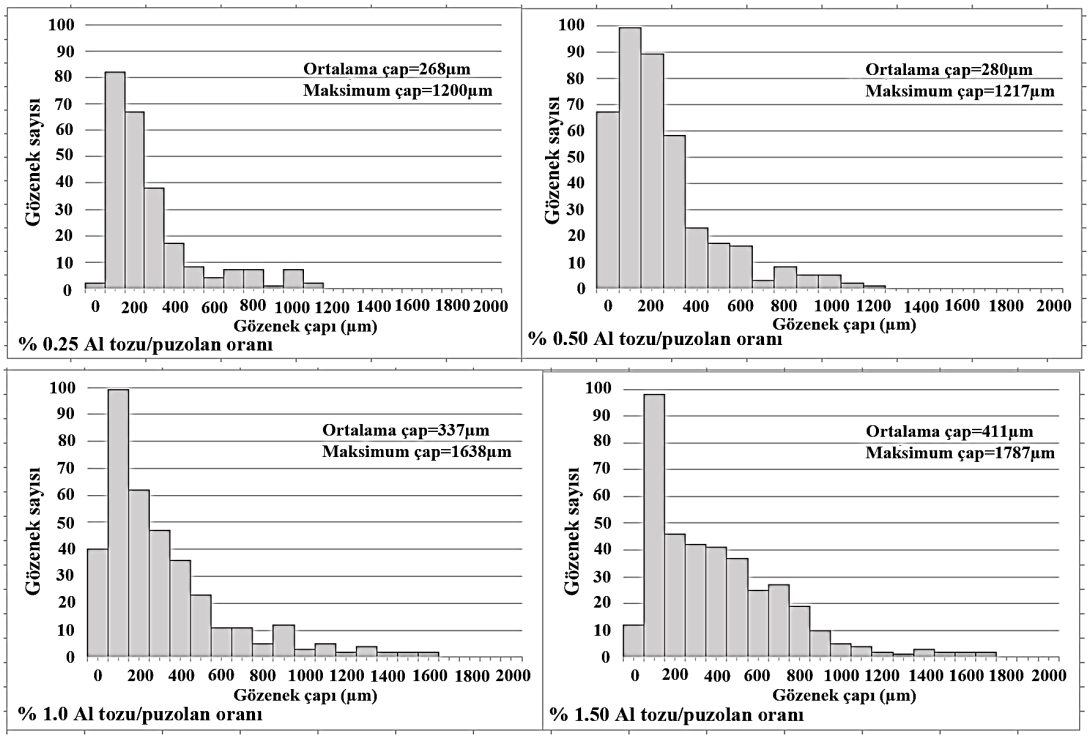
Şekil 4.15'te Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün Al tozu/puzolan oranına bağlı olarak değişen ve 10 kat büyütülmüş optik mikroskop görüntüleri ve Şekil 4.16'da boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları ve ortalama ve maksimum boşluk çapı değerleri verilmiştir.




**Şekil 4.15 :** Çeşitli Al tozu/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin optik mikroskop (10x) görüntüleri.

Al tozu/puzolan oranının % 0'dan % 1.5'e yükseltilmesi, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün toplam gözenek hacminde bir artışa yol açmıştır ve bu sonuç fiziksel deney sonuçları ile tutarlıdır. Numunelerin boşluk çapları 72-1787 μm (0.072-

1.787 mm) arasında değişmekte olup söz konusu boşluklar ortalama çapı 50 µm'den daha büyük olan makro boyutlu boşluk (hava kabarcığı) türündedir.



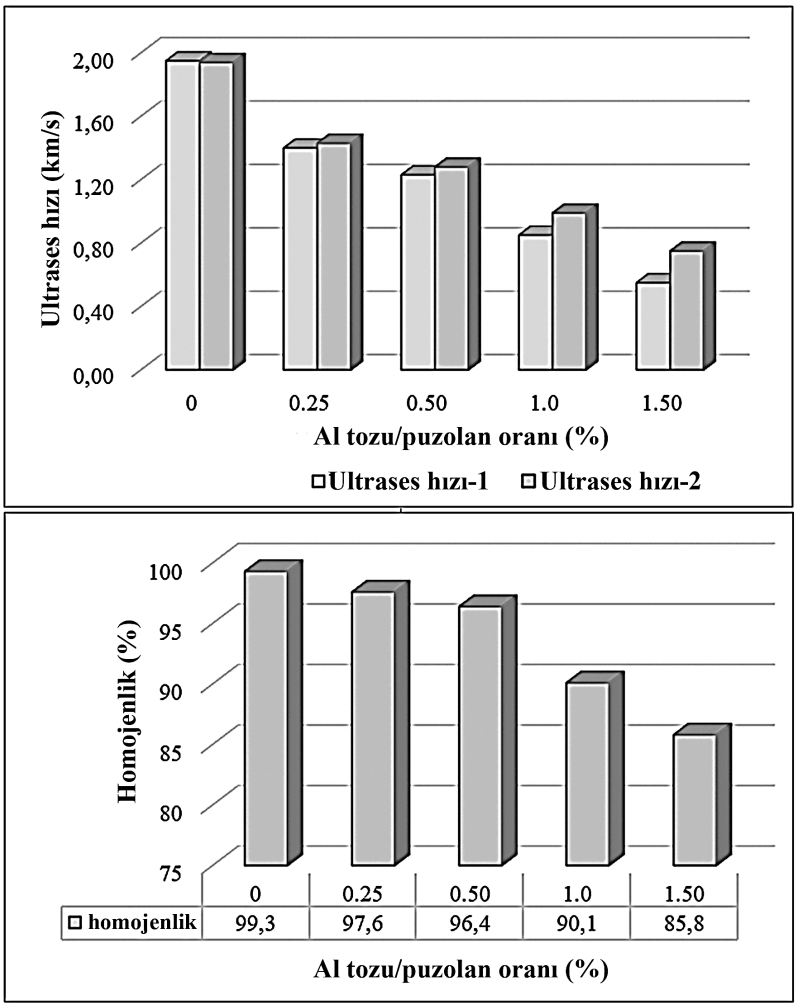

**Şekil 4.16 :** Çeşitli Al tozu/puzolan oranlarına sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin boşluk çaplarının sıklık dağılım diyagramları, ortalama ve maksimum boşluk çapı değerleri.

% 0.25 Al tozu/puzolan oranına sahip numune numuneler daha dar boşluk çapına ve daha homojen bir boşluk boyutu dağılımına sahiptir. Bu numunelerde ortalama ve maksimum boşluk çapı sırasıyla 268 µm ve 1200 µm olarak tespit edilmiştir. Al tozu/puzolan oranının 0.25'ten 1.5'e kadar kademeli olarak arttırılması, boşluk boyutu dağılımının dar boşluklardan daha geniş boşluklara doğru değiştiğini gözler önüne sermektedir.

Al tozu/puzolan oranının 1.5 olduğu numunelerde ortalama ve maksimum boşluk çapları srasıya 411 µm ve 1787 µm olup, bu numuneler daha büyük boşluklardan oluşan ve homojen olmayan bir boşluk boyutu dağılımına sahiptir. Ayrıca, bu numunelerde boşluklar arasındaki bağlantılar 0.25 Al tozu/puzolan oranına sahip numunelerdekine nazaran daha fazladır. Bu derecedeki boşluk birleşmesi, homojen olmayan gözenek yapısına yol açmış ve diğer numunelere kıyasla $mm^2$ başına en az sayıda boşluğa neden olmuş olabilmektedir. Çeşitli çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Kamseu ve diğ., 2012; Kamseu ve diğ., 2015). Dolayısıyla, gözenekli jeopolimer karışımlarında, boşlukların toplam hacmini, boyutunu, boyut dağılımını ve

aralarındaki bağlantı derecesini belirlemede Al tozu içeriğinin belirleyici olduğu söylenebilmektedir.

Ultrases hızı, betonun homojenliğini ölçmek için kullanılan tahribatsız bir deney yöntemidir (Lim ve Cao, 2013). Betondaki boşluklar ve çatlaklar malzemenin ulltrases hızını azalttığından, bu yöntem betonun kalitesini belirlemeye yardımcı olmaktadır (Hajimohammadi ve diğ., 2017). Bu çalışmada, aynı numunenin iki farklı bölgesinden ultrases hızı ölçülerek, malzemenin boşluk dağılımının homojenliği belirlenmeye çalışılmış (Şekil 4.17a) ve ultrases hızı deney sonuçlarının standart sapmasından yararlanılarak homojenlik oranı (%) hesaplanmıştır (Şekil 4.17b).

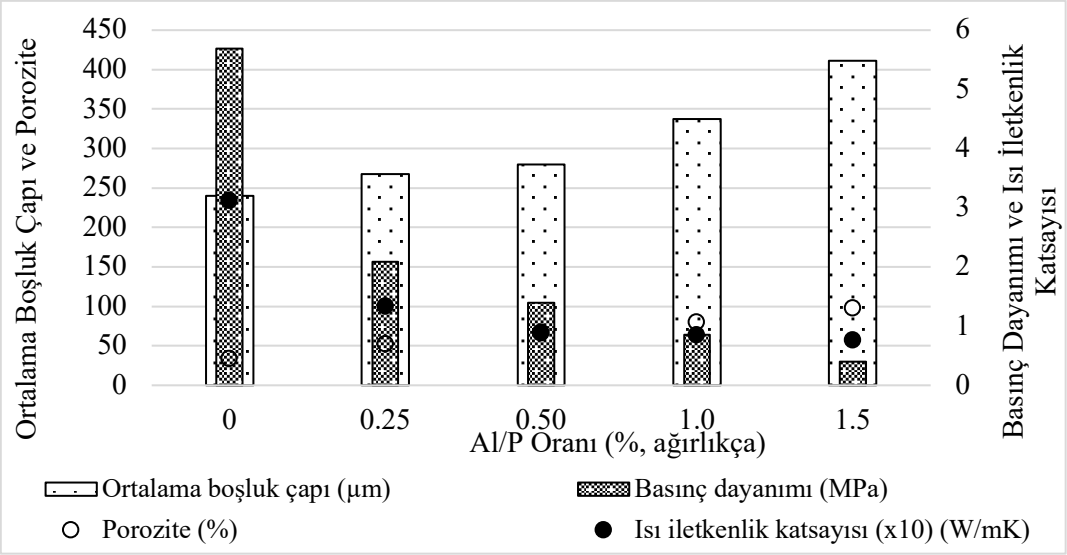



**Şekil 4.17 :** (a) Bir numunede iki farklı bölgeden elde edilen ultrases hızı; (b) Hesaplanan homojenlik yüzdesi.

En yüksek homojenlik (% 99.3), beklendiği gibi, Al tozu içermeyen numunelerden elde edilmiştir. Al tozu oranının artması, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün boşluk yapısının homojenliğinde bir azalmaya yol açmıştır. Özellikle en düşük

düzeyde homojenliğin (% 85.8) 1.5 Al tozu/puzolan oranına sahip numunelerde tespit edilmesi, söz konusu numunelerin daha geniş bir boşluk boyutu dağılımına sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Bu sonuç, daha fazla Al tozu ilavesinin daha büyük makro boyutlu boşluklara (ortalama çapı 50 µm'den büyük hava kabarcıklarına) ve düzensiz boşluk boyutu dağılımına sahip bir içyapıya neden olabileceği bulgularını doğrulamaktadır.

Al tozu/puzolan oranının porozite, ortalama gözenek çapı, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri Şekil 4.18'de verilmiştir.




**Şekil 4.18 :** Al tozu/puzolan oranının porozite, ortalama gözenek çapı, ısıl iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki etkileri.

Çeşitli oranlarda Al tozu ilave edilerek üretilen Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın gözenekli mikro yapısı, Al tozu içermeyen numuneye göre daha düşük basınç dayanımına neden olmuştur. Gözenek çaplarının basınç dayanımı üzerinde önemli etkileri olduğu (Amran ve diğ., 2015; Nguyen ve diğ., 2019; Wu ve diğ., 2018a; Wu ve diğ., 2018b; Hajimohammadi ve diğ., 2018b) ve bağlayıcı malzemelerde büyük gözeneklerin küçük gözeneklere nazaran malzeme yapısına daha fazla zarar verebileceği bilinmektedir (Neville, 2011). Daha düşük miktarda Al tozu (% 0.25 ve % 0.50) içeren numunelerin dayanım değerleri, matrislerinin daha küçük gözeneklerden oluşması, daha homojen yapıda olması ve gözenek boyutu dağılımının daha dar bir aralıkta olması nedeniyle yüksektir. Ek olarak, bu numunelerin gözenekleri arasındaki bağlantı nispeten daha azdır. Böylece, düzenli olarak oluşan hava boşlukları malzemenin basınç dayanımını arttırmaktadır (Hamad, 2014). Öte yandan, % 1.5 Al tozu / puzolan oranına sahip numunelerde, gözenekler birbiriyle daha

fazla bağlantılıdır ve daha yüksek derecede gözenek bağlantısı ve oluşan hava kabarcıklarının birleşmesi (merging of bubbles), geniş bir boşluk boyutu dağılımına ve daha düşük mukavemete yol açmaktadır (Hamad, 2014). Gözenek duvarı, oluşan rötreyi taşıyamayacak kadar ince olduğunda ve eğer matriste aşırı miktarda hava kabarcığı varsa, kürleme işlemi sırasında, kabarcıkların aralarındaki film zayıflar ve kabarcıklar birleşerek daha fazla bağlantılı ve daha büyük toplam gözeneklere yol açmaktadır. Buna bağlı olarak malzemenin mekanik özelikleri azalmaktadır (Huang ve diğ., 2018; Zhang ve diğ., 2015; Xu ve diğ., 2018; Zhang ve Wang, 2016).

Hafif bir malzemenin ısı iletimi tek yönde ve iletim, taşınım ve ışınım şeklinde gerçekleştiği Bölüm 3.2.3.3'te açıklanmıştı. İletim, moleküler hareketin yayılması şeklinde bir katı madde içinde gerçekleşmektedir. Gözenek boyutu 4 mm'den küçük olan bir malzemede havanın ısıl taşınımı ihmal edilebilir hale gelir (Schulle ve Schlegel, 1991; Wei ve diğ., 2013). Radyasyonun 600 °C'den düşük bir sıcaklıkta iletkenlik üzerinde çok az olan etkisi ihmal edilebilmektedir (Prud'homme ve diğ., 2015). Bundan dolayı, malzeme bünyesinde gözenekliliğin artması, ısıl iletkenliği ve basınç dayanımı gelişimini önemli ölçüde azaltmaktadır (Novais ve diğ., 2016a; Kamseu ve diğ., 2015; Masi ve diğ., 2014). Aynı porozite değeri için, malzemenin gözenek çapı küçüldüğünde, ısı iletim mesafesi uzar ve dolayısıyla ısıl iletkenlik azalır (Dong ve diğ., 2019). Mevcut çalışmada, bölme duvarlarda kullanılacak monolitik duvar malzemesinin fiziksel ve mekanik performans gereksinimlerinden ödün vermeden, ısıl iletkenliği azaltmak için jeopolimer harcına Al tozu eklenmiştir. Al tozu / puzolan oranının % 0'dan % 1.5'e kademeli olarak artması, porozitedeki artışla doğru orantılıdır (1.89 kat) ve 0.312 W/mK'den 0.076 W/mK'e düşen ısı iletkenlik katsayısıyla ters orantılıdır (0.24 kat) (Şekil 4.18). Durgun havanın ısıl iletkenliği katı matrisinkinden daha düşük olduğundan (TS 825, 2013), daha yüksek bir porozite, malzemede ısı yalıtımı işlevi görebilecek daha fazla boşluk bulunması anlamına gelmektedir (Prud'homme ve diğ., 2015). Malzemenin ısıl iletkenliğinde en önemli azalma % 0-0.25 Al tozu/ puzolan oranında meydana gelmiştir ki bu durum, Al tozu ilavesinin katı matrisin ısıl iletkenliğini düşürmedeki olumlu etkisini vurgulamaktadır. Al tozu/puzolan oranı % 0.25'ten % 0.50'ye yükseltildiğinde, porozite ve ortalama boşluk çapı yaklaşık 1.1 kat artarken, ısıl iletkenlik katsayısı 0.65 kat azalmıştır. Al tozu/puzolan oranı % 0.50'den % 1.50'ye yükseltildiğinde, porozite ve ortalama boşluk çapı yaklaşık 1.50 kat artmasına rağmen, ısıl iletkenlik katsayısındaki azalma sadece

0.86 kat olmuştur. Al tozu/puzolan oranının % 0.50'den daha fazla arttırılması, ısıl iletkenliğin azaltılmasında beklenen etkiyi verememiştir. Bunun nedeni, daha büyük gözeneklere sahip ve homojen olmayan boşluk boyutu dağılımının ısıl yalıtım üzerindeki olumsuz etkisi olabilir. Bu nedenle, bir jeopolimer köpüğün ısı yalıtım kapasitesinin gelişiminin sadece porozite ve dolayısıyla yoğunluktan değil, aynı zamanda gözenek boyutundan, şeklinden ve gözenekler arasındaki bağlantıdan da etkilendiği söylenebilir (Schlegel ve diğ., 1999; Dondi ve diğ., 2004). Daha küçük, daha dairesel ve birbirlerine daha az bağlı olan gözenekler, boşluklu malzemelerin yalıtım kapasitesini arttırmaktadır (Hajimohammadi ve diğ., 2018b).

Daha yüksek ısıl performans beklendiği durumda, ısı iletkenlik katsayısı en düşük (0.076 W/mK) olan ve en yüksek Al tozu/puzolan oranına sahip numune optimum olarak seçilebilir. Ancak pratik uygulamalar sırasında mekanik özelikler göz ardı edilemez (Huang ve diğ., 2018). Gerçekten de bölücü monolitik duvar kesitinde söz konusu boşluklu malzemenin kendi stabilitesini koruyabilecek kadar bir dayanıma sahip olması beklenir. Bundan dolayı, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük üretimindeki kriterler, 0.1 W/mK'den daha düşük ısıl iletkenliğe ve 1.0 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına sahip bir köpük üretmek olarak belirlenmiştir. Buna göre, ideal Al tozu/puzolan oranı % 0.5 olarak tespit edilmiştir.

### 4.2.3 Datça Puzolanı esaslı hafif jeopolimerin ısıl yalıtıma sahip çekirdek katmanı olarak kullanım olanaklarının değerlendirilmesi ve irdelenmesi

Bu çalışmada üretilen Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin birim hacim ağırlığı, ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımları, yapı sektöründe kullanılan çeşitli inorganik hafif duvar ve yalıtım malzemeleri ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.6). Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün 1 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına ve 0.1 W/mK'den daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olma kriterini birarada sağlayan Al/P oranı 0.5 olan numunelerin ısı iletkenlik katsayısı (0.088 W/mK), cam köpüğü, cam yünü ve taş yünü gibi ısı yalıtım malzemelerinden daha yüksek ve düşey delikli hafif tuğla, pomza betonu, gazbeton ve köpük beton gibi nispeten hafif bölücü duvar malzemelerinden daha düşüktür. Bilindiği gibi, düşey delikli hafif tuğla, pomza betonu, gazbeton ve köpük betonu gibi geleneksel duvar malzemeleri ısı yalıtım malzemesi ile birlikte kullanıldığında etkili bir ısıl performans sergileyebilmektedir. Ancak Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün ısı iletkenlik katsayısının söz konusu

malzemelere nazaran daha düşük olması, üretilen köpük malzemenin herhangi bir ısı yalıtım malzemesine gerek duyulmadan kullanılma potansiyelinin olabileceğini göstermektedir. Bir diğer deyişle, daha düşük basınç dayanımı ve daha yüksek su emme oranı iç ve dış koruyucu katmanlarla dengelendiğinde, söz konusu köpük, makro ölçekte homojen davranan bir jeopolimer malzemenin çekirdek katmanı olarak kullanılabilir. Bu varsayım Bölüm 4.3'te irdelenmektedir.

**Çizelge 4.6 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün özeliklerinin diğer inorganik duvar ve yalıtım malzemelerinin özelikleriyle karşılaştırılması.

| Malzeme | | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Basınç dayanımı (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| Isı yalıtım sıvaları (TS 825, 2013) | | ≥0.2 | 0.05-0.10 | - |
| Bims beton (TS 825, 2013) | | 0.4-1.3 | 0.12-0.47 | 2.5-5.0 |
| Gazbeton (TS 825, 2013) | | 0.35-1.0 | 0.11-0.31 | ≥4 |
| Köpük beton (Novais ve diğ., 2016a) | | 0.3-0.5 | 0.091-0.19 | ≥0.4 |
| Düşey delikli hafif tuğla (TS 825) | | 0.5-1.0 | 0.22-0.29 | 2.5-7.5 |
| Cam köpüğü (TS 825, 2013) | | 0.1-0.15 | 0.045-0.060 | 0.12-0.14 |
| Cam yünü (TS 825, 2013) | | 0.015-0.15 | 0.035-0.050 | 0.015-0.08 |
| Taş yünü (TS 825, 2013) | | 0.02-0.20 | 0.035-0.050 | 0.015-0.08 |
| | Al/P Oranı (%) | | | |
| Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük | 0 | 1.29 | 0.312 | 5.69 |
| | 0.25 | 0.60 | 0.134 | 2.09 |
| | **0.50** | **0.51** | **0.088** | **1.39** |
| | 1.0 | 0.48 | 0.085 | 0.85 |
| | 1.5 | 0.46 | 0.076 | 0.40 |

Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüklerin porozitesi, ısı iletkenlik katsayısı ve basınç mukavemeti, çeşitli alüminosilikat kaynaklarından ve köpürtücü ajanlardan üretilen jeopolimer köpüklerinkiyle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.7). Bu karşılaştırmaya göre, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün 1 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımına ve 0.1 W/mK'den daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olma kriterini birarada sağlayan Al/P oranı 0.5 olan numunelerin ısı iletkenlik katsayısı (0.088 W/mK), ultra ince perlit esaslı jeopolimer köpüğünkinden daha yüksek; uçucu kül, taban külü ve metakaolin+ uçucu kül esaslı köpüklerinkiyle benzer aralıkta; uçucu kül, kalsine edilmiş kaolin, Pakistan doğal toprağı, metakaolin+silis dumanı, metakaolin, atık camdan ve metakaolin atığı, cam atığı ve çelik fabrikası atığı esaslı jeopolimer köpüklerinkinden daha düşüktür. Üretilen köpüğün porozite ve basınç dayanımı değerlerinin çizelgedeki diğer malzemelerinkiyle benzer olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük, yapı

endüstrisinde rijit bir inorganik duvar yalıtım malzemesi olarak kullanılmak üzere umut verici olabilmektedir.

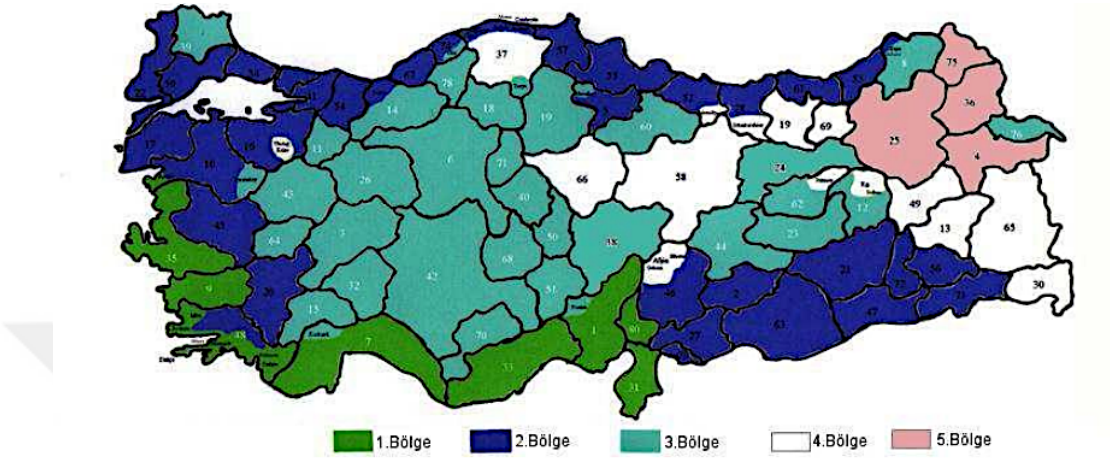
**Çizelge 4.7 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük özeliklerinin çeşitli alüminosilikat kaynaklarından ve köpürtücü ajanlardan üretilen jeopolimer köpük özelikleriyle karşılaştırılması.

| Referans | Alüminosilikat kaynağı | Boşluk oluşturucu ajan | Porozite (%) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Basınç dayanımı (MPa) |
|---|---|---|---|---|---|
| Vaou ve Panias, 2010 | Ultra ince perlit | $H_2O_2$ | 74-89 | 0.03-0.06 | 0.2-0.8 |
| Feng ve diğ., 2015 | Uçucu kül | $H_2O_2$ | 74-81 | 0.07-0.09 | 0.4-1.4 |
| Haq ve diğ., 2016 | Dip külü | SS | 66-76 | 0.074-0.09 | 1.2-3.5 |
| Haq ve diğ., 2015 | Dip külü | SS | 42-73 | 0.075-0.091 | 3.0-6.2 |
| Novais ve diğ., 2016b | Metakaolin+ uçucu kül | $H_2O_2$ | 48-81 | 0.08-0.2 | 0.3-21 |
| **Bu doktora çalışması** | **Datça Puzolanı** | **Al tozu (% 0.5)** | **76.80** | **0.088** | **1.39** |
| Novais ve diğ., 2016a | Uçucu kül | $H_2O_2$ | 41.5-72.5 | 0.10-0.40 | 1.2-6.6 |
| Palmero ve diğ., 2015 | Kalsine edilmiş kaolin | $H_2O_2$ | 56-75 | 0.11-0.17 | 1.8-5.2 |
| Bai ve diğ., 2018 | Metakaolin | $H_2O_2$ | 60.2-83.1 | 0.11-0.17 | 0.3-11.6 |
| Papa ve diğ., 2016 | Silis dumanı +metakaolin | Silis dumanı | 78-85 | 0.12-0.17 | - |
| Henon ve diğ., 2013 | Metakaolin | Silis dumanı | 65-85 | 0.12-0.35 | - |
| Henon ve diğ., 2014 | Metakaolin | Silis dumanı | 65-85 | 0.12-0.35 | - |
| Dembovska ve diğ., 2017 | Metakaolin atık, Cam atık, Çelik fabrikası atığı | Alüminyum tozu atığı | 83-86 | 0.14-0.15 | 1.1-2.0 |
| Kamseu ve diğ., 2012 | Metakaolin | Al tozu | 30-70 | 0.15-0.60 | - |
| Bai ve diğ., 2019 | Cam atık | $H_2O_2$ | 55 | 0.21 | 7.3 |
| Zaidi ve diğ., 2017 | Pakistan puzolanı | $H_2O_2$ | 54-63 | 0.27-0.35 | 1.57-2.41 |
| Gualtieri ve diğ., 2016 | Uçucu kül | SiC tozu | 32-52 | 0.42-0.67 | 1.2-4.1 |

## 4.3 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Duvar Malzemesinin Türkiye'nin İklim Bölgelerinde Kullanılma Olanaklarının Değerlendirilmesi ve İrdelenmesi

Yapıların duvar bileşeninde oluşan ısı kayıplarını minimize etmek, enerji korunumu açısından önemlidir. Oluşan ısı kaybı, yapının bulunduğu coğrafik konum itibariyle hakim iklim koşullarına (hava sıcaklığı, nemlilik oranı, rüzgarlar) bağlı olarak değişmektedir. Ülkemizde TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Yönetmeliği (TS 825, 2013) ile belirlenmiş beş farklı iklim bölgesi bulunmaktadır (Şekil 4.19). Yapı bileşenlerinin karşılaması gereken performans ölçütleri bu iklim bölgelerine göre değiştiğinden, bütün iklim bölgeleri için aynı kalınlıkta malzeme kullanılması, duvar kesitinin ısıl performans etkinliğini bozabilmekte ve kullanıcı sağlığını riske atabilmektedir. Bundan dolayı çalışmanın bu aşamasında, Datça puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıdan üretilen, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri belirlenen çekirdek katmanı ve koruyucu katmanlardan oluşan monolitik malzeme kesitinin

(Şekil 1.1), ülkemizin farklı iklim bölgelerinde dış duvar malzemesi olarak kullanım olanakları belirlenmeye çalışılmıştır. Tasarlanan monolitik duvar malzemesinin her bir iklim bölgesi için sağlanması gereken en yüksek $U_{duvar}$ değerlerini (Çizelge 4.8) sağlayıp sağlayamadığı ve kesit içinde yoğuşma oluşup oluşmadığı İzoder TS 825 Hesap Programı (İzoder, 2021) ile denetlenmiştir.




**Şekil 4.19 :** Derece gün bölgelerine göre illerimiz (TS 825, 2013).

**Çizelge 4.8 :** Derece gün bölgelerinde zorunlu U değerleri (TS 825, 2013).

| Türkiye'nin iklim bölgeleri | $U_{duvar}$ | $U_{tavan}$ | $U_{döşeme}$ | $U_{pencere}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1. Bölge | 0.66 | 0.43 | 0.66 | 1.8 |
| 2. Bölge | 0.57 | 0.38 | 0.57 | 1.8 |
| 3. Bölge | 0.48 | 0.28 | 0.43 | 1.8 |
| 4. Bölge | 0.38 | 0.23 | 0.38 | 1.8 |
| 5. Bölge | 0.36 | 0.21 | 0.36 | 1.8 |

Hesaplamalarda bina türü olarak "konut" ve duvar türü olarak "dış iklim koşullarına açık dış duvar" seçilmiştir. Iklim bölgelerine ait verilerin kabulunde, derece gün bölgelerine ait temsili iller:

- Birinci derece gün bölgesi için Antalya,
- Ikinci derece gün bölgesi için İstanbul,
- Üçüncü derece gün bölgesi için Ankara,
- Dördüncü derece gün bölgesi için Sivas,
- Beşinci derece gün bölgesi için Erzurum

olarak seçilmiştir. TS 825 standardına göre iç yüzey ısıl iletim direnci (1/αi) 0.25 m²K/W ve dış yüzey ısıl iletim direnci (1/αd) 0.04 m²K/W olarak kullanılmıştır. "n"

tane katmandan oluşan mevcut duvar konstrüksiyonunun ısı geçirgenlik direnci, aşağıdaki ifadeyle (4.1)'deki eşitlikle hesaplanmıştır:

$$1/\Lambda = d_1/\lambda_1 + d_2/\lambda_2 + \ldots + d_n/\lambda_n \qquad (m^2K/W) \tag{4.1}$$

d: Malzeme kalınlığı, (m)

λ: Isı iletkenlik katsayısı, (W/mK)

Tasarlanan duvarın ısı geçirgenlik değeri ($U_{duvar}$, $W/m^2K$) aşağıdaki ifadeyle (4.2) hesaplanmıştır:

$$U_{duvar} = 1/\left[(1/\alpha i) + (1/\Lambda) + (1/\alpha d)\right] \quad (W/m^2K) \tag{4.2}$$

1 / αi: İç yüzey ısı iletim direnci, ($m^2K/W$)

1 / αd: Dış yüzey ısı iletim direnci, ($m^2K/W$)

Yapılan higrotermik hesaplarda, sadece üretilen malzemeden ısı kaybı dikkate alınmıştır. Duvar elemanı ölçeğinde konu ele alındığında, bitmiş ürünün birim blok/tuğla ya da panel olarak kullanılacağı biçimine göre, derzlerden olabilecek ısı köprüleri hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Bitmiş üründe bu tür ısı köprülerini oluşturmayacak duvar malzemesi biçim ve konstrüksiyonu önerilebilir.

Her bir iklim bölgesinde kullanılacak monolitik duvar malzemesinin ideal kalınlığının ve katmanlaşmasının nasıl olması gerektiğine karar verilirken birinci öncelik iklim bölgesine göre gereken $U_{duvar}$ değerinin sağlanmasıdır. $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan kesitte yoğuşma tahkiki yapılmıştır. Program veritabanında, yapı bileşeni kesitinde meydana gelen buhar difüzyonu doğrusu ile yapı bileşeni kesitinde meydana gelen sıcaklık dağılımına göre belirlenen doyma basıncı eğrilerinin hiçbir ayda birbirini kesmemesi durumu yoğuşma tahkiki açısından "ideal durum" olarak tanımlanmıştır. İki eğrinin herhangi bir ayda kesişmesi durumunda yoğuşma meydana gelmektedir. Kesit içinde herhangi bir ayda yoğuşma oluşmuşsa, $U_{duvar}$ değeri sağlanmış olmasına rağmen, nemlilik nedeniyle zaman içerisinde ısıl performans kayıpları ve küflenme ve çiçeklenme gibi deformasyonların gerçekleşebileceği gözönünde bulundurularak, söz konusu duvar kesiti o iklim bölgesi için "olumsuz durum" olarak tanımlanmıştır. $U_{duvar}$ değerini sağlamayan duvar kesitlerinde ise yoğuşma tahkiki yapılmamıştır.

Monolitik duvar malzemesi tasarımında en yüksek toplam kalınlık (geleneksel bir tuğladan yola çıkılarak) 19 cm olarak belirlenmiştir. Iç ve dış koruyucu katmanlar 2 cm kalınlığında sabit tutularak, ortadaki çekirdek katmanının kalınlığı kademeli olarak değiştirilmiştir. Ancak, dördüncü ve beşinci iklim bölgelerinde burada sözü edilen katmanlaşma $U_{duvar}$ gereksinimini sağlamaya ve yoğuşmayı engellemeye yetmediğinden, söz konusu iklim bölgeleri için toplam duvar kalınlığının 19 cm'den daha fazla arttırıldığı (24 cm'e kadar) çeşitli varyasyonlar denenerek ideal malzeme kesitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Dördüncü ve beşinci iklim bölgelerinde gerçekleşen yoğuşmayı engellemek amacıyla yalıtım malzemesi kalınlığı en fazla 20 cm'e kadar arttırılmış, yalıtım katmanını daha fazla arttırmak ekonomik bulunmamıştır. Çalışma sonunda hazırlanan çizelge analiz edilerek (Çizelge 4.9), $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan, yoğuşma oluşmayan ve en ince duvar kesitine imkan veren katmanlaşma, söz konusu iklim bölgesi için "optimum katmanlaşma" olarak seçilmiştir.

**Çizelge 4.9 :** Türkiye iklim bölgelerine göre tasarlanan monolitik duvar malzemesi kesitinin katmanlaşması, $U_{duvar}$ değeri, yoğuşma tahkiki ve toplam duvar kalınlığı.

| İklim bölgesi | Katman | Kalınlık (cm) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Buhar dif. direnç faktörü (μ) | $U_{duvar}$ (W/m$^2$K) | | Yoğuşma tahkiki | Toplam duvar kalınlığı (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.869 | Gereksinimi sağlamıyor | Yapılmadı | 11.5 cm |
| | Çekirdek | 7.5 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.697 | Gereksinimi sağlıyor | Ideal durum | **14 cm optimum katmanlaşma** |
| | Çekirdek | 10 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.582 | Gereksinimi sağlıyor | Ideal durum | 16.5cm |
| | Çekirdek | 12.5 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.499 | Gereksinimi sağlıyor | Ideal durum | 19 cm |
| | Çekirdek | 15 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| 2 | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.869 | Gereksinimi sağlamıyor | Yapılmadı | 11.5 cm |
| | Çekirdek | 7.5 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.697 | Gereksinimi sağlamıyor | Yapılmadı | 14 cm |
| | Çekirdek | 10 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.582 | Gereksinimi sağlıyor | Ideal durum | **16.5 cm optimum katmanlaşma** |
| | Çekirdek | 12.5 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.499 | Gereksinimi sağlıyor | Ideal durum | 19 cm |
| | Çekirdek | 15 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| 3 | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.869 | Gereksinimi sağlamıyor | Yapılmadı | 11.5 cm |
| | Çekirdek | 7.5 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.697 | Gereksinimi sağlamıyor | Yapılmadı | 14 cm |

**Çizelge 4.9 (devam) :** Türkiye iklim bölgelerine göre tasarlanan monolitik duvar malzemesi kesitinin katmanlaşması, $U_{duvar}$ değeri, yoğuşma tahkiki ve toplam duvar kalınlığı.

| İklim bölgesi | Katman | Kalınlık (cm) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Buhar dif. direnç faktörü (μ) | $U_{duvar}$ (W/m$^2$K) | | Yoğuşma tahkiki | Toplam duvar kalınlığı (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Çekirdek | 10 | 0.088 | 3 | | | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.582 | Gereksinimi | Yapılmadı | 16.5 cm |
| | Çekirdek | 12.5 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.499 | Gereksinimi | Ideal durum | **19 cm optimum** |
| | Çekirdek | 15 | 0.088 | 3 | | sağlıyor | | **katmanlaşma** |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| 4-5 | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.869 | Gereksinimi | Yapılmadı | 11.5 cm |
| | Çekirdek | 7.5 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.697 | Gereksinimi | Yapılmadı | 14 cm |
| | Çekirdek | 10 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.582 | Gereksinimi | Yapılmadı | 16.5 cm |
| | Çekirdek | 12.5 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.499 | Gereksinimi | Yapılmadı | 19 cm |
| | Çekirdek | 15 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.417 | Gereksinimi | Yapılmadı | 21.5 cm |
| | Çekirdek | 17.5 | 0.088 | 3 | | sağlamıyor | | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |
| | Iç cidar | 2 | 0.312 | 5 | 0.360 | Gereksinimi | **Olumsuz** | **24 cm** |
| | Çekirdek | 20 | 0.088 | 3 | | sağlıyor | **durum** | |
| | Dış cidar | 2 | 0.312 | 5 | | | | |

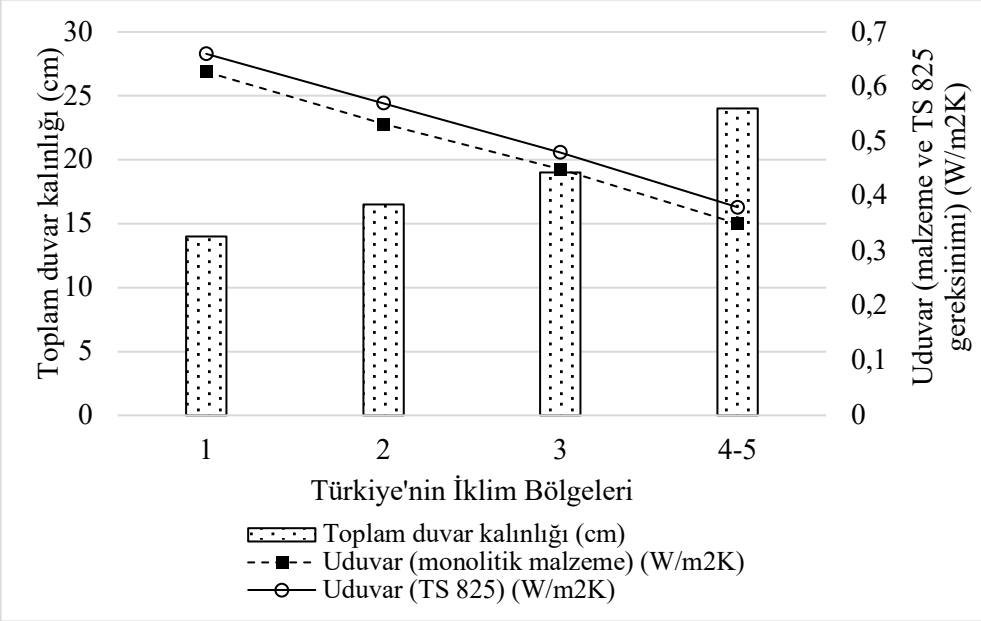
Çizelge 4.9'a göre, birinci derece iklim koşulları altında, TS 825 uyarınca gereken $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşmaya sebep olmayan Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesinin optimum katmanlaşması 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 10 cm'lik çekirdek (jeopolimer köpük) katmanı olarak tespit edilmiştir. Böylece, herhangi ek bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmaksızın, fiziksel, mekanik ve ısıl performans toplam **"14 cm"** kalınlığındaki tek çeşitli duvar malzemesiyle sağlanabilmektedir. Söz konusu kalınlık, yapıların geleneksel katmanlı dış duvar kalınlığının (iç sıva+tuğla+yalıtım+dış sıva= ~ 30 cm) yaklaşık olarak yarısına denk gelmesi bakımından önemlidir.

İkinci derece iklim koşullarında, $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yoğuşmaya sebep olmayan optimum katmanlaşma, 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 12.5 cm'lik çekirdek katmanı ile elde edilmiştir. Bu durumda, toplam duvar kalınlığı birinci bölgeye nazaran 2.5 cm artarak **"16.5 cm"** olmuştur. Ancak yine de, geleneksel çok katmanlı dış duvar kesitine (yaklaşık 30 cm kalınlık) nazaran daha ince duvar oluşumuna imkan vermektedir.

Üçüncü derece iklim bölgesinde, $U_{duvar}$ gereksinimi 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 15 cm'lik çekirdek katmanı kullanılarak elde edilebilmiştir. Söz konusu katmanlaşma yoğuşmaya sebep olmamasından dolayı ideal durum olarak tespit edilmiş olup toplamda **"19 cm"**lik bir duvar oluşumuna olanak tanımaktadır.

Dördüncü ve beşinci derece iklim bölgelerinde, 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve toplam duvar kalınlığını 19 cm'ye çıkaracak bir katmanlaşma $U_{duvar}$ gereksinimini sağlamada yetersiz kalmıştır. Bundan dolayı, söz konusu $U_{duvar}$ gereksinimini sağlamak amacıyla, iç ve dış koruyucu katmanların kalınlığı sabit tutulurken, çekirdek katmanının kalınlığı kademeli olarak arttırılmıştır. Bu durumda, $U_{duvar}$ gereksinimi toplam **"24 cm"** duvar kalınlığı ile (2 cm iç koruyucu+20 cm çekirdek+2 cm dış koruyucu) sağlanabilmiştir. Ancak, bütün koşullarda yoğuşmanın önüne geçilememiştir. Söz konusu iklim koşulları altında, iç ve dış koruyucu katmanlarını daha fazla kalınlaştırmadan yoğuşmayı engellemek mümkün görünmemektedir. Bu nedenle yalnızca 4. ve 5. derece iklim bölgelerinde, yoğuşma açısından yetersiz kalınan durumlarda duvarın iç yüzeyi, bileşiminde iç hava kalitesine zarar veren uçucu organik bileşikler (UOB) içermeyen su buharı geciktirici boya ve kaplamalar ile kaplanabilir. Datça Puzolanı esaslı jeopolimer monolitik duvar malzemesinin,

Türkiye'nin iklim koşullarına göre ideal kalınlığının karşılaştırılması Şekil 4.20'de verilmiştir.



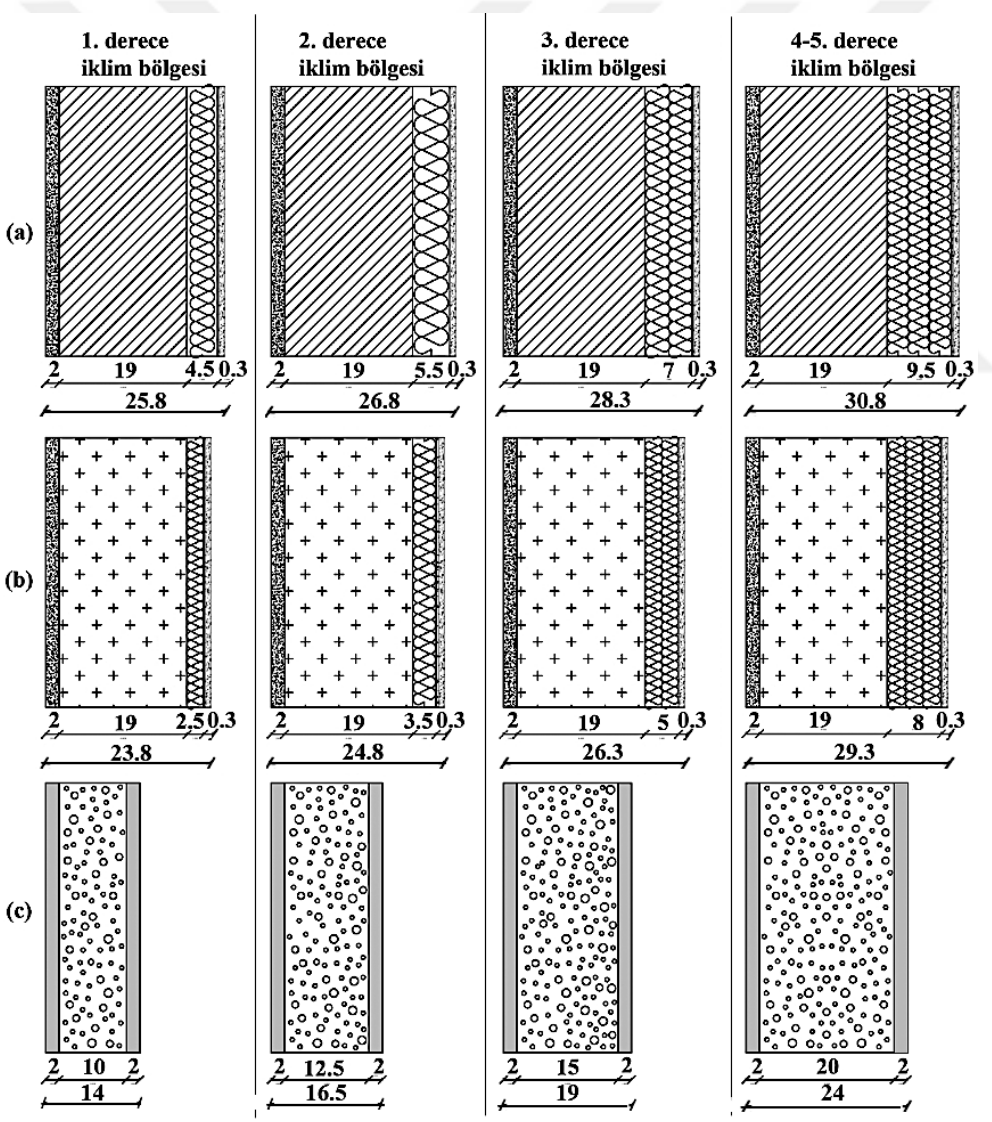

**Şekil 4.20 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değerleri ve toplam duvar kalınlıklarının karşılaştırılması.

Buna göre, iklim koşullarının sıcak/ılıman iklimden soğuk ve karasal iklime doğru ilerlemesiyle, $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan ve yoğuşma oluşmayan ideal duvar kalınlığı kademeli olarak artmaktadır. Bundan dolayı, bütün mevsimlerin yaşandığı bir coğrafyaya sahip olan ülkemizde, yapıların tek bir duvar kesitinin varlığından söz etmek doğru bir yaklaşım olmamaktadır. Yani, her bir iklim bölgesi için uygun duvar katmanlaşması tasarlanırken sistem bir bütün olarak ele alınmalı, ısıl performansın yanısıra yoğuşma ve bunların kullanıcı sağlığı üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmelidir.

## 4.4 Doğal Puzolan Esaslı Hafif Jeopolimer Duvar Malzemesi Kesitinin Türkiye'nin İklim Bölgelerinde Kullanılan Geleneksel Çok Katmanlı Dış Duvar Kesitiyle Karşılaştırılması

Datça puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıdan üretilen, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri ve ülkemizin farklı iklim bölgelerinde dış duvar malzemesi olarak kullanım olanakları belirlenen monolitik duvar malzemesinin kesiti, geleneksel çok katmanlı dış duvar kesitiyle İzoder TS 825 Hesap Programı (İzoder, 2021) kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Monolitik duvar malzemesi kesitinde,

Çizelge 4.9'da tespit edilen iklim bölgelerine göre "optimum katmanlaşma" olarak tespit edilen katmanlar kullanılmıştır. Dıştan yalıtımlı geleneksel bir duvar kesitinde ise, iç sıva (2 cm alçı sıva), gövde malzemesi (19 cm kalınlığında düşey delikli tuğla ya da gazbeton blok), ısı yalıtım malzemesi (inorganik yalıtım malzemesi olarak taşyünü) ve dış sıva (3 mm çimento sıva) kullanılmıştır. Gövde malzemesi olarak kalınlıkları sabit tutulan (19 cm) düşey delikli tuğla ve gazbeton blok malzemeler kullanılmıştır. Herbir geleneksel çok katmanlı duvar kesiti için, iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ gereksiniminin sağlandığı ve yoğuşma oluşmayan en ince ısı yalıtım malzemesi kalınlığı, toplam duvar kalınlığı ve $U_{duvar}$ değeri tespit edilmiş ve üretilen Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesiyle karşılaştırılmıştır. Duvar kesitleri Şekil 4.21'de ve elde edilen veriler Çizelge 4.10 ve Şekil 4.22'de gösterilmektedir.

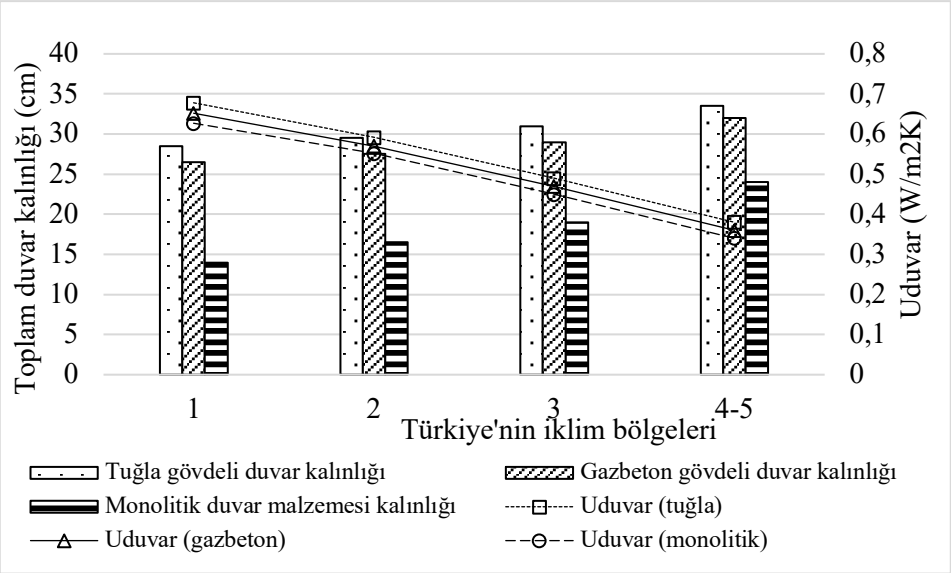



**Şekil 4.21 :** Karşılaştırması yapılan duvar kesitleri: (a) Düşey delikli hafif tuğla gövdeli geleneksel çok katmanlı duvar ; (b) Gazbeton gövdeli geleneksel çok katmanlı duvar; (c) Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi.

**Çizelge 4.10 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi kesitinin ve geleneksel çok katmanlı duvar kesitlerinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değeri ve toplam duvar kalınlığı bakımından karşılaştırılması.

| Derece gün bölgesi | Katman | Kalınlık (cm) | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | Isı iletkenlik katsayısı (W/mK) | Buhar dif. direnç faktörü (μ) | $U_{duvar}$ ($W/m^2K$) | Toplam duvar kalınlığı (cm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.668 | **25.8** |
| | D.D.Tuğla | 19 | 1.6 | 0.68 | 5 | | |
| | Isı yalıtımı | 4.5 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.652 | **23.8** |
| | Gazbeton | 19 | 0.8 | 0.25 | 5 | | |
| 1. | Isı yalıtımı | 2.5 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | 0.697 | **14** |
| | Çekirdek | 10 | 0.48 | 0.088 | 3 | | |
| | Dış cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.582 | **26.8** |
| | D.D.Tuğla | 19 | 1.6 | 0.68 | 5 | | |
| | Isı yalıtımı | 5.5 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.570 | **24.8** |
| | Gazbeton | 19 | 0.8 | 0.25 | 5 | | |
| 2. | Isı yalıtımı | 3.5 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | 0.582 | **16.5** |
| | Çekirdek | 12.5 | 0.48 | 0.088 | 3 | | |
| | Dış cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.480 | **28.3** |
| | D.D.Tuğla | 19 | 1.6 | 0.68 | 5 | | |
| | Isı yalıtımı | 7.0 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.479 | **26.3** |
| | Gazbeton | 19 | 0.8 | 0.25 | 5 | | |
| 3. | Isı yalıtımı | 5.0 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | 0.469 | **19** |
| | Çekirdek | 15 | 0.48 | 0.088 | 3 | | |
| | Dış cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.368* | **30.8** |
| | D.D.Tuğla | 19 | 1.6 | 0.68 | 5 | | |
| | Isı yalıtımı | 9.5 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç sıva | 2 | 1.4 | 0.70 | 10 | 0.363* | **29.3** |
| | Gazbeton | 19 | 0.8 | 0.25 | 5 | | |
| 4. | Isı yalıtımı | 8.0 | 0.15 | 0.045 | 1 | | |
| | Dış sıva | 0.3 | 2.0 | 1.6 | 15 | | |
| | İç cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | 0.360* | **24** |
| | Çekirdek | 20 | 0.48 | 0.088 | 3 | | |
| | Dış cidar | 2 | 2.08 | 0.312 | 5 | | |

D.D.Tuğla = Düşey delikli tuğla; * = Kesitte yoğuşma oluşumu vardır.




**Şekil 4.22 :** Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi kesitinin ve geleneksel çok katmanlı duvar kesitlerinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre $U_{duvar}$ değeri ve toplam duvar kalınlığı bakımından karşılaştırılması.

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.22'ye göre, birinci derece iklim koşulları altında, TS 825 uyarınca gereken $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşmaya sebep olmayan pişmiş toprak tuğla gövdeli ve dıştan yalıtımlı duvar kesitinin optimum katmanlaşması; 2 cm iç sıva (alçı sıva), 19 cm düşey delikli tuğla, 4.5 cm taşyünü ısı yalıtım malzemesi ve 0.3 cm dış sıva (çimento sıva) olarak tespit edilmiştir. Söz konusu duvar kesitinin toplam kalınlığı 25.8 cm'dir. Düşey delikli tuğla yerine birim hacim ağırlığı daha düşük olan aynı kalınlıktaki gazbeton blok kullanıldığında, ısı yalıtım malzemesi kalınlığı 2.5 cm'ye ve toplam duvar kalınlığı 23.8 cm'ye azalmaktadır. Aynı iklim koşulları altında, Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi, herhangi ek bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmaksızın, $U_{duvar}$ gereksinimini 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu ve 10 cm'lik çekirdek katmanı ile toplamda 14 cm kalınlıkta sağlayabilmektedir. Bu sonuç, geleneksel çok katmanlı duvar kesitinin neredeyse yarısı olması bakımından önemlidir.

İkinci derece iklim koşullarında, $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yoğuşmaya sebep olmayan tuğla gövdeli duvar kesitinin toplam kalınlığı 26.8 cm iken, gazbeton gövdeli duvar kesitinin toplam kalınlığı 24.8 cm'dir. Datça Puzolanı esaslı monolitik duvar malzemesi ise, aynı iklim koşullarında $U_{duvar}$ değerini 16.5 cm kalınlığı ile sağlamaktadır. Bu değer, çok katmanlı duvar kesitlerinin kalınlığından sırasıyla 0.61 ve 0.66 kat daha düşüktür.

Üçüncü derece iklim koşullarında tuğla ve gazbeton gövdeli duvar kesitlerinin toplam kalınlıkları sırasıyla 28.3 ve 26.3 cm iken, üretilen monolitik malzeme duvar kalınlığı bunlardan sırasıyla 9.3 ve 7.3 cm daha incedir (19 cm).

Dördüncü ve beşinci derece iklim bölgelerinde, $U_{duvar}$ gereksinimi tuğla, gazbeton ve monolitik malzemeli duvar kesitlerinde sırasıyla toplam 30.8, 29.3 ve 24 cm kalınlıklarıyla elde edilebilmiştir. Ancak, söz konusu iklim verilerinde duvar kesitlerindeki yoğuşmanın önüne geçilememiştir.

Şekil 4.22'ye göre bütün iklim koşullarında gazbeton gövdeli duvar kesitlerindeki ısı yalıtım malzemesi kalınlığının düşey delikli tuğla gövdeli duvar kesitindeki yalıtım malzemesine nazaran 2'şer cm daha ince olduğu tespit edilmiştir. Yani, gövde malzemesinin ısı geçirgenlik direncinin yüksek olmasına bağlı olarak, iklim şartları altında gereken ilave ısı yalıtım katmanının kalınlığı azalmaktadır. Ayrıca, iklim koşullarının sıcak/ılıman iklimden soğuk/karasal iklime ilerlemesiyle $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan ve yoğuşmaya sebep olmayan geleneksel çok katmanlı duvar kalınlıklarının artması, Datça Puzolanı esaslı monolitik malzeme kalınlığındaki kademeli artışla da uyumludur.

# 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Doğal puzolan esaslı hafif jeopolimer duvar malzemesi geliştirmek amacıyla gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar ve geliştirilen öneriler aşağıda özetlenmektedir:

- Datça Puzolanı'nın, alkali kimyasallar ile aktive edildiğinde, jeopolimer bağlayıcı üretimine elverişli olduğu ve jeopolimer öncüsü (hammaddesi) olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.
- En yüksek mekanik özeliklere sahip Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcı, potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum silikat ($Na_2SiO_3$) alkali aktivatörlerinin kombinasyonuyla üretilebilmektedir.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelikleri 12.5 molar (M) KOH konsantrasyonunda en yüksek değerdedir. 12.5 M KOH çözeltisinin 2.5 aktivatör oranı ($Na_2SiO_3$/KOH) ile birlikte kullanılması, polikondansasyon reaksiyonlarının gelişimi için gerekli olan öncü maddenin daha fazla çözünmesine, daha az gözenekli ve daha az geçirgen bir matris oluşumuna ve en yüksek mekanik özeliklere sahip malzeme üretimine imkan vermektedir. Alkali konsantrasyonunu ve aktivatör oranını belirli bir seviyenin üzerine çıkararak daha kaliteli bir jeopolimer üretmeye çalışmak, malzeme özelikleri ve ekonomik olma kriteri birarada düşünüldüğünde önerilmemektedir.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya standart kum eklemek, kumun bağlayıcı üzerindeki seyreltici etkisinden dolayı mekanik özelikleri azaltmaktadır. Ancak kum ilavesi, malzeme işlevinden beklenen performans kriterlerini karşıladığı sürece karışımın maliyetini düşürmesi açısından önemlidir. Jeopolimer harcın puzolan/kum oranı 1/3 olarak sabit tutulmuştur. Farklı puzolan/kum oranlarının harcın mekanik özelikleri üzerindeki etkisi de ayrıca araştırılması gereken bir konudur.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın ideal toplam alkali aktivatör/puzolan oranı kütlece 0.3'tür. Alkali aktivatör miktarı daha fazla artırıldığında, fazla

miktardaki alkali kimyasal suyun buharlaşmasını ve buna bağlı olarak harcın içyapı gelişimini engellediğinden fiziksel ve mekanik özelikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca konu ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, malzemeden beklenen performans kriterlerinden ödün verilmeksizin, alkali aktivatörlerin minimum miktarda kullanımına yönelmek gerekmektedir.

- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın ideal kür koşulu 90 °C sıcaklıkta ve PE kaplanarak 24 saat etüv kürüdür. % 90±5 bağıl nemde (PE kaplı halde) kürleme daha yüksek mukavemet sonuçları sağlarken, % 10±5 bağıl nemde PE kaplanmaksızın kürleme, kuruma rötresinden dolayı numunelerin yüzeyinde gözle görülür çatlaklara neden olmaktadır. Bu nedenle kürleme sırasındaki nem koşulları sağlanmalıdır.
- Alkali aktivatör türü, alkali hidroksit konsantrasyonu, aktivatör oranı, toplam aktivatör/puzolan oranı ve kür koşullarının optimize edilmesiyle 2.0 g/ $cm^3$ yoğunluk, % 5.48 su emme oranı ve 10.57 MPa basınç dayanımına sahip jeopolimer bağlayıcı üretilmesi mümkündür.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harcın su emme oranı (% 5.48) ve doyma derecesinin (0.64) cephede kullanılan malzeme özelikleriyle ilgili standart gereksinimini karşılamasından dolayı, sertleşmiş harcın tasarlanan monolitik duvar kesitinde iç ve dış koruyucu katman olarak kullanılabilmesi mümkün olabilmektedir.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcının alüminyum tozu ile kimyasal yöntemle köpürtülmesiyle yüksek poroziteye ve iyi ısıl performansa sahip bir jeopolimer köpük üretilebilmesi umut vaat etmektedir.
- Söz konusu jeopolimer köpüğün taze haldeki hacimsel stabilitesini koruması ve çökmenin engellenebilmesi için karışıma ince öğütülmüş silis kumu eklemek önemlidir.
- İnce kum/puzolan oranının jeopolimer köpüğün boşluk gelişimi, fiziksel ve mekanik özelikleri üzerindeki etkisi önemlidir. 20/100 ideal ince kum/puzolan oranında herhangi bir yüzeysel deformasyon ya da taze harcın çökmesi gözlenmemektedir. Karışımın ince kum oranının artmasıyla hacimsel genleşme oranı azalmakta, boşluk büyüklüğü artmakta, boşluk boyutu dağılımı homojenlikten uzaklaşmakta ve boşlukların birbiriyle bağlantısı artmaktadır. Ayrıca, kum miktarı arttırıldığında, harcın porozitesi ve dolayısıyla ısıl

performansı azaldığı için jeopolimer köpüğün kum oranı gereksiz yere arttırılmamalıdır.

- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpükten beklenen fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri sağlayan ideal Al tozu/puzolan oranı ağırlıkça % 0.5 olarak tespit edilmiştir. Söz konusu orana sahip numuneler, daha küçük gözenek çapına, daha düzenli gözenek boyutu dağılımına, gözeneklerin birbirleriyle daha az bağlantısına (daha az birleşme) ve daha homojen bir içyapıya sahiptir.
- Jeopolimer köpüğün ısı iletkenlik katsayısı, makro boyutlu gözeneklerin (> 10 μm) toplam hacmi, boyutu, şekli ve birbirleriyle olan bağlantılarından etkilenmektedir. Daha fazla miktarda, daha küçük, daha küresel ve birbiriyle daha az bağlantılı gözenekler poroz yapının ısı yalıtım kapasitesini arttırmaktadır.
- İdeal karışım oranları tespit edilmiş olan Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğün ısı iletkenlik katsayısı (0.088 W/mK), yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan hafif duvar malzemesi alternatifleri olan düşey delikli hafif tuğla, pomza betonu, gazbeton ve köpük beton gibi bölücü duvar malzemelerinin ısı iletkenlik katsayılarına nazaran daha düşüktür. Söz konusu geleneksel duvar malzemelerinin ülkemiz iklim koşullarında iyi bir ısıl performans sergileyebilmesi için bir ısı yalıtım malzemesi ile birlikte kullanılmalıdır. Diğer yandan, Datça Puzolanı esaslı jeopolimerin ısı iletkenlik katsayısının söz konusu malzemelere nazaran daha düşük olması, geliştirilmiş olan malzemenin herhangi bir ısı yalıtım malzemesine gerek duyulmadan kullanılma potansiyelinin olabileceğini göstermektedir.
- Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpük yapı endüstrisinde rijit bir duvar yalıtım malzemesi olarak kullanılmak üzere umut verici veriler sağlamıştır. Bununla birlikte, nispeten düşük basınç dayanımı ve yüksek su emme oranı, iç ve dış koruyucu katmanlar ile telafi edilebilir ve söz konusu köpük, makro ölçekte homojen davranan lamine bir jeopolimerin çekirdek tabakası olarak kullanılabilir.
- İç ve dış koruyucu katman ve çekirdek katmanı olmak üzere üç tabakalı monolitik duvar malzemesinin Türkiye'nin beş farklı iklim bölgesinde kullanılma olanakları değerlendirildiğinde, birinci derece iklim bölgesinde gereken $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşmaya

sebep olmayan optimum katmanlaşma, 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 10 cm'lik çekirdek katmanı olarak tespit edilmiştir. Böylece herhangi ek bir malzeme kullanılmaksızın fiziksel, mekanik ve ısıl performans, toplam 14 cm kalınlığındaki duvarla sağlanabilmektedir.

- İkinci derece iklim koşulları altında, $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yoğuşmaya neden olmayan optimum katmanlaşma 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 12.5 cm'lik çekirdek katmanı ile elde edilmiştir. Bu durumda, toplam duvar kalınlığı 16.5 cm'dir.
- Üçüncü derece iklim bölgesinde, $U_{duvar}$ gereksinimi 2'şer cm'lik iç ve dış koruyucu katman ve 15 cm'lik çekirdek katmanı kullanılarak elde edilebilmiştir. Söz konusu katmanlaşma yoğuşmaya neden olmamasından dolayı ideal durum olarak tespit edilmiş olup toplamda 19 cm'lik bir duvar oluşumuna olanak tanımaktadır.
- Dördüncü ve beşinci derece iklim bölgelerinde, 2 cm iç, 2 cm dış koruyucu ve 20 cm çekirdek katmanı ile kriterler sağlanabilmiştir. Söz konusu iklim bölgelerindeki 24 cm kalınlığa kadar olan bütün duvar kesiti denemelerinde yoğuşma gerçekleşmiştir. Söz konusu iklim koşulları altında katmanları daha fazla kalınlaştırmadan yoğuşmayı engellemek mümkün görünmemektedir. Söz konusu iklim bölgelerinde, yoğuşma açısından yetersiz kalınan durumlarda duvarın iç yüzeyi, bileşiminde iç hava kalitesine zarar veren uçucu organik bileşikler (UOB) içermeyen su buharı geciktirici boya ve kaplamalar ile kaplanabilir.
- Türkiye'nin bütün iklim koşullarında, Datça Puzolanı esaslı jeopolimer monolitik duvar malzemesi farklı kalınlıklarla TS 825 standart $U_{duvar}$ gereksinimini karşılayabilmektedir. Ülkemiz iklim koşullarının sıcak/ılıman iklimden soğuk ve karasal iklime doğru ilerlemesiyle, $U_{duvar}$ gereksinimini sağlayan ve yıl içerisinde herhangi bir ayda yoğuşma oluşumuna neden olmayan ideal duvar kalınlığı kademeli olarak artmaktadır. Bundan dolayı, her bir iklim bölgesi için uygun duvar katmanlaşması tasarlanırken aynı türde duvar kesiti tasarımı yerine, sistem bir bütün olarak ele alınmalı, duvarlardaki ısıl performansın yanısıra yoğuşma ve bunların kullanıcı sağlığı üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilmeli ve ideal malzeme katmanlaşmasına karar verilmelidir.

- Üretilen monolitik duvar malzemesinin kesiti, geleneksel çok katmanlı dış duvar kesitleriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirildiğinde, monolitik malzemenin $U_{duvar}$ değerini sağlayan ve yoğuşma oluşmayan toplam kalınlığı, düşey delikli pişmiş toprak tuğla ve gazbeton gövdeli çok katmanlı ve dıştan yalıtımlı duvarların toplam kalınlığının yaklaşık yarısı olması bakımından önemlidir. Yani, monolitik duvar malzemesinin yapılarda kullanılabilmesiyle, toplam duvar kalınlığı yarı yarıya azalması ve yapının kullanılabilir alanında artış olması beklenmektedir. Duvar kalınlığındaki azalma yanısıra, malzeme çeşidinin, sayısının ve yapı yükünün azalması kadar, bitmişlik düzeyi yüksek bir malzeme üretimi sağlanmış olmaktadır.
- Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, Türkiye'nin yerel hammadde kaynağı olan doğal Datça Puzolanı'nın alkali aktivasyonuyla üretilen, ideal karışım oranları, kür koşulları, fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri tespit edilmiş, ülkemizdeki farklı iklim koşulları altında dış duvar kesitinden beklenen ısıl performansı herhangi bir ısı yalıtım malzemesi kullanılmadan sağlayabilen, koruma gereksinimini herhangi ek bir kaplamaya gerek duyulmaksızın sağlayabilen, kendi içinde katmanlı ancak makro ölçekte homojen davranan bir jeopolimerin üretilebileceği tespit edilmiştir.
- Fiziksel, mekanik ve ısıl özelikleri ayrı ayrı tespit edilen Datça Puzolanı esaslı jeopolimer harç ve köpüğün aynı üretim bandında monolitik bir malzeme halinde üretilmesi, duvar elemanı oluşturularak yapı elemanı ölçeğinde test edilmesi ve üretilen monolitik elemanların yanyana ve üstüste getirildiğinde derz bölgelerinde oluşabilecek ısı köprülerinin engellenmesi gibi konular ileriki çalışmalarda araştırılmalıdır. Bu bağlamda, iç ve dış koruyucu katman ve çekirdek katmanı biraraya getirilirken, jeopolimer malzemenin sertleşme faz farkından yararlanılabileceği düşünülmektedir. Her bir katmanın dökümü arasında belirli bir süre beklendikten sonra diğer katman dökülebilir ve böylece reaksiyon gelişimi tamamlanmadan katmanların birbiriyle aderansı sağlanabilir. Söz konusu üretim koşulları gelecek çalışmalarda araştırılmalıdır.
- Diğer yandan, söz konusu malzemenin ıslanma-kuruma, donma-çözünme, tuz kristalenmesi, atmosferik kirleticiler ve yangın karşısındaki dayanıklılık özelikleri, lifler ile donatılarak panel olarak kullanılabilme olanakları ve yaşam

döngüsü sürecindeki çevresel etki değerlendirmesi araştırılması gereken önemli konular olarak karşımıza çıkmaktadır.

- Geliştirilen monolitik duvar malzemesinin Türkiye'nin iklim bölgelerine göre ısıtma yüklerinin etkili olduğu yapı türlerinin dışında, soğutma yüklerinin de önemli olduğu ve soğutma amacıyla büyük miktarda enerji tüketen yapı türlerinde de kullanılma olanakları araştırılmalıdır. Ayrıca konu, malzemenin ısı biriktirme kapasitesi özeliği bağlamında da araştırılmalıdır.
- Doğal puzolan olan Datça Puzolanı ve alkali kimyasallar ile geliştirilen malzemenin, ülkemiz genelinde puzolanik özeliğe sahip diğer topraklarla da geliştirilebilmesine yönelik çalışmalar yapılarak, Türkiye'nin yerel kaynaklarıyla jeopolimer geliştirmeye yönelik genel bir sonuca varılabilir. Söz konusu hammadde kaynaklarının bulunduğu bölgelerde, amaçlanan malzemenin üretim tesisleri kurmak mümkün olabilir. Böylece bölgesel istihdamın sağlanmasına, her bölgenin kendi hammadde kaynağını kullanarak yerel ve ekonomik yapı malzemelerini üretip kullanmasına ve ülke genelinde yapı malzemelerinin taşınmasından dolayı tüketilen enerji miktarının ve karbondioksit salımının azaltılmasına katkı sağlanabilir.

## KAYNAKLAR


**Abdul Aleem, M. I. & Arumairaj, P. D.** (2012). Geopolymer concrete- a review, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies, 1* (2), 118–122.

**Aguilar, R. A., Diaz, O. B. & Garcia, J. I. E.** (2010). Lightweight concretes of activated metakaolin-fly ash binders, with blast furnace slag aggregates, *Construction and Building Materials, 24*, 1166–1175.

**Ahmari, S. & Zhang, L.** (2012). Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization, *Construction and Building Materials, 29*, 323–331.

**Akgül, E. & Tanaçan, L.** (2010). Evaluation of the pozzolanic activity of the earth of Datça as a building material, *International Journal of Architectural Heritage, 5* (1), 1–26.

**Akman, S.** (1978). *Deney ve Ölçme Tekniğine Giriş.* İstanbul, ITÜ Inşaat Fakültesi Matbaası.

**Al-Bakrı Abdullah, M. M., Yahya, Z., Tahir, M. F. M., Hussın, K., Bınhussaın, M. & Sandu, A. V.** (2014). Fly ash based lightweight geopolymer concrete using foaming agent technology, *Applied Mechanics and Materials, 679*, 20–24.

**Aldred, J., Day, J. & Glasby, T.** (2015). Geopolymer concrete – No longer labcrete!, *40th Conference on Our World in Concrete & Structures,* Signapore: August 26-28.

**Allahverdi, A., Mehrpour, K. & Kani, E. N.** (2008a). Taftan pozzolan-based geopolymer cement, *IUST International Journal of Engineering Science, 19* (3), 1–5.

**Allahverdi, A., Mehrpour, K. & Kani, E. N.** (2008b). Investigating the possibility of utilizing pumice-type natural pozzonal in production of geopolymer cement, *Ceramics-Silikáty, 52* (1), 16–23.

**Allahverdi, A., Mehrpour, K. & Kani, E. N.** (2008c). *Geopolymer cement from Sirjan pozzolan.* Retrieved May 21, 2018, from https://www.researchgate.net/publication/313188430

**Allahverdi, A., Kani, E. N. & Yazdanipour, M.** (2011). Effects of blast-furnace slag on natural pozzolan-based geopolymer cement, *Ceramics – Silikáty, 55* (1), 68–78.

**Amran, Y. M., Farzadnia, N. & Ali, A. A.** (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review, *Construction and Building Materials, 101*, 990–1005.

**Ascem Cement.** (2019). *Retrieved January 20, 2019, from http://www.ascem.nl/upload/file/1264409105.pdf*

**ASTM C62-17** (2017). *Standard specification for building brick (solid masonry units made from clay or shale).* West Conshohocken, United States.

**ASTM C109/C109M-20b** (2020). *Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. Or [50 Mm] Cube Specimens).* West Conshohocken, United States.

**ASTM C216** (2021). *Standard specification for facing brick (solid masonry units made from clay or shale).* West Conshohocken, United States.

**ASTM C518-17** (2017). *Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus.* West Conshohocken, United States.

**ASTM C1437-20** (2020). *Standard test method for flow of hydraulic cement mortar.* West Conshohocken, United States.

**Azimi, E. A., Al Bakri Abdullah, M. M., Ming, L. Y., Yong, H. C., Hussin, K. & Aziz, I. H.** (2016). Processing and properties of geopolymers as thermal insulating materials: A review, *Reviews on Advanced Materials Science, 44*, 273–285.

**Bai, C. & Colombo, P.** (2018). Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review, *Ceramics International, 44* (14), 16103–16118.

**Bai, C., Ni, T., Qiaoling, W., Hongqiang, L. & Colombo, P.** (2018). Porosity, mechanical and insulating properties of geopolymer foams using vegetable oil as the stabilizing agent, *Journal of European Ceramic Society, 38*, 799–805.

**Bai, C., Li, H., Bernardo, E. & Colombo, P.** (2019), Waste-to-resource preparation of glass-containing foams from geopolymers, *Ceramics International, 45* (6), 7196–7202.

**Barbosa, V. F. F. & MacKenzie, K. J. D.** (2003). Thermal behaviour of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate, *Materials Research Bulletin, 38*, 319–331.

**Barış, K. E. & Tanaçan, L.** (2017). Earth of Datça: Development of pozzolanic activity with steam curing, *Construction and Building Materials, 139*, 212–220.

**Barış, K. E. & Tanaçan, L.** (2021). Improving the geopolymeric reactivity of Earth of Datça as a natural pozzolan in developing green binder, *Journal of Building Engineering, 41*, 102760.

**Bayless, D.** (2005). *Statistical rejection of "bad" data–Chauvenet's criterion.* Retrieved April 4, 2005, from https:// chetaero.files.wordpress.com/2016/11/chauvenet.pdf

**Bayraktar, D. & Bayraktar, E. A.** (2016). Mevcut binalarda ısı yalıtımı uygulamalarının değerlendirilmesi, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7* (1), 59–66.

**Berge, B.** (2009). *The Ecology of Building Materials,* UK, Architectural Press, Elsevier Ltd.

**Bligh, R. & Glasby, T.** (2013). *Development of geopolymer precast floor panels for the Global Change Institute at University of Queensland.* Retrieved April 14, 2013, from https://www.wagner.com.au/media/36770/GCI-Paper_Concrete-2013-Conference_Australia.pdf.

**Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N. & Ramezanianpour, A. A.** (2011a). Effect of type, form, and dosage of activators on strength of alkali-activated natural pozzolans, *Cement and Concrete Composites, 33*, 251–260.

**Bondar, D., Lynsdale, C. J., Milestone, N. B., Hassani, N. & Ramezanianpour, A. A.** (2011b). Effect of adding mineral additives to alkali-activated natural pozzolan paste, *Construction and Building Materials, 25* (6), 2906–2910.

**Boxley, C., Nair, B. & Balaguru, P.** (2009). Practical applications of geopolymers, developments in porous, biological and geopolymer ceramics, *Ceramic Engineering and Science Proceedings, 28* (9), 321–336.

**Chen, C., Li, Q., Shen, L. & Zhai, J.** (2012). Feasibility of manufacturing geopolymer bricks using circulating fluidized bed combustion bottom ash, *Environmental Technology, 33*, 1313–1321.

**Chen-Tan N. W., Van Riessem A., Ly C. V. & Southam, D.C.** (2009). Determining the reactivity of a fly ash for production of geopolymer, *Journal of American Ceramic Society, 887*, 881–887.

**Chindaprasirt P., De Silva, P., Sagoe-crentsil, K. & Hanjitsuwan, S.** (2012). Effect of SiO2 and Al2O3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems, *Journal of Material Science, 47*, 4876–4883.

**Collins, F. & Sanjayan, J. G.** (1998). Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na2CO3, *Cement and Concrete Research, 28* (5), 655–664.

**COM 571.** (2011). *Roadmap to a resource efficient Europe. Retrieved March 21, 2018, from https://www.eea.europa.eu/policy-documents/com-2011-571-final-roadmap*

**COM 885.** (2011). *Energy Roadmap 2050, Brussels. Retrieved March 21, 2018, from https://www.roadmap2050.eu*

**Cui, Y., Wang, D., Zhao, J., Li, D., Ng, S. & Rui, Y.** (2018). Effect of calcium stearate-based foam stabilizer on pore characteristics and thermal conductivity of geopolymer foam material, *Journal of Building Engineering, 20*, 21–29.

**Davidovits J.** (1979). Synthesis of new high temperature geo-polymers for reinforced plastics/composites, *SPE PACTEC 79 Society of Plastic Engineers, Brookfield Center,* 151–154.

**Davidovits J.** (1987). Ancient and modern concretes: what is the real difference, *Concrete International, 12*, 23–25.

**Davidovits, J.** (1994a). Properties of geopolymer cements, *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials,* Kiev, Ukraine, 131–149.

**Davidovits, J.** (1994b). High-alkali cements for 21st century concretes, *ACI Special Publication, 144*, 383–398.

**Davidovits, J.** (1999). Chemistry of geopolymeric systems, terminology, *Geopolymer'99 International Conference,* France.

**Davidovits, J.** (2002). 30 years of successes and failures in geopolymer applications. *Market Trends and Potential Breakthroughs, Geopolymer 2002 Conference,* Melbourne, Australia.

**Davidovits, J.** (2011). *Geopolymer Chemistry and Applications.* Institut Géopolymère, Saint-Quentin.

**Davidovits, J.** (2015). *False values on CO2 emission for geopolymer cement/concrete published in scientific papers.* Geopolymer Institute Library. Retrieved January 25, 2018, from www.geopolymer.org.

**Davraz, M., Koru, M., Akdağ, A., Kılınçarslan, Ş., Delikanlı, Y. & Çabuk, M.** (2020). Investigating the use of raw perlite to produce monolithic thermal insulation material, *Construction and Building Materials, 263*, 1–7.

**De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. & Sirivivatnanon, V.** (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al2O3 and SiO2, *Cement and Concrete Research, 37*, 512–518.

**Değirmenci F. N.** (2018). Utilization of natural and waste pozzolans as an alternative resource of geopolymer mortar, *International Journal of Civil Engineering, 16,* 179–188.

**Dembovska, L., Bajare, D., Ducman, V., Korat, L. & Bumanis, G.** (2017). The use of different by-products in the production of lightweight alkali activated building materials, *Construction and Building Materials, 135*, 315–322.

**Dhasindrakrishna, D. K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. & Sanjayan, J. G.** (2020). Effect of yield stress development on the foamstability of aerated geopolymer concrete, *Cement and Concrete Research, 138,* 106233.

**Dhasindrakrishna, D. K., Pasupathy, K., Ramakrishnan, S. & Sanjayan, J. G.** (2021). Progress, current thinking and challenges in geopolymer foam concrete technology, *Cement and Concrete Composites, 116,* 103886.

**Diao, R., Sun, L. & Yang, F.** (2018). Thermal performance of building wall materials in villages and towns in hot summer and cold winter zone in China, *Applied Thermal Engineering, 128,* 517–530.

**Diop M. B. & Grutzeck, M. W.** (2008). Low temperature process to create brick, *Construction and Building Materials, 22* (6), 1114–1121.

**Diop M. B., Grutzeck, M. W. & Molez, L.** (2011). Comparing the performances of brick made with natural clay and clay activated by calcinations and addition of sodium silicate, *Applied Clay Science, 54*, 172–178.

**Dondi, M., Mazzanti, F., Principi, P., Raimondo, M. & Zanarini, G.** (2004). Thermal conductivity of clay bricks, *Journal of Material and Civil Engineering, 16*, 8–14.

**Dong, J.** (1999). A review of research and application of alkaline slag cement and concrete in China, *The 2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes,* Kiev, Ukraine, 705-711.

**Dong, B., Wang, F., Abadikhah, H., Hao, L., Xu, X., Khan, S. A., Wang, G. & Agathopoulos, S.** (2019). Simple fabrication of concrete with remarkable self-cleaning ability, robust superhydrophobicity, tailored porosity, and highly thermal and sound insulation, *ACS Applied Material Interfaces, 11*, 42801–42807.

**Duan, P., Song, L., Yan, C., Ren, D. & Li, Z.** (2017). Novel thermal insulating and lightweight composites from metakaolin geopolymer and polystyrene particles, *Ceramics International, 43*, 5115–5120.

**Ducman, V. & Korat, L.** (2016). Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H2O2 as foaming agents, *Materials Characterization, 113,* 207–213.

**Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A. & Van Deventer J. S. J.** (2007). Geopolymer technology: The current state of the art, *Journal of Material Science, 42,* 2917–2933.

**E-Crete.** (2019). *Engineering Properties and Case Studies. Retrieved January 21, 2019, from http://www.acm.com.au/pdf/b69822_d3b9c3173f174bf59e9d3427892ab0c6.pdf*

**EPBD** (2008). *Binalarda Enerji Performansı Yönetmeliği.* Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Türkiye.

**Eurostat.** *(2016). Complete energy balances – annual data. Retrieved January 28, 2018, from* http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=nrg_110a&lang=en

**Farhan, K. Z., Johari, M. A. M. & Demirboğa, R.** (2020). Assessment of important parameters involved in the synthesis of geopolymer composites: A review, *Construction and Building Materials, 264,* 120276.

**Feng, J., Zhang, R., Gong, L., Li, Y., Cao, W. & Cheng, X.** (2015). Development of porous fly ash-based geopolymer with low thermal conductivity, *Materials Design, 65,* 529–533.

**Fernández-Jiménez, A. & Palomo, A.** (2003). Characterisation of fly ashes: potential reactivity as alkaline cements, *Fuel, 82* (18) 2259–2265.

**Fernández-Jiménez, A., Palomo, A. & Alonso, M. M.** (2005). Alkali activation of fly ashes: mechanisms of reaction, *Congress of Non-Traditional Cement and Concrete II, University of Technology,* Brno, Czech Republic, 1–12.

**Firdous, R., Stephan, D. & Djobo, J. N. Y.** (2018). Natural pozzolan based geopolymers: A review on mechanical, microstructural and durability characteristics, *Construction and Building Materials, 190,* 1251–1263.

**Galiano, Y. L., Pereira, C. F. & Izquierdo, M.** (2016). Contributions to the study of porosity in fly ash-based geopolymers. Relationship between degree of reaction, porosity and compressive strength, *Material Construccion, 66,* 1–14.

**Ganesan, N., Indira, P. V. & Santhakumar, A.** (2013). Prediction of ultimate strength of reinforced geopolymer concrete wall panels in one-way action, *Construction and Building Materials, 48,* 91–97.

**Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A. & Fernández-Jiménez, A.** (2015a). An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. In F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (Vol. 2, pp.19-47). Retrieved from https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.19

**Gualtieri, M. L., Cavallini, A. & Romagnoli, M.** (2016). Interactive powder mixture concept for the preparation of geopolymers with fine porosity, *Journal of European Ceramic Society, 36* (10), 2641–2646.

**Gunasekara, C. M.** (2016). *Influence of properties of fly ash from different sources on the mix design and performance of geopolymer concrete.* (Doctoral dissertation). School of Engineering College of Science, Engineering and Health RMIT University, Melbourne, Australia.

**Haddad, R. H. & Alshbuol, O.** (2016). Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: a parametric study, *Construction and Building Materials, 114,* 699–707.

**Haddad, R. H., & Lababneh, Z. K.** (2020). Geopolymer composites using natural pozzolan and oil-shale ash base materials: a parametric study, *Construction and Building Materials, 240,* 117899.

**Hadi, M. N. S., Zhang, H. & Parkinson, S.** (2019). Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability, *Journal of Building Engineering, 23*, 301–313.

**Hajimohammadi, A., Ngo, T., Mendis, P., Kashani, A. & Van Deventer, J. S. J.** (2017). Alkali activated slag foams: The effect of the alkali reaction on foam characteristics, *Journal of Cleaner Production, 147,* 330–339.

**Hajimohammadi, A., Ngo, T. & Kashani, A.** (2018a). Sustainable one-part geopolymer foams with glass fines versus sand as aggregates, *Construction and Building Materials, 171,* 223–231.

**Hajimohammadi, A., Ngo, T. & Kashani, A.** (2018b). Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders, *Journal of Cleaner Production, 193,* 593–603.

**Hamad, A. J.** (2014). Materials, production, properties and application of aerated lightweight concrete: Review, *International Journal of Material Science and Engineering, 2* (2), 152–157.

**Haq, E. U., Padmanabhan, S. K. & Licciulli, A.** (2015). Microwave synthesis of thermal insulating foams from coal derived bottom ash, *Fuel Processing Technology, 130,* 263–267.

**Haq, E. U., Padmanabhan, S. K., Zubair, M., Ali, L. & Licciulli, A.** (2016). Intumescence behaviour of bottom ash based geopolymer mortar through microwave irradiation – As affected by alkali activation, *Construction and Building Materials, 126,* 951–956.

**Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. & Rangan, B.** (2004). On the development of fly ash-based geopolymer concrete, *ACI Materials Journal, 101,* 467–472.

**Heah, C. Y., Kamarudin, H., Mustafa Al Bakri, A. M., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C. M. & Liew, Y. M.** (2012). Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers, *Construction and Building Materials, 35,* 912–922.

**Hendriks, C. A., Worrell, E., Price, L., Martin, N. & Ozawa Meida, L.** (1999). The reduction of green house gas emissions from the cement industry, *IEA Greenhouse Gas R&D Programme Report PH3/7,* Cheltenham, UK.

**Henon, J., Alzina, A., Absi, J., Smith, D. S. & Rossignol, S.** (2013). Potassium geopolymer foams made with silica fume pore forming agent for thermal insulation, *Journal of Porous Material, 20,* 37–46.

**Henon, J., Pennec, F., Alzina, A., Absi, J., Smith, D. S. & Rossignol, S.** (2014). Analytical and numerical identification of the skeleton thermal conductivity of a geopolymer foam using a multi-scale analysis, *Computational Materials Science, 82,* 264–273.

**Huang, Y., Gong, L., Shi, L., Cao, W., Pan, Y. & Cheng, X.** (2018). Experimental investigation on the influencing factors of preparing porous fly ash-based geopolymer for insulation material, *Energy and Buildings, 168,* 9–18.

**Husbands, T.B., Malone, P.G. & Wakeley, L.D.** (1994). Performance of concretes proportioned with Pyrament Blended Cement, *U.S. Army Corps of Engineers Construction Productivity Advancement Research Program,* Report CPAR-SL-94-2.

**Incropera, F. P., & DeWitt, D. P.** (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* New York, John Wiley & Sons.

**IPCC, Climate Change.** (2001). *The Scientific Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. Retrieved January 20, 2017, from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/07/WG1_TAR_FM.pdf.

**Irshidat, M. R., Abdel-Jawad, Y. A. & Al-Sughayer, R.** (2018). Feasibility of producing sustainable geopolymer composites made of locally available natural pozzolan, *Journal of Material Cycles Waste Management, 20,* 1751–1760.

**İbrahim, M., Johari, M. A. M., Rahman, M. K. & Maslehuddin, M.** (2017). Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete, *Construction and Building Materials, 147,* 648–660.

**İzoder** (2021). *TS 825 hesap programı.* Retrieved September 28, 2021, from https://www.izoder.org.tr/hesap-makinesi/ts_825_yardim.pdf.

**Jaarsveld, J. G. S., Deventer, J. S. J. & Lorenzeni, L.** (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. theory and applications, *Minerals Engineering, 10,* 659–669.

**Jones, M. R., Ozlutas, K. & Zheng, L.** (2015). Stability and instability of foamed concrete, *Magazine of Concrete Research, 68* (11), 1–8.

**Kamseu, E., Leonelli, C., Perera, D. S., Melo, U. C. & Lemougna, P. N.** (2009). Investigation of volcanic ash-based geopolymers as potential building materials, *International Ceramic Review, 58,* 136–140.

**Kamseu, E., Nait-Ali, B., Bignozzi, M. C., Leonelli, C., Rossignol, S. & Smith, D. S.** (2012). Bulk composition and microstructure dependence of effective thermal conductivity of porous inorganic polymer cements, *Journal of European Ceramic Society, 32* (8), 1593–603.

**Kamseu, E., NGouloure, Z. N. M., Ali, B. N., Zekeng, S., Melo, U. C., Rossignol, S. & Leonelli, C.** (2015). Cumulative pore volume, pore size distribution and phases percolation in porous inorganic polymer composites: Relation microstructure and effective thermal conductivity, *Energy and Buildings, 88,* 45–56.

**Kani, E. N. & Allahverdi, A.** (2009a). Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan, *Journal of Materials Science, 44,* 3088–3097.

**Kani, E. N. & Allahverdi, A.** (2009b). Effect of chemical composition on basic engineering properties of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan, *Ceramics – Silikáty, 53* (3), 195–204.

**Kantarcı, F., Türkmen, I. & Ekinci, E.** (2019). Optimization of production parameters of geopolymer mortar and concrete: a comprehensive experimental study, *Construction and Building Materials, 228,* 116770.

**Karagöl, E. T. & Kavaz, İ.** (2017). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji, *Analiz, 197.*

**Khale, D. & Chaudhary, R.** (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review, *Journal of Materials Science, 42,* 729–746.

**Kocataşkın, F.** (2000). *Yapı Malzemesi Bilimi-Özelikler ve Deneyler.* Birsen Yayınevi, İstanbul.

**Komnitsas, K., Zaharaki, D.** (2007). Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry, *Minerals Engineering, 20* (14), 1261–1277.

**Kranzler, T.** (2014). Performance of monolithic external masonry walls made with thermal-insulating clay blocks, *9th International Masonry Conference,* Guimarães, Portugal.

**Krivenko, P. V.** (1986). *Synthesis of cementitious materials of the Me2O-MeO-Me2O3-SiO2-H2O system with required properties.* (Doctoral dissertation). KISI Publis, Kiev, Ukraine.

**Krivenko, P. V.** (1994b). Alkaline cements, *1st International Conference on Alkaline Cements and Concretes,* Kiev, Ukraine.

**Krivenko, P. V.** (1999). Alkaline cements and concretes: Problems of durability, *2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes,* Kiev, Ukraine.

**Lach, M., Korniejenko, K., Mikuła, J.** (2016). Thermal insulation and thermally resistant materials made of geopolymer foams, *Procedia Engineering, 151,* 410–416.

**Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D. & Melo, U. F. C.** (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash, *Ceramics International, 37,* 3011–3018.

**Lemougna, P. N., Melo, U. F. C., Delplancke, M. P. & Rahier, H.** (2013). Influence of the activating solution composition on the stability and thermo-mechanical properties of inorganic polymers (geopolymers) from volcanic ash, *Construction and Building Materials, 48,* 278–286.

**Lemougna, P. N., Chinje Melo, U. F., Delplancke, M. P. & Rahier, H.** (2014). Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes during alkali activation, *Ceramics International, 40* (1), 811–820.

**Lemougna, P. N., Wang, K., Tang, Q., Nzeukou, A. N., Billong, N., Chinje Melo, U. & Cui, X.** (2018). Review on the use of volcanic ashes for engineering applications, *Resources, Conservation and Recycling, 137,* 177–190.

**Li, Y., Yao, J., Li, R., Zhang, Z. & Zhang, J.** (2017). Thermal and energy performance of a steel-bamboo composite wall structure, *Energy and Buildings, 156,* 225–237.

**Lim, M. K. & Cao, H.** (2013). Combining multiple NDT methods to improve testing effectiveness, *Construction and Building Materials, 38,* 1310–1315.

**Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z. & Mo, K. H.** (2014). Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete, *Energy and Buildings, 72,* 238–245.

**Liu, Y., Yan, C., Zhang, Z., Gong, Y., Wang, H. & Qiu, X.** (2016). A facile method for preparation of floatable and permeable fly ashbased geopolymer block, *Materials Letters, 185,* 370–373.

**Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Arenas, C. & Fernández-Pereira, C.** (2018). Fly ash based geopolymeric foams using silica fume as pore generation agent. Physical, mechanical and acoustic properties, *Journal of Non-Crystalline Solids, 500,* 196–204.

**Maage, M.** (1984). Frost resistance and pore size distribution in bricks, *Matériaux et Construction, 17,* 345–350.

**Majidi, B.** (2009). Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: A review, *Materials Technology, 24* (2), 79–87.

**Masi, G., Rickard, W. D. A., Vickers, L., Bignozzi, M. C. & Van Riessen, A.** (2014). A comparison between different foaming methods for the

synthesis of light weight geopolymers, *Ceramics International, 40* (9), 13891–13902.

**Milliken.** (2019). *Retrieved December 10, 2019, from http://infrastructure.milliken.com/geosprayapplications/*

**Molarity.** (2020). *Retrieved May 4, 2020, from https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/molarity-vs-molality-formula-and-definitions-334119*

**Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S. & Monteiro, P. J. M.** (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders, *Cement and Concrete Composites, 53,* 97–104.

**Morsy, M. S., Alsayed, S., Al-Salloum, Y. & Almusallam, T.** (2014). Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder, *Arabian Journal for Science and Engineering, 39* (6), 4333–4339.

**Morsy, M. S., Rashad, A. M., Shoukry, H. & Mokhtar, M. M.** (2019). Potential use of limestone in metakaolin-based geopolymer activated with H3PO4 for thermal insulation, *Construction and Building Materials, 229,* 117088.

**Nadoushan, M. J. & Ramezanianpour, A. A.** (2016). The effect of type and concentration of activators on flowability and compressive strength of natural pozzolan and slagbased geopolymers, *Construction and Building Materials, 111,* 337–347.

**Najimi, M., Ghafoori, N. & Sharbaf, M.** (2018a). Alkali-activated natural pozzolan/slag mortars: A parametric study, *Construction and Building Materials, 164,* 625–643.

**Najimi, M., Ghafoori, N., Radke, B., Sierra, K. & Sharbaf, M.** (2018b). Comparative study of alkali-activated natural pozzolan and fly ash mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering, 30* (6), 04018115.

**Nath, P. & Sarker, P. K.** (2014). Effect of GGBS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition, *Construction and Building Materials, 66,* 163–171.

**Ndjock, B. D., Elimbi, A., & Cyr, M.** (2017). Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation, *Journal of Non-crystalline Solids, 463,* 31–39.

**Neville, A. M.** (2011). *Properties of Concrete*. 5th Edn. London, UK: Pearson.

**Nguyen, T. T., Bui, H. H., Ngo, T. D., Nguyen, G. D., Kreher, M. U. & Darve, F.** (2019) A micromechanical investigation for the effects of pore size and its distribution on geopolymer foam concrete under uniaxial compression, *Engineering Fracture Mechanics, 209,* 228–244.

**Nikolov, A., Rostovsky, I. & Nugteren, H.** (2017). Geopolymer materials based on natural zeolite, *Case Studies in Construction Materials, 6,* 198–205.

**Novais, R. M., Buruberri, L. H., Ascensao, G., Seabra, M. P. & Labrincha, J. A.** (2016a). Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity, *Journal of Cleaner Production, 119,* 99–107.

**Novais, R. M., Ascensao, G., Buruberri, L. H., Senff, L., Labrincha, J. A.** (2016b). Influence of blowing agent on the fresh- and hardened-state properties of lightweight geopolymers, *Materials and Design, 108,* 551–559.

**Novais, R. M., Ascensao, G., Ferreira, N., Seabra, M. P. & Labrincha, J. A.** (2018). Influence of water and aluminium powder content on the properties of waste-containing geopolymer foams, *Ceramics International, 44,* 6242–6249.

**Novais, R. M., Pullar, R. C., Labrincha, J. A.** (2020). Geopolymer foams: An overview of recent advancements, *Progress in Materials Science, 109,* 100621.

**O'Connor, S. J. & MacKenzie, K. J. D.** (2010b). Synthesis, characterisation and thermal behaviour of lithium aluminosilicate inorganic polymers, *Journal of Material Science, 45,* 3707–3713.

**Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J. & Jalali, S.** (2008). Alkali-activated binders: A review Part 1, Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials, 22,* 1305–1314.

**Pacheco-Torgal, F.** (2015). Introduction to handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes. In F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (Vol. 1, pp.1-16). Retrieved from https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-276-1.50029-0

**Palomo, A., Grutzeck, M. W. & Blanco, M. T.** (1999). Alkali-activated fly ashes - A cement for the future, *Cement Concrete Research, 29* (8), 1323–1329.

**Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O. & Fernández-Jiménez, A.** (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives, *Materiales de Construcción, 64* (315), e022.

**Palmero, P., Formia, A., Antonaci, P., Brini, S. & Tulliani, J. M.** (2015). Geopolymer technology for application-oriented dense and lightened materials. Elaboration and characterization, *Ceramics International, 41* (10), 12967–12979.

**Pan, Z. & Yang, N.** (2010). Updated review on AAM research in China, *The 1st International Conference on Advances in Chemically-Activated Materials,* Jinan, China.

**Panagiotopoulou, C. H., Kontori, E., Perraki, T. H. & Kakali, G.** (2007). Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media, *Journal of Material Science, 42,* 2967–2973.

**Papa, E., Medri, V., Kpogbemabou, D., Morinière, V., Laumonier, J., Vaccari, A. & Rossignol, S.** (2016). Porosity and insulating properties of silica-fume based foams, *Energy and Buildings, 131,* 223–232.

**Phair, J. W. & Van Deventer J. S. J.** (2002). Effect of the silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers, *International Journal of Mineral Processing, 66,* 121–143.

**Postacıoğlu, B.** (1981). *Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri-İç Yapı ve Mekanik Özellikler.* İstanbul, İTÜ Matbaası.

**Provis, J. L. & Bernal, S. A.** (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annual Review of Materials Research, 44,* 299–327.

**Provis, J. L., Duxson, P. & Van Deventer J. S. J.** (2010). The role of particle technology in developing sustainable construction materials, *Advanced Powder Technology, 21* (1), 2–7.

**Provis J. L. & Van Deventer J. S. J.** (2009). *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial aplications.* Cambridge, Woodhead Publishing Limited.

**Prud'homme, E., Michaud, P., Joussein, E., Peyratout, C., Smith, A., Arrii-Clacens, S., Clacens, J. M. & Rossignol, S.** (2010). Silica fume as porogent agent in geo-materials at low temperature, *Journal of the European Ceramic Society, 30,* 1641–1648.

**Prud'homme, E., Joussein, E. & Rossignol, S.** (2015). Alkali-activated concrete binders as inorganic thermal insulator materials. In F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindaprasirt (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (Vol. 26, pp. 687-728). Retrieved from https://doi.org/10.1533/9781782422884.5.687

**Puertas, F., Martínez-Ramírez, S., Alonso, S. & Vázquez, T.** (2000). Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products, *Cement Concrete Research, 30* (10), 1625–1632.

**Purdon, A.** (1940). The action of alkalis on blast furnace slag, *Journal of the Society of Chemical Industry, 59,* 191–202.

**Raijiwala D. B. & Patil H. S.** (2011). Geopolymer concrete: A concrete of next decade, *International Journal of Advance Engineering and Research Development, II* (I), 19–25.

**Renca.** (2009). *Retrieved December 10, 2018, from http://www.renca.org/products*

**RILEM TC 224-AAM.** (2014). *State-of-the-Art Report, Alkali Activated Materials.* Retrieved January 27, 2018, from DOI 10.1007/978-94-007-7672-2_6.

**Risdanareni, P., Ekaputri, J., Triwulan, J.** (2015). The influence of alkali activator concentration to mechanical properties of geopolymer concrete with trass as a filler, *Material Science Forum, 803,* 125–134.

**Robayo-Salazar, R.A., Mejía De Gutiérrez, R.** (2018). Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review, *Construction and Building Materials, 189,* 109–118.

**Robinson, G. C.** (1984). The relationship between pore structure and durability of brick, *American Ceramic Society Bulletin, 63* (2), 295–300.

**Sanjayan, J. G., Nazari, A., Chen, L. & Nguyen, G. H.** (2015). Physical and mechanical properties of lightweight aerated geopolymer, *Construction and Building Materials, 79,* 236–244.

**Santos, A. R., Veiga, M. R., Silva, A. S., de Brito, J. & Alvarez, J. I.** (2018). Evolution of the microstructure of lime-based mortars and influence on the mechanical behaviour: the role of the aggregates, *Construction and Building Materials, 187,* 907–922.

**Schlegel, E., Häussler, K., Seifert, H. & Freiberg, K.** (1999). Microporosity and its use in highly efficient thermal insulating materials, *Cfi-ceramic Forum International, 76,* 7–10.

**Schulle, W. & Schlegel, E.** (1991). Fundamentals and properties of refractory thermal insulating materials, *Interceramics, 40* (7), 1–12.

**Sekou, T., Sine, D., Laucine, T. D. & Bakaridjan, C.** (2017). Synthesis and characterization of a red mud and rice husk based gepolymer for engineering applications, *Macromlecul. Symp.,* 373, 1600090.

**Shi, J., Liu, B., Liu, Y., Wang, E., He, Z., Xu, H. & Ren, X.** (2020). Preparation and characterization of lightweight aggregate foamed geopolymer concretes aerated using hydrogen peroxide, *Construction and Building Materials, 256,* 119442.

**Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M. & Bhattacharyya, S. K.** (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments, *Construction and Building Materials, 85,* 78–90.

**Singh, N. B. & Middendorf, B.** (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview, *Construction and Building Materials, 237,* 117455.

**Swanepoel, J. C. & Strydom, C. A.** (2002b). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material, *Applied Geochemistry, 17,* 1143–1148.

**Szklorzova, H. & Bilek, V.** (2008). Influence of alkali ions in the activator on the performance of alkali-activated mortars, *The 3rd International Symposium on Non-traditional Cement and Concrete,* Czech Republic, Brno, 777–784.

**Şenkal, F. S.** (2005). Türkiye'de ısı yalıtımının gelişimi ve konutlarda uygulanan dış duvar ısı yalıtım sistemleri, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 10* (2), 79–85.

**Takeda, H., Hashimoto, S., Kanie, H., Honda, S. & Iwamoto, Y.** (2014). Fabrication and characterization of hardened bodies from Japanese volcanic ash using geopolymerization, *Ceramics International, 40,* 4071–4076.

**Tanaçan, L.** (1993). *Hafif duvar tuğlası üretiminde perlit ve bazı katkıların etkilerinin araştırılması.* (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**Tchadjie´, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakoute´, H. K., Kenne, B. B. D. & Elimbi, A.** (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis, *Ceramics International, 42* (2), 3046–3055.

**Tchadjie, L. N. & Ekolu, S. O.** (2018). Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials toward geopolymer synthesis, *Journal of Material Science, 53,* 4709–4733.

**Tchakoute, H. K., Elimbi, A., Yanne, E. & Djangang, C. N.** (2013). Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature, *Cement and Concrete Composites, 38,* 75–81.

**Tchakoute, H. K., Kong, S., Djobo, J. N. Y., Tchadjié, L. N. & Njopwouo, D.** (2015). A comparative study of two methods to produce geopolymer composites from volcanic scoria and the role of structural water contained in the volcanic scoria on its reactivity, *Ceramics International, 41* (10), 12568–12577.

**Tennakoon, C., De Silva, P., Sagoe-Crentsil, K. & Sanjayan, J. G.** (2015). Influence and role of feedstock Si and Al content in Geopolymer, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 4* (2), 129–139.

**Thapa, V. B. & Waldmann, D.** (2018). *A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders.* Retrieved May 1, 2018, from https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/35284/1/A%20short%20review.pdf

**Toydemir, N., Gürdal, E. & Tanaçan, L.** (2007). *Yapı Elemanı Tasarımında Malzeme.* İstanbul, Literatür Yayıncılık.

**TS 25.** (2008). Doğal Puzolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 196-1.** (2009). Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 196–6.** (2010). Çimento Deney Yöntemleri - Bölüm 6: İncelik Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS 699.** (2009). Doğal Yapı Taşları - İnceleme ve Laboratuvar Deney Yöntemleri, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 1936.** (2010). Doğal Taşlar - Deney Yöntemleri - Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 1015-10.** (2001). Kâgir Harcı - Deney Metotları - Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 1925.** (2000). Doğal Taşlar - Deney Metotları - Kılcal Etkiye Bağlı Su Emme Katsayısının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 13755.** (2009). Doğal Taşlar - Deney Metotları - Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 12086.** (2013). Isı Yalıtım Mamulleri - Binalar İçin - Su Buharı İletim Özelliklerinin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS EN 14579.** (2006). Doğal Taşlar - Deney Metotları - Ses Hızı İlerlemesinin Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

**TS 825.** (2013). Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü,* Ankara.

**Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. & Lukey, G. C.** (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and

kaolinite-based geopolymers, *Chemical Engineering Journal, 89,* 63–73.

**Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J. & Lukey, G. C.** (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers, *Materials Letters, 57,* 1272–1280.

**Vaou, V. & Panias, D.** (2010). Thermal insulating foamy geopolymers from perlite, *Minerals Engineering, 23* (14), 1146–1151.

**Vasconcelos, E., Fernandes, S., Barroso de Aguiar, J. L. & Pacheco-Torgal, F.** (2011). Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP, *Construction and Building Materials, 25* (8), 3213–3221.

**Vickers L., Van Riessen A. & Rickard W. D. A.** (2015a). Introduction to Geopolymers. In *Fire-Resistant Geopolymers,* (Vol. 1). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-981-287-311-8_1

**Vickers L., Van Riessen A. & Rickard W. D. A.** (2015b). Precursors and Additives for Geopolymer Synthesis. In *Fire-Resistant Geopolymers,* (Vol. 2). Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-981-287-311-8_2

**Wagner.** (2019). *Retrieved March 25, 2019, from https://www.wagner.com.au/main/what-we-do/earth-friendly-concrete/efc-home*

**Wakili, K. G., Hugi, E., Karvonen, L., Schnewlin, P. & Winnefeld, F.** (2015). Thermal behaviour of autoclaved aerated concrete exposed to fire, *Cement and Concrete Composites, 62,* 52–58.

**Wang, S., Li, H., Zou, S. & Zhang, G.** (2020). Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material, *Energy and Buildings, 226,* 110358.

**Wang, Y., Wang, Y. & Zhang, M.** (2021). Effect of sand content on engineering properties of fly ash-slag based strain hardening geopolymer composites, *Journal of Building Engineering, 34,* 101951.

**Wei, S., Yiqiang, C., Yunsheng, Z. & Jones, M. R.** (2013). Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete, *Construction and Building Materials, 47,* 1278–1291.

**Wienerberger.** (2018). *Retrieved May 2, 2018,* from https://clay-wienerberger.com/expertise/fields-of-application-1366179322724

**Wu, H., Zhao, G., Wang, G., Zhang, W. & Li, Y.** (2018a). A new core-back foam injection molding method with chemical blowing agents, *Materials and Design, 144,* 331–342.

**Wu, J., Zhang, Z., Zhang, Y. & Li, D.** (2018b). Preparation and characterization of ultralightweight foamed geopolymer (UFG) based on fly ash-metakaolin blends, *Construction and Building Materials, 168,* 771–779.

**Xamán, J., Cisneros-Carreño, J., Hernández-Pérez, I., Hernández-López, I., Aguilar-Castro, K. M., Macias-Melo, E. V.** (2017). Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective

materials for roofing in Mexico, *Applied Thermal Engineering, 123,* 243–255.

**XCO2 Conisbee LTD.** (2016). *Retrieved May 2, 2018, from http://highperformanceinsulation.eu/wp-content/uploads/2016/08/sustainability_a_guide.pdf*

**Xu, F., Gu, G., Zhang, W., Wang, H., Huang, X. & Zhu, J.** (2018). Pore structure analysis and properties evaluations of fly ash-based geopolymer foams by chemical foaming method, *Ceramics International, 44* (16), 19989–19997.

**Xu, H. & Van Deventer J. S. J.** (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals, *International Journal of Mineral Processing, 59,* 247–266.

**Yang, K. H., Lo, C. W., Huang, J. S.** (2013). Production and properties of foamed reservoir sludge inorganic polymers, *Cement and Concrete Composites, 38,* 50–56.

**Yang, Y., Jiang, J., Hou, L., Lu, Z., Li, J. & Wang, J.** (2020). Pore structure and properties of porous geopolymer based on pre-swelled bentonite, *Construction and Building Materials, 254,* 119226.

**Yankwa Djobo, J. N., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., Kumar, S.** (2016). Mechanical activation of volcanic ash for geopolymer synthesis: effect on reaction kinetics, gel characteristics, physical and mechanical properties, *RSC Advances, 6,* 39106–39117.

**Zaidi, S. F. A., Haq, E. U., Nur, K., Ejaz, N., Anis-Ur-Rehman, M., Zubair & M., Naveed, M.** (2017). Synthesis & characterization of natural soil based inorganic polymer foam for thermal insulations, *Construction and Building Materials, 157,* 994–1000.

**Zeobond.** (2008). *Retrieved May 2, 2018, from* www.zeobond.com

**Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A. & Wang, H.** (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, *Construction and Building Materials, 56,* 113–127

**Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A. & Wang, H.** (2015). Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete, *Cement and Concrete Composites, 62,* 97–105.

**Zhang, Z. & Wang, H.** (2016). The pore characteristics of geopolymer foam concrete and their impact on the compressive strength and modulus, *Frontiers in Materials, 3* (38).

**Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A. & Horpibulsuk, S.** (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches, *Construction and Building Materials, 188,* 1101–1118.

**Zheng, G., Cui, X., Zhang, W. & Tong, Z.** (2009). Preparation of Geopolymer Precursors by Sol–Gel Method and Their Characterization, *Journal of Material Science, 44,* 3991–3996.

**Zuhua, Z. Xiao, Y., Huajun, Z. & Yue, C.** (2009). Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied Clay Science, 43* (2), 218–223.

**EKLER**

**EK A:** Fiziksel, mekanik ve ısıl özeliklere ait deney sonuçları.

**EK A:** Fiziksel, mekanik ve ısıl özeliklere ait deney sonuçları.

**Çizelge A.1 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait özgül kütle deney sonuçları.

| Numune kodu | Su dolu kabın kütlesi ($m_{sd}$) (g) | Numune kütlesi ($m_n$) (g) | Numune+su dolu kabın kütlesi ($m_{kns}$) (g) | Özgül kütle (ρr) (g/cm$^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 280,78 | 30,00 | 299,30 | 2,61 | 2,60 | 0,21 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 281,14 | 30,00 | 299,60 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 281,60 | 30,00 | 300,05 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 282,67 | 30,00 | 301,15 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 281,77 | 30,00 | 300,25 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 281,80 | 30,00 | 300,27 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 285,77 | 25,00 | 301,12 | 2,59 | 2,60 | 0,35 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 281,80 | 25,00 | 297,18 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 282,36 | 25,00 | 297,75 | 2,60 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 281,60 | 25,00 | 297,03 | 2,61 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 285,77 | 25,00 | 301,20 | 2,61 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 281,80 | 25,00 | 297,16 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 281,60 | 25,00 | 296,98 | 2,60 | 2,59 | 0,55 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 285,77 | 25,00 | 301,11 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 281,80 | 25,00 | 297,14 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 280,78 | 25,00 | 296,25 | 2,62 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 281,14 | 25,00 | 296,50 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 282,47 | 25,00 | 297,80 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 282,36 | 20,00 | 294,60 | 2,58 | 2,58 | 0,20 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 280,78 | 20,00 | 293,05 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 281,14 | 20,00 | 293,41 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 285,77 | 20,00 | 298,05 | 2,59 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 281,80 | 20,00 | 294,05 | 2,58 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 282,36 | 20,00 | 294,61 | 2,58 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 281,60 | 20,00 | 293,94 | 2,61 | 2,62 | 0,13 |
| 10SK-1-0.3-2 | 285,77 | 20,00 | 298,12 | 2,61 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 281,80 | 20,00 | 294,17 | 2,62 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 282,47 | 20,00 | 294,82 | 2,61 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 282,90 | 20,00 | 295,25 | 2,61 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 347,40 | 20,00 | 359,76 | 2,62 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 282,36 | 20,00 | 294,67 | 2,60 | 2,61 | 0,28 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 280,78 | 20,00 | 293,10 | 2,60 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 281,14 | 20,00 | 293,48 | 2,61 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 281,85 | 20,00 | 294,19 | 2,61 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 282,43 | 20,00 | 294,78 | 2,61 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 281,62 | 20,00 | 293,99 | 2,62 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 281,60 | 20,00 | 293,95 | 2,61 | 2,61 | 0,28 |
| 10SK-2-0.3-2 | 285,77 | 20,00 | 298,14 | 2,62 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 281,80 | 20,00 | 294,12 | 2,60 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 281,74 | 20,00 | 294,05 | 2,60 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 285,96 | 20,00 | 298,29 | 2,61 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 281,15 | 20,00 | 293,49 | 2,61 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 282,36 | 20,00 | 294,67 | 2,60 | 2,61 | 0,20 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 280,78 | 20,00 | 293,10 | 2,60 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 281,14 | 20,00 | 293,48 | 2,61 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 312,11 | 20,00 | 324,46 | 2,61 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 319,91 | 20,00 | 332,25 | 2,61 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 320,68 | 20,00 | 333,02 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 282,47 | 20,00 | 294,83 | 2,62 | 2,61 | 0,17 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 282,90 | 20,00 | 295,27 | 2,62 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 347,40 | 20,00 | 359,74 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 280,16 | 20,00 | 292,50 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 284,22 | 20,00 | 296,56 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 342,15 | 20,00 | 354,50 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 311,73 | 20,00 | 324,12 | 2,63 | 2,62 | 0,24 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 309,80 | 20,00 | 322,14 | 2,61 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 310,90 | 20,00 | 323,27 | 2,62 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 287,15 | 20,00 | 299,52 | 2,62 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 283,86 | 20,00 | 296,23 | 2,62 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 284,00 | 20,00 | 296,39 | 2,63 | | |

**Çizelge A.1 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait özgül kütle deney sonuçları.

| Numune kodu | Su dolu kabın kütlesi ($m_{sd}$) (g) | Numune kütlesi ($m_n$) (g) | Numune+su dolu kabın kütlesi ($m_{kns}$) (g) | Özgül kütle (ρr) (g/cm$^3$) Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.5SK-2-0.3-1 | 281,45 | 20,00 | 293,86 | 2,64 | 2,62 | 0,52 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 285,38 | 20,00 | 297,73 | 2,61 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 280,98 | 20,00 | 293,31 | 2,61 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 281,07 | 20,00 | 293,41 | 2,61 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 285,16 | 20,00 | 297,58 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 284,71 | 20,00 | 297,11 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 282,36 | 20,00 | 294,70 | 2,61 | 2,63 | 0,38 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 280,78 | 20,00 | 293,17 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 296,14 | 20,00 | 308,53 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 280,14 | 20,00 | 292,51 | 2,62 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 282,93 | 20,00 | 295,35 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 281,27 | 20,00 | 293,68 | 2,64 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 281,14 | 25,00 | 296,56 | 2,61 | 2,62 | 0,39 |
| 15SK-1-0.3-2 | 312,11 | 25,00 | 327,53 | 2,61 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 319,91 | 25,00 | 335,33 | 2,61 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 320,68 | 25,00 | 336,18 | 2,63 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 282,47 | 25,00 | 297,93 | 2,62 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 282,90 | 25,00 | 298,39 | 2,63 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 347,40 | 25,00 | 362,82 | 2,61 | 2,61 | 0,20 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 280,16 | 25,00 | 295,60 | 2,62 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 284,22 | 25,00 | 299,64 | 2,61 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 342,15 | 25,00 | 357,58 | 2,61 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 311,73 | 25,00 | 327,18 | 2,62 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 309,80 | 25,00 | 325,27 | 2,62 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 310,90 | 25,00 | 326,39 | 2,63 | 2,61 | 0,51 |
| 15SK-2-0.3-2 | 287,15 | 25,00 | 302,66 | 2,63 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 283,86 | 25,00 | 299,27 | 2,61 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 284,00 | 25,00 | 299,41 | 2,61 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 281,45 | 25,00 | 296,86 | 2,61 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 285,38 | 25,00 | 300,78 | 2,60 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 280,98 | 25,00 | 296,41 | 2,61 | 2,61 | 0,30 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 281,07 | 25,00 | 296,48 | 2,61 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 285,16 | 25,00 | 300,61 | 2,62 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 284,71 | 25,00 | 300,17 | 2,62 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 282,36 | 25,00 | 297,74 | 2,60 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 280,78 | 25,00 | 296,21 | 2,61 | | |
| | | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 280,14 | 30,00 | 298,75 | 2,63 | 2,64 | 0,39 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 282,93 | 30,00 | 301,53 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 281,27 | 30,00 | 299,95 | 2,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 285,77 | 30,00 | 304,47 | 2,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 281,80 | 30,00 | 300,42 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 282,36 | 30,00 | 300,96 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 281,60 | 30,00 | 300,19 | 2,63 | 2,63 | 0,26 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 285,77 | 30,00 | 304,37 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 281,80 | 30,00 | 300,38 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 281,60 | 30,00 | 300,19 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 285,77 | 30,00 | 304,41 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 281,80 | 30,00 | 300,45 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 282,36 | 20,00 | 294,70 | 2,61 | 2,63 | 0,38 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 280,78 | 20,00 | 293,17 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 296,14 | 20,00 | 308,53 | 2,63 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 280,14 | 20,00 | 292,51 | 2,62 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 282,93 | 20,00 | 295,35 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 281,27 | 20,00 | 293,68 | 2,64 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 285,77 | 30,00 | 303,92 | 2,53 | 2,54 | 0,38 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 281,80 | 30,00 | 300,05 | 2,55 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 282,36 | 30,00 | 300,61 | 2,55 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 281,60 | 30,00 | 299,77 | 2,54 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 285,77 | 30,00 | 303,94 | 2,54 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 281,80 | 30,00 | 300,03 | 2,55 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 309,80 | 30,00 | 328,50 | 2,65 | 2,67 | 0,84 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 310,90 | 30,00 | 329,59 | 2,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 287,15 | 30,00 | 305,96 | 2,68 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 283,86 | 30,00 | 302,57 | 2,66 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 284,00 | 30,00 | 302,89 | 2,70 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 281,45 | 30,00 | 300,34 | 2,70 | | |

**Çizelge A.2 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait özgül kütle deney sonuçları.

| Numune kodu | Su dolu kabın kütlesi ($m_{sd}$) (g) | Numune kütlesi ($m_n$) (g) | Numune+ su dolu kabın kütlesi ($m_{kns}$) (g) | Özgül kütle (ρr) (g/cm$^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 282,47 | 25,00 | 296,09 | 2,20 | 2,20 | 0,28 |
| SK-20/100-0.5-2 | 282,90 | 25,00 | 296,59 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 347,40 | 25,00 | 361,07 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 280,16 | 25,00 | 293,78 | 2,20 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 284,22 | 25,00 | 297,91 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 342,15 | 25,00 | 355,80 | 2,20 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 311,73 | 25,00 | 324,24 | 2,00 | 2,00 | 0,73 |
| SK-25/100-0.5-2 | 309,80 | 25,00 | 322,34 | 2,01 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 310,90 | 25,00 | 323,34 | 1,99 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 287,15 | 25,00 | 299,80 | 2,02 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 311,73 | 25,00 | 324,34 | 2,02 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 309,80 | 25,00 | 322,22 | 1,99 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 310,90 | 25,00 | 323,60 | 2,03 | 2,02 | 0,63 |
| SK-33/100-0.5-2 | 287,15 | 25,00 | 299,69 | 2,01 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 283,86 | 25,00 | 296,50 | 2,02 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 284,00 | 25,00 | 296,51 | 2,00 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 281,45 | 25,00 | 294,11 | 2,03 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 285,38 | 25,00 | 298,06 | 2,03 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 280,98 | 25,00 | 293,64 | 2,03 | 2,03 | 0,47 |
| SK-50/100-0.5-2 | 282,47 | 25,00 | 295,10 | 2,02 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 282,36 | 25,00 | 295,09 | 2,04 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 280,78 | 25,00 | 293,56 | 2,05 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 281,14 | 25,00 | 293,84 | 2,03 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 285,77 | 25,00 | 298,53 | 2,04 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 281,80 | 25,00 | 296,22 | 2,36 | 2,36 | 0,39 |
| SK-100/100-0.5-2 | 282,36 | 25,00 | 296,78 | 2,36 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 281,60 | 25,00 | 295,95 | 2,35 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 285,77 | 25,00 | 300,22 | 2,37 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 281,80 | 25,00 | 296,20 | 2,36 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 282,47 | 25,00 | 296,94 | 2,37 | | |
| SK-20/100-0-1 | 282,90 | 20,00 | 294,05 | 2,26 | 2,28 | 0,62 |
| SK-20/100-0-2 | 347,40 | 20,00 | 358,64 | 2,28 | | |
| SK-20/100-0-3 | 282,36 | 20,00 | 293,59 | 2,28 | | |
| SK-20/100-0-4 | 280,78 | 20,00 | 292,07 | 2,30 | | |
| SK-20/100-0-5 | 283,86 | 20,00 | 295,08 | 2,28 | | |
| SK-20/100-0-6 | 284,00 | 20,00 | 295,30 | 2,30 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 281,45 | 20,00 | 292,17 | 2,16 | 2,17 | 0,65 |
| SK-20/100-0.25-2 | 285,38 | 20,00 | 296,22 | 2,18 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 280,98 | 20,00 | 291,70 | 2,16 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 281,07 | 20,00 | 291,89 | 2,18 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 285,16 | 20,00 | 296,00 | 2,18 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 284,71 | 20,00 | 295,55 | 2,18 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 282,47 | 25,00 | 296,09 | 2,20 | 2,20 | 0,28 |
| SK-20/100-0.5-2 | 282,90 | 25,00 | 296,59 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 347,40 | 25,00 | 361,07 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 280,16 | 25,00 | 293,78 | 2,20 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 284,22 | 25,00 | 297,91 | 2,21 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 342,15 | 25,00 | 355,80 | 2,20 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 309,80 | 20,00 | 321,33 | 2,36 | 2,37 | 0,61 |
| SK-20/100-1.0-2 | 310,90 | 20,00 | 322,55 | 2,40 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 287,15 | 20,00 | 298,75 | 2,38 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 283,86 | 20,00 | 295,43 | 2,37 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 284,00 | 20,00 | 295,52 | 2,36 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 281,45 | 20,00 | 292,98 | 2,36 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 282,36 | 20,00 | 294,95 | 2,70 | 2,68 | 0,33 |
| SK-20/100-1.5-2 | 281,60 | 20,00 | 294,15 | 2,68 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 285,77 | 20,00 | 298,31 | 2,68 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 281,80 | 20,00 | 294,34 | 2,68 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 282,47 | 20,00 | 294,99 | 2,67 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 282,90 | 20,00 | 295,43 | 2,68 | | |

**Çizelge A.3 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait birim hacim ağırlık deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | Birim hacim ağırlık (ρ) (g/cm$^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 506,77 | 544,77 | 292,88 | 2,01 | 2,00 | 0,28 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 482,80 | 520,14 | 278,65 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 469,29 | 505,35 | 270,40 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 508,16 | 543,70 | 289,99 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 484,71 | 519,16 | 276,34 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 470,22 | 504,83 | 269,86 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 507,26 | 543,60 | 290,45 | 2,00 | 2,00 | 0,52 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 491,92 | 527,64 | 283,06 | 2,01 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 493,25 | 529,16 | 282,10 | 2,00 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 508,17 | 545,00 | 289,44 | 1,99 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 490,17 | 525,56 | 281,11 | 2,01 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 493,66 | 527,13 | 282,48 | 2,02 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 512,76 | 551,50 | 296,08 | 2,01 | 2,01 | 0,26 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 503,60 | 542,12 | 291,39 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 489,20 | 526,52 | 282,93 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 513,11 | 553,17 | 297,34 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 505,37 | 540,11 | 288,36 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 490,22 | 524,66 | 281,98 | 2,02 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 490,71 | 530,34 | 286,49 | 2,01 | 2,01 | 0,53 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 509,53 | 551,68 | 298,81 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 494,06 | 534,70 | 288,60 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 489,52 | 530,99 | 285,44 | 1,99 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 510,65 | 548,67 | 294,13 | 2,01 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 494,55 | 530,11 | 286,00 | 2,03 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 512,86 | 548,43 | 294,17 | 2,02 | 2,02 | 0,28 |
| 10SK-1-0.3-2 | 500,57 | 535,79 | 289,07 | 2,03 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 494,34 | 529,16 | 285,25 | 2,03 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 511,66 | 546,11 | 292,88 | 2,02 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 501,18 | 534,77 | 287,16 | 2,02 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 496,13 | 527,42 | 283,33 | 2,03 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 490,69 | 524,92 | 281,72 | 2,02 | 2,03 | 0,50 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 498,26 | 533,10 | 286,78 | 2,02 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 502,99 | 538,09 | 288,58 | 2,02 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 492,77 | 520,87 | 277,72 | 2,03 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 495,34 | 530,00 | 287,66 | 2,04 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 500,10 | 536,22 | 289,53 | 2,03 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 498,96 | 533,02 | 286,89 | 2,03 | 2,03 | 0,27 |
| 10SK-2-0.3-2 | 499,19 | 533,81 | 289,08 | 2,04 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 508,35 | 543,89 | 292,70 | 2,02 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 490,91 | 532,02 | 290,00 | 2,03 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 495,19 | 532,17 | 288,23 | 2,03 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 507,18 | 542,13 | 292,68 | 2,03 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 482,51 | 515,55 | 278,14 | 2,03 | 2,04 | 0,44 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 492,55 | 526,85 | 283,88 | 2,03 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 507,54 | 543,00 | 292,93 | 2,03 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 484,12 | 517,38 | 280,97 | 2,05 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 490,48 | 529,03 | 289,17 | 2,04 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 507,17 | 542,98 | 294,90 | 2,04 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 493,92 | 525,29 | 285,62 | 2,06 | 2,05 | 0,49 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 495,50 | 527,24 | 286,67 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 501,21 | 533,17 | 288,90 | 2,05 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 494,90 | 521,11 | 281,13 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 494,52 | 527,38 | 285,10 | 2,04 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 500,18 | 534,46 | 289,24 | 2,04 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 504,99 | 534,67 | 290,93 | 2,07 | 2,06 | 0,31 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 495,55 | 524,64 | 284,13 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 510,46 | 540,44 | 293,07 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 501,96 | 534,12 | 289,90 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 496,78 | 522,51 | 281,41 | 2,06 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 513,46 | 538,13 | 290,11 | 2,07 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 495,26 | 527,58 | 287,87 | 2,07 | 2,07 | 0,33 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 505,16 | 538,90 | 293,66 | 2,06 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 497,17 | 530,24 | 289,39 | 2,06 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 498,99 | 536,55 | 293,98 | 2,06 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 508,16 | 536,09 | 291,43 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 490,41 | 528,26 | 290,86 | 2,07 | | |

**Çizelge A.3 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait birim hacim ağırlık deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | Birim hacim ağırlık (ρ) (g/cm$^3$) Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 503,80 | 532,02 | 288,90 | 2,07 | 2,08 | 0,25 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 510,54 | 538,67 | 292,89 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 495,09 | 523,95 | 285,56 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 500,66 | 532,17 | 289,96 | 2,07 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 519,54 | 538,14 | 288,11 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 497,13 | 520,98 | 282,17 | 2,08 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 504,74 | 542,66 | 289,18 | 1,99 | 1,99 | 0,17 |
| 15SK-1-0.3-2 | 481,83 | 520,24 | 278,40 | 1,99 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 468,08 | 504,39 | 269,65 | 1,99 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 504,16 | 542,41 | 289,96 | 2,00 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 479,33 | 522,47 | 281,66 | 1,99 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 470,19 | 507,35 | 272,18 | 2,00 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 505,26 | 542,18 | 288,47 | 1,99 | 1,99 | 0,23 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 487,19 | 525,61 | 281,09 | 1,99 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 490,23 | 528,12 | 282,10 | 1,99 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 505,15 | 543,80 | 289,45 | 1,99 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 492,88 | 525,93 | 278,96 | 2,00 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 495,96 | 530,17 | 282,17 | 2,00 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 510,77 | 541,99 | 288,08 | 2,01 | 2,00 | 0,42 |
| 15SK-2-0.3-2 | 501,60 | 540,12 | 290,39 | 2,01 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 489,24 | 526,52 | 281,93 | 2,00 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 512,76 | 551,67 | 295,14 | 2,00 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 503,60 | 542,12 | 290,39 | 2,00 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 488,19 | 526,52 | 280,89 | 1,99 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 490,71 | 529,46 | 284,64 | 2,00 | 2,00 | 0,48 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 510,67 | 550,16 | 294,81 | 2,00 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 493,88 | 536,72 | 289,60 | 2,00 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 491,13 | 528,31 | 285,55 | 2,02 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 510,28 | 550,37 | 294,81 | 2,00 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 495,17 | 532,73 | 285,69 | 2,00 | | |
| | | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 471,96 | 515,74 | 101,8 | 1,14 | 1,14 | 0,31 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 484,55 | 529,18 | 105,9 | 1,14 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 482,35 | 525,44 | 105,74 | 1,15 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 469,17 | 516,13 | 106,8 | 1,15 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 486,14 | 530,55 | 105,96 | 1,14 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 480,86 | 523,32 | 101,61 | 1,14 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 450,26 | 552,18 | 228,47 | 1,39 | 1,40 | 0,63 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 437,19 | 555,61 | 241,09 | 1,39 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 440,23 | 558,12 | 242,10 | 1,39 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 452,15 | 563,80 | 239,45 | 1,39 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 460,88 | 565,93 | 238,96 | 1,41 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 475,96 | 570,17 | 232,17 | 1,41 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 503,80 | 532,02 | 288,90 | 2,07 | 2,08 | 0,25 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 510,54 | 538,67 | 292,89 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 495,09 | 523,95 | 285,56 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 500,66 | 532,17 | 289,96 | 2,07 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 519,54 | 538,14 | 288,11 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 497,13 | 520,98 | 282,17 | 2,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 521,35 | 547,66 | 137,29 | 1,27 | 1,30 | 0,92 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 486,15 | 509,31 | 134,92 | 1,30 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 487,2 | 513,11 | 139,15 | 1,30 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 528,14 | 549,17 | 139,16 | 1,29 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 488,68 | 510,34 | 136,88 | 1,31 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 505,29 | 513,19 | 130,27 | 1,32 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 479,94 | 516,74 | 80,39 | 1,10 | 1,15 | 0,86 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 479,96 | 516,47 | 102,25 | 1,16 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 491,39 | 529,04 | 116,2 | 1,19 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 476,17 | 515,02 | 81,17 | 1,10 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 470,09 | 514,56 | 103,46 | 1,14 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 493,21 | 527,11 | 117,28 | 1,20 | | |

**Çizelge A.4 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait birim hacim ağırlık deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | Birim hacim ağırlık (ρ) (g/cm$^3$) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 29,36 | 73,94 | 16,21 | 0,51 | 0,51 | 0,76 |
| SK-20/100-0.5-2 | 28,19 | 71,80 | 17,25 | 0,52 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 29,05 | 72,73 | 17,33 | 0,52 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 28,82 | 73,09 | 16,42 | 0,51 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 28,41 | 72,16 | 16,72 | 0,51 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 28,21 | 72,85 | 16,15 | 0,50 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 35,82 | 85,83 | 20,33 | 0,55 | 0,55 | 0,73 |
| SK-25/100-0.5-2 | 34,17 | 83,21 | 19,11 | 0,53 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 34,75 | 86,01 | 22,28 | 0,55 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 35,94 | 84,76 | 20,62 | 0,56 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 35,86 | 84,18 | 19,29 | 0,55 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 35,68 | 85,90 | 19,91 | 0,54 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 50,01 | 99,16 | 14,28 | 0,59 | 0,59 | 0,88 |
| SK-33/100-0.5-2 | 49,98 | 98,00 | 13,97 | 0,59 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 49,85 | 98,75 | 13,81 | 0,59 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 50,22 | 98,83 | 14,12 | 0,59 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 51,17 | 100,21 | 14,39 | 0,60 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 51,76 | 100,48 | 14,44 | 0,60 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 65,76 | 112,14 | 9,75 | 0,64 | 0,64 | 1,12 |
| SK-50/100-0.5-2 | 66,01 | 113,77 | 9,36 | 0,63 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 66,89 | 113,56 | 9,89 | 0,65 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 65,12 | 111,00 | 10,12 | 0,65 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 65,00 | 112,62 | 10,17 | 0,63 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 67,34 | 113,23 | 9,81 | 0,65 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 88,00 | 132,27 | 29,00 | 0,85 | 0,85 | 0,66 |
| SK-100/100-0.5-2 | 87,82 | 130,01 | 26,84 | 0,85 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 87,35 | 131,16 | 28,21 | 0,85 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 89,90 | 132,88 | 27,15 | 0,85 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 89,26 | 133,13 | 26,83 | 0,84 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 88,77 | 132,51 | 28,86 | 0,86 | | |
| SK-20/100-0-1 | 234,79 | 314,40 | 132,73 | 1,29 | 1,29 | 0,78 |
| SK-20/100-0-2 | 232,14 | 312,15 | 130,86 | 1,28 | | |
| SK-20/100-0-3 | 232,35 | 312,78 | 130,84 | 1,28 | | |
| SK-20/100-0-4 | 233,56 | 313,11 | 133,89 | 1,30 | | |
| SK-20/100-0-5 | 233,18 | 315,49 | 133,55 | 1,28 | | |
| SK-20/100-0-6 | 234,08 | 315,90 | 133,01 | 1,28 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 48,68 | 100,30 | 19,09 | 0,60 | 0,60 | 0,58 |
| SK-20/100-0.25-2 | 49,96 | 99,37 | 18,00 | 0,61 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 47,32 | 99,21 | 18,75 | 0,59 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 49,31 | 98,49 | 18,01 | 0,61 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 48,09 | 100,01 | 20,12 | 0,60 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 48,67 | 98,92 | 18,05 | 0,60 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 29,36 | 73,94 | 16,21 | 0,51 | 0,51 | 0,76 |
| SK-20/100-0.5-2 | 28,19 | 71,80 | 17,25 | 0,52 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 29,05 | 72,73 | 17,33 | 0,52 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 28,82 | 73,09 | 16,42 | 0,51 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 28,41 | 72,16 | 16,72 | 0,51 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 28,21 | 72,85 | 16,15 | 0,50 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 34,36 | 88,83 | 17,33 | 0,48 | 0,48 | 1,23 |
| SK-20/100-1.0-2 | 35,17 | 86,19 | 14,97 | 0,49 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 34,72 | 88,01 | 15,14 | 0,48 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 34,90 | 87,78 | 15,01 | 0,48 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 34,89 | 89,14 | 16,92 | 0,48 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 34,11 | 89,29 | 18,73 | 0,48 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 33,12 | 88,54 | 16,42 | 0,46 | 0,46 | 0,62 |
| SK-20/100-1.5-2 | 33,98 | 89,51 | 16,00 | 0,46 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 33,76 | 86,28 | 15,21 | 0,48 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 32,45 | 85,99 | 15,02 | 0,46 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 34,67 | 89,27 | 15,76 | 2,06 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 34,00 | 89,18 | 15,03 | 2,07 | | |

**Çizelge A.5 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Kapilarite katsayısı ($N_k$) ($cm_2$/sn) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| | 506,77 | 509,60 | 511,79 | 513,81 | 515,86 | 517,91 | 519,96 | 522,04 | 524,05 | 526,08 | 528,09 | 529,90 | | 0,1040 | 1,35 |
| 7.5SK-1-0.3-1 | İşlem | 0,1391 | 0,1233 | 0,1153 | 0,1117 | 0,1095 | 0,0411 | 0,0494 | 0,0558 | 0,1054 | 0,1048 | 0,1033 | 0,0920 | | |
| | 482,80 | 485,52 | 487,51 | 489,40 | 491,41 | 493,38 | 495,40 | 497,49 | 499,57 | 501,62 | 503,70 | 505,57 | | | |
| 7.5SK-1-0.3-2 | İşlem | 0,1337 | 0,1157 | 0,1081 | 0,1058 | 0,1040 | 0,1032 | 0,1031 | 0,1030 | 0,1028 | 0,1027 | 0,1017 | 0,1050 | | |
| | 469,29 | 471,98 | 473,72 | 475,45 | 477,27 | 479,12 | 481,05 | 483,02 | 484,96 | 486,86 | 488,77 | 490,54 | | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | İşlem | 0,1322 | 0,1088 | 0,1009 | 0,0980 | 0,0966 | 0,0963 | 0,0964 | 0,0963 | 0,0959 | 0,0957 | 0,0949 | 0,0980 | | |
| | 504,67 | 507,50 | 509,81 | 511,67 | 513,80 | 515,70 | 517,75 | 520,08 | 522,10 | 524,11 | 526,15 | 527,81 | | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | İşlem | 0,1391 | 0,1263 | 0,1147 | 0,1122 | 0,1084 | 0,1071 | 0,1082 | 0,1071 | 0,1061 | 0,1056 | 0,1034 | 0,1099 | | |
| | 480,61 | 483,10 | 485,16 | 487,74 | 489,67 | 491,75 | 493,10 | 495,49 | 497,61 | 499,68 | 501,14 | 503,45 | | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | İşlem | 0,1224 | 0,1118 | 0,1113 | 0,1095 | 0,1023 | 0,1045 | 0,1044 | 0,1041 | 0,1009 | 0,1020 | 0,1018 | 0,1068 | | |
| | 467,10 | 469,96 | 471,56 | 473,14 | 475,37 | 477,15 | 479,05 | 481,05 | 482,90 | 484,75 | 486,16 | 488,54 | | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | İşlem | 0,1405 | 0,1096 | 0,0989 | 0,1016 | 0,0988 | 0,0979 | 0,0979 | 0,0971 | 0,0964 | 0,0937 | 0,0958 | 0,0988 | | |
| | 507,26 | 510,15 | 512,17 | 514,10 | 516,13 | 518,09 | 520,14 | 522,22 | 524,26 | 526,34 | 528,43 | 530,35 | | 0,1070 | 1,32 |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | İşlem | 0,1215 | 0,1129 | 0,1098 | 0,1072 | 0,1063 | 0,1058 | 0,1052 | 0,1050 | 0,1048 | 0,1039 | 0,1037 | 0,1082 | | |
| | 491,92 | 495,00 | 496,78 | 498,43 | 500,28 | 502,12 | 504,09 | 506,07 | 508,07 | 510,05 | 512,08 | 513,92 | | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | İşlem | 0,1203 | 0,1074 | 0,1035 | 0,1010 | 0,1004 | 0,1001 | 0,0999 | 0,0997 | 0,0998 | 0,0990 | 0,0989 | 0,1031 | | |
| | 493,25 | 496,91 | 498,54 | 500,15 | 501,94 | 503,79 | 505,74 | 507,71 | 509,70 | 511,67 | 513,67 | 515,49 | | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | İşlem | 0,1309 | 0,1139 | 0,1075 | 0,1044 | 0,1031 | 0,1023 | 0,1018 | 0,1013 | 0,1011 | 0,1001 | 0,1000 | 0,1066 | | |
| | 505,18 | 508,15 | 510,76 | 512,19 | 514,21 | 516,24 | 518,18 | 520,22 | 522,46 | 524,31 | 526,38 | 528,36 | | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | İşlem | 0,1381 | 0,1157 | 0,1118 | 0,1095 | 0,1073 | 0,1064 | 0,1069 | 0,1052 | 0,1050 | 0,1043 | 0,1040 | 0,1110 | | |
| | 489,90 | 492,35 | 494,66 | 496,37 | 498,68 | 500,17 | 502,56 | 504,09 | 506,11 | 508,04 | 510,33 | 511,87 | | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | İşlem | 0,1225 | 0,1190 | 0,1078 | 0,1098 | 0,1027 | 0,1055 | 0,1014 | 0,1013 | 0,1008 | 0,1022 | 0,0999 | 0,1050 | | |
| | 493,66 | 491,16 | 494,77 | 496,50 | 498,17 | 500,90 | 501,55 | 503,68 | 505,16 | 507,34 | 509,12 | 511,67 | | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | İşlem | 0,1805 | 0,1335 | 0,1168 | 0,1217 | 0,1039 | 0,1043 | 0,1000 | 0,1011 | 0,0998 | 0,1026 | 0,0967 | 0,1080 | | |
| | 512,76 | 515,91 | 518,19 | 520,75 | 523,16 | 525,52 | 527,99 | 530,39 | 532,95 | 535,68 | 538,15 | 540,74 | | 0,1119 | 1,32 |
| 7.5SK-2-0.3-1 | İşlem | 0,1400 | 0,1207 | 0,1184 | 0,1156 | 0,1134 | 0,1128 | 0,1119 | 0,1122 | 0,1132 | 0,1128 | 0,1131 | 0,1144 | | |
| | 503,60 | 506,48 | 508,66 | 511,08 | 513,43 | 515,75 | 518,15 | 520,54 | 523,14 | 525,87 | 528,35 | 531,04 | | | |
| 7.5SK-2-0.3-2 | İşlem | 0,1280 | 0,1124 | 0,1108 | 0,1092 | 0,1080 | 0,1078 | 0,1076 | 0,1086 | 0,1100 | 0,1100 | 0,1109 | 0,1095 | | |
| | 489,20 | 492,29 | 494,33 | 496,68 | 501,25 | 503,65 | 506,01 | 508,62 | 511,33 | 513,76 | 516,41 | 516,89 | | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | İşlem | 0,1166 | 0,1133 | 0,1109 | 0,1095 | 0,1095 | 0,1103 | 0,1118 | 0,1116 | 0,1124 | 0,1126 | 0,1132 | 0,1115 | | |
| | 510,55 | 513,81 | 516,22 | 518,55 | 521,15 | 523,22 | 525,79 | 528,48 | 530,05 | 532,16 | 535,19 | 538,24 | | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | İşlem | 0,1462 | 0,1271 | 0,1196 | 0,1188 | 0,1136 | 0,1139 | 0,1149 | 0,1093 | 0,1077 | 0,1105 | 0,1129 | 0,1148 | | |
| | 501,55 | 504,36 | 506,12 | 509,80 | 511,43 | 513,46 | 516,19 | 518,34 | 521,16 | 523,08 | 525,24 | 529,07 | | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | | | | 0,1250 | 0,1123 | 0,1083 | 0,1109 | 0,1090 | 0,1114 | 0,1087 | 0,1077 | 0,1137 | | | |
| | İşlem | 0,1277 | 0,1039 | | | | | | | | | | 0,1111 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7.5SK-2-0.3-6 | 487,24 | 490,18 | 492,33 | 494,12 | 496,77 | 499,25 | 501,64 | 504,76 | 506,02 | 509,34 | 511,27 | 514,16 | | | |
| | İşlem | 0,1336 | 0,1157 | 0,1042 | 0,1083 | 0,1092 | 0,1091 | 0,1138 | 0,1067 | 0,1116 | 0,1092 | 0,1112 | 0,1099 | | |
| | 490,71 | 494,40 | 496,69 | 499,42 | 502,15 | 504,83 | 507,57 | 510,28 | 513,11 | 516,06 | 518,69 | 521,46 | | 0,1200 | 1,24 |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | İşlem | 0,1538 | 0,1246 | 0,1210 | 0,1192 | 0,1177 | 0,1171 | 0,1165 | 0,1167 | 0,1174 | 0,1166 | 0,1165 | 0,1183 | | |
| | 509,53 | 513,50 | 515,85 | 518,66 | 521,49 | 524,24 | 527,10 | 529,93 | 532,92 | 536,02 | 538,77 | 541,69 | | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | İşlem | 0,1726 | 0,1374 | 0,1323 | 0,1300 | 0,1279 | 0,1273 | 0,1267 | 0,1271 | 0,1280 | 0,1271 | 0,1271 | 0,1291 | | |
| | 494,06 | 497,90 | 499,96 | 502,46 | 504,96 | 507,41 | 509,98 | 512,50 | 515,21 | 518,10 | 520,70 | 523,48 | | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | İşlem | 0,1600 | 0,1229 | 0,1167 | 0,1135 | 0,1113 | 0,1106 | 0,1098 | 0,1102 | 0,1113 | 0,1110 | 0,1114 | 0,1129 | | |
| | 488,61 | 492,30 | 494,96 | 497,16 | 500,91 | 502,99 | 505,14 | 508,19 | 511,56 | 514,17 | 516,88 | 519,26 | | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | İşlem | 0,1538 | 0,1323 | 0,1188 | 0,1281 | 0,1198 | 0,1148 | 0,1165 | 0,1195 | 0,1183 | 0,1178 | 0,1161 | 0,1202 | | |
| | 507,17 | 511,55 | 513,63 | 516,66 | 519,32 | 522,20 | 525,11 | 527,09 | 530,86 | 533,16 | 536,80 | 539,19 | | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | İşlem | 0,1835 | 0,1346 | 0,1318 | 0,1266 | 0,1253 | 0,1246 | 0,1186 | 0,1234 | 0,1203 | 0,1235 | 0,1213 | 0,1250 | | |
| | 492,11 | 495,92 | 497,18 | 500,46 | 502,22 | 505,31 | 507,16 | 510,55 | 513,44 | 516,27 | 518,86 | 521,15 | | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | İşlem | 0,1657 | 0,1102 | 0,1210 | 0,1099 | 0,1148 | 0,1091 | 0,1145 | 0,1159 | 0,1167 | 0,1163 | 0,1148 | 0,1143 | | |
| | 512,86 | 515,49 | 517,46 | 519,41 | 521,35 | 523,31 | 525,19 | 527,14 | 529,37 | 531,14 | 533,02 | 535,08 | | 0,1220 | 1,16 |
| 10SK-1-0.3-1 | İşlem | 0,1547 | 0,1353 | 0,1284 | 0,1249 | 0,1229 | 0,1209 | 0,1200 | 0,1214 | 0,1195 | 0,1186 | 0,1188 | 0,1231 | | |
| | 500,57 | 503,18 | 504,96 | 506,85 | 508,73 | 510,61 | 512,43 | 514,28 | 516,38 | 518,06 | 519,93 | 521,88 | | | |
| 10SK-1-0.3-2 | İşlem | 0,1631 | 0,1372 | 0,1308 | 0,1275 | 0,1255 | 0,1235 | 0,1224 | 0,1235 | 0,1215 | 0,1210 | 0,1211 | 0,1254 | | |
| | 494,34 | 496,79 | 498,41 | 500,21 | 502,05 | 503,95 | 505,87 | 507,82 | 510,08 | 511,83 | 513,77 | 515,79 | | | |
| 10SK-1-0.3-3 | İşlem | 0,1531 | 0,1272 | 0,1223 | 0,1205 | 0,1201 | 0,1201 | 0,1204 | 0,1230 | 0,1215 | 0,1214 | 0,1219 | 0,1218 | | |
| | 510,17 | 513,49 | 515,56 | 517,17 | 519,24 | 521,38 | 523,09 | 525,28 | 527,36 | 529,04 | 531,90 | 533,87 | | | |
| 10SK-1-0.3-4 | İşlem | 0,1844 | 0,1497 | 0,1296 | 0,1260 | 0,1246 | 0,1196 | 0,1199 | 0,1194 | 0,1165 | 0,1207 | 0,1197 | 0,1246 | | |
| | 498,16 | 501,94 | 502,87 | 504,76 | 506,16 | 508,57 | 510,23 | 512,28 | 514,45 | 516,01 | 517,99 | 519,72 | | | |
| 10SK-1-0.3-5 | İşlem | 0,2224 | 0,1385 | 0,1294 | 0,1176 | 0,1225 | 0,1183 | 0,1187 | 0,1198 | 0,1167 | 0,1166 | 0,1153 | 0,1213 | | |
| | 492,22 | 494,19 | 496,36 | 498,01 | 500,05 | 502,87 | 504,28 | 505,06 | 508,36 | 509,77 | 511,79 | 514,32 | | | |
| 10SK-1-0.3-6 | İşlem | 0,1145 | 0,1203 | 0,1122 | 0,1138 | 0,1238 | 0,1169 | 0,1066 | 0,1173 | 0,1134 | 0,1138 | 0,1168 | 0,1155 | | |
| | 490,69 | 493,16 | 494,74 | 496,39 | 498,17 | 500,04 | 501,86 | 503,70 | 505,56 | 507,85 | 509,49 | 511,58 | | 0,1251 | 1,23 |
| 10SK-1.5-0.3-1 | İşlem | 0,1544 | 0,1266 | 0,1188 | 0,1169 | 0,1169 | 0,1164 | 0,1162 | 0,1184 | 0,1172 | 0,1175 | 0,1187 | 0,1183 | | |
| | 498,26 | 501,18 | 502,84 | 504,72 | 506,65 | 508,65 | 510,63 | 512,64 | 514,92 | 516,74 | 518,75 | 520,85 | | | |
| 10SK-1.5-0.3-2 | İşlem | 0,1825 | 0,1431 | 0,1346 | 0,1311 | 0,1299 | 0,1289 | 0,1284 | 0,1302 | 0,1283 | 0,1281 | 0,1284 | 0,1311 | | |
| | 502,99 | 505,95 | 507,34 | 509,07 | 510,87 | 512,74 | 514,60 | 516,51 | 518,71 | 520,48 | 522,47 | 524,54 | | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | İşlem | 0,1850 | 0,1359 | 0,1267 | 0,1231 | 0,1219 | 0,1209 | 0,1207 | 0,1228 | 0,1215 | 0,1218 | 0,1224 | 0,1238 | | |
| | 488,16 | 491,74 | 492,71 | 494,22 | 496,05 | 498,04 | 500,17 | 501,88 | 503,66 | 505,36 | 507,19 | 509,58 | | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | İşlem | 0,2237 | 0,1422 | 0,1263 | 0,1233 | 0,1235 | 0,1251 | 0,1225 | 0,1211 | 0,1194 | 0,1189 | 0,1217 | 0,1244 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 496,11 | 499,17 | 500,84 | 502,99 | 504,86 | 506,35 | 508,44 | 510,06 | 512,92 | 514,00 | 516,12 | 518,33 | 0,1316 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 500,91 | 503,86 | 505,22 | 507,07 | 508,99 | 510,64 | 512,55 | 514,57 | 516,01 | 518,22 | 520,36 | 522,55 | | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | İşlem | 0,1810 | 0,1322 | 0,1260 | 0,1239 | 0,1194 | 0,1190 | 0,1197 | 0,1158 | 0,1180 | 0,1193 | 0,1207 | 0,1214 | | |
| | 498,96 | 501,54 | 503,32 | 505,20 | 507,01 | 508,86 | 510,99 | 512,98 | 514,68 | 516,66 | 518,60 | 520,52 | | 0,1270 | 1,32 |
| 10SK-2-0.3-1 | İşlem | 0,1641 | 0,1387 | 0,1323 | 0,1280 | 0,1259 | 0,1275 | 0,1274 | 0,1250 | 0,1251 | 0,1249 | 0,1247 | 0,1279 | | |
| | 499,19 | 501,90 | 503,58 | 505,37 | 507,12 | 508,97 | 511,23 | 513,30 | 515,07 | 517,12 | 519,23 | 521,25 | | | |
| 10SK-2-0.3-2 | İşlem | 0,1730 | 0,1401 | 0,1315 | 0,1265 | 0,1248 | 0,1281 | 0,1287 | 0,1267 | 0,1272 | 0,1279 | 0,1280 | 0,1289 | | |
| | 508,35 | 511,02 | 512,74 | 514,65 | 516,58 | 518,51 | 520,85 | 523,00 | 524,82 | 526,90 | 529,06 | 531,13 | | | |
| 10SK-2-0.3-3 | İşlem | 0,1628 | 0,1338 | 0,1280 | 0,1255 | 0,1239 | 0,1270 | 0,1276 | 0,1255 | 0,1257 | 0,1263 | 0,1263 | 0,1270 | | |
| | 496,71 | 499,16 | 501,32 | 503,14 | 505,01 | 506,17 | 508,66 | 510,21 | 512,58 | 514,63 | 516,80 | 518,52 | 0,1277 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | İşlem | 0,1541 | 0,1450 | 0,1348 | 0,1305 | 0,1190 | 0,1253 | 0,1213 | 0,1248 | 0,1252 | 0,1264 | 0,1247 | | | |
| | 497,44 | 499,85 | 501,56 | 503,12 | 505,79 | 506,99 | 509,21 | 511,03 | 513,70 | 515,23 | 517,52 | 519,27 | | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 0,1538 | 0,1315 | 0,1208 | 0,1332 | 0,1219 | 0,1252 | 0,1239 | 0,1297 | 0,1262 | 0,1282 | 0,1267 | 0,1260 | 0,1267 | | |
| | 506,17 | 509,20 | 510,47 | 512,25 | 514,88 | 516,15 | 518,83 | 521,00 | 522,11 | 524,99 | 527,65 | 529,12 | | | |
| 10SK-2-0.3-6 | İşlem | 0,1272 | 0,1199 | 0,1288 | 0,1181 | 0,1249 | 0,1254 | 0,1179 | 0,1237 | 0,1271 | 0,1235 | 0,1230 | 0,1236 | | |
| | 482,51 | 485,01 | 486,65 | 488,43 | 490,17 | 491,93 | 493,98 | 495,87 | 497,52 | 499,38 | 501,36 | 503,28 | | 0,1292 | 1,14 |
| 10SK-2.5-0.3-1 | İşlem | 0,1598 | 0,1323 | 0,1261 | 0,1224 | 0,1204 | 0,1222 | 0,1220 | 0,1199 | 0,1198 | 0,1205 | 0,1207 | 0,1226 | | |
| | 492,55 | 495,21 | 496,67 | 498,30 | 499,91 | 501,55 | 503,54 | 505,38 | 507,01 | 508,85 | 510,79 | 512,75 | | | |
| 10SK-2.5-0.3-2 | İşlem | 0,1773 | 0,1373 | 0,1278 | 0,1227 | 0,1200 | 0,1221 | 0,1222 | 0,1205 | 0,1207 | 0,1216 | 0,1224 | 0,1237 | | |
| | 507,54 | 510,27 | 511,82 | 513,57 | 515,37 | 517,22 | 519,43 | 521,50 | 523,23 | 525,22 | 527,34 | 529,35 | | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | İşlem | 0,1820 | 0,1427 | 0,1340 | 0,1305 | 0,1291 | 0,1321 | 0,1330 | 0,1308 | 0,1310 | 0,1320 | 0,1322 | 0,1327 | | |
| | 480,61 | 483,12 | 484,66 | 486,43 | 488,66 | 489,96 | 491,86 | 493,87 | 495,11 | 497,30 | 499,63 | 501,16 | | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | İşlem | 0,1673 | 0,1350 | 0,1293 | 0,1305 | 0,1247 | 0,1250 | 0,1263 | 0,1208 | 0,1236 | 0,1268 | 0,1245 | 0,1267 | | |
| | 490,52 | 493,17 | 494,66 | 496,34 | 497,90 | 499,67 | 501,45 | 503,00 | 505,14 | 506,69 | 508,09 | 510,77 | | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | İşlem | 0,1893 | 0,1479 | 0,1386 | 0,1318 | 0,1307 | 0,1301 | 0,1273 | 0,1305 | 0,1283 | 0,1255 | 0,1315 | 0,1322 | | |
| | 505,22 | 508,35 | 509,81 | 511,51 | 513,28 | 515,27 | 517,35 | 519,51 | 521,30 | 523,29 | 525,66 | 527,31 | | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | İşlem | 0,2087 | 0,1530 | 0,1398 | 0,1343 | 0,1340 | 0,1348 | 0,1361 | 0,1340 | 0,1339 | 0,1363 | 0,1339 | 0,1370 | | |
| | 493,92 | 496,49 | 497,83 | 499,41 | 501,03 | 502,71 | 504,69 | 506,52 | 508,14 | 509,89 | 511,71 | 513,51 | | 0,1255 | 0,96 |
| 12.5SK-1-0.3-1 | İşlem | 0,1836 | 0,1396 | 0,1307 | 0,1270 | 0,1256 | 0,1282 | 0,1286 | 0,1270 | 0,1267 | 0,1271 | 0,1272 | 0,1288 | | |
| | 495,50 | 498,11 | 499,42 | 501,00 | 502,65 | 504,37 | 506,30 | 508,26 | 509,84 | 511,64 | 513,00 | 513,01 | | | |
| 12.5SK-1-0.3-2 | İşlem | 0,1794 | 0,1347 | 0,1260 | 0,1229 | 0,1219 | 0,1237 | 0,1253 | 0,1232 | 0,1233 | 0,1230 | 0,1227 | 0,1251 | | |
| | 501,21 | 504,06 | 505,37 | 506,99 | 508,63 | 510,32 | 512,34 | 514,18 | 515,76 | 517,51 | 519,33 | 521,06 | | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | İşlem | 0,1900 | 0,1387 | 0,1284 | 0,1237 | 0,1215 | 0,1237 | 0,1235 | 0,1213 | 0,1207 | 0,1208 | 0,1215 | 0,1247 | | |
| | 491,16 | 494,41 | 495,78 | 497,33 | 499,03 | 500,56 | 502,88 | 504,12 | 506,14 | 507,65 | 509,17 | 511,24 | | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | İşlem | 0,2049 | 0,1456 | 0,1296 | 0,1240 | 0,1185 | 0,1231 | 0,1167 | 0,1180 | 0,1155 | 0,1135 | 0,1151 | 0,1227 | | |
| | 493,55 | 496,22 | 497,24 | 499,32 | 500,17 | 502,47 | 504,36 | 506,20 | 507,48 | 509,65 | 511,77 | 513,26 | | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | İşlem | 0,1816 | 0,1255 | 0,1308 | 0,1126 | 0,1214 | 0,1226 | 0,1229 | 0,1185 | 0,1217 | 0,1223 | 0,1235 | 0,1220 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 499,15 | 502,67 | 503,18 | 504,77 | 506,63 | 508,38 | 510,12 | 512,16 | 513,70 | 515,11 | 517,30 | 519,25 | | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | İşlem | 0,2462 | 0,1409 | 0,1310 | 0,1308 | 0,1291 | 0,1279 | 0,1300 | 0,1272 | 0,1240 | 0,1269 | 0,1273 | 0,1297 | | |
| | 504,99 | 507,69 | 508,85 | 510,31 | 511,83 | 513,44 | 515,33 | 517,02 | 518,47 | 520,05 | 521,63 | 523,13 | | 0,1270 | 0,84 |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | İşlem | 0,2077 | 0,1485 | 0,1364 | 0,1315 | 0,1300 | 0,1326 | 0,1322 | 0,1296 | 0,1287 | 0,1280 | 0,1269 | 0,1324 | | |
| | 495,55 | 498,48 | 499,62 | 501,11 | 502,64 | 504,21 | 506,07 | 507,74 | 509,18 | 510,74 | 512,35 | 513,84 | | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | İşlem | 0,2093 | 0,1454 | 0,1324 | 0,1266 | 0,1237 | 0,1252 | 0,1244 | 0,1217 | 0,1206 | 0,1200 | 0,1188 | 0,1259 | | |
| | 510,46 | 513,50 | 514,66 | 516,16 | 517,73 | 519,34 | 521,18 | 522,75 | 524,13 | 525,61 | 527,17 | 528,68 | | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | İşlem | 0,2097 | 0,1448 | 0,1310 | 0,1253 | 0,1225 | 0,1232 | 0,1211 | 0,1178 | 0,1161 | 0,1152 | 0,1142 | 0,1231 | | |
| | 502,11 | 505,61 | 506,58 | 508,36 | 509,53 | 511,02 | 513,50 | 515,19 | 516,77 | 518,34 | 519,96 | 521,11 | | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | İşlem | 0,2371 | 0,1514 | 0,1411 | 0,1257 | 0,1207 | 0,1286 | 0,1266 | 0,1242 | 0,1222 | 0,1209 | 0,1170 | 0,1278 | | |
| | 493,39 | 496,41 | 497,14 | 499,12 | 500,57 | 502,53 | 504,27 | 505,44 | 507,98 | 508,58 | 510,39 | 511,11 | | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | İşlem | 0,2157 | 0,1339 | 0,1364 | 0,1282 | 0,1306 | 0,1295 | 0,1230 | 0,1303 | 0,1206 | 0,1214 | 0,1151 | 0,1269 | | |
| | 508,01 | 511,19 | 512,78 | 514,11 | 515,77 | 517,81 | 519,10 | 520,13 | 522,68 | 523,27 | 525,37 | 526,66 | | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | İşlem | 0,2120 | 0,1590 | 0,1356 | 0,1293 | 0,1307 | 0,1232 | 0,1154 | 0,1223 | 0,1130 | 0,1157 | 0,1130 | 0,1257 | | |
| | 495,26 | 497,80 | 499,21 | 500,98 | 502,62 | 504,35 | 506,25 | 507,89 | 509,70 | 511,53 | 513,28 | 515,09 | 0,1314 | 0,1291 | 0,82 |
| 12.5SK-2-0.3-1 | İşlem | 0,1814 | 0,1411 | 0,1362 | 0,1314 | 0,1299 | 0,1308 | 0,1289 | 0,1289 | 0,1291 | 0,1287 | 0,1288 | | | |
| | 505,16 | 507,84 | 509,18 | 510,94 | 512,60 | 514,45 | 516,27 | 517,90 | 519,75 | 521,63 | 523,40 | 525,27 | | | |
| 12.5SK-2-0.3-2 | İşlem | 0,1874 | 0,1406 | 0,1347 | 0,1301 | 0,1299 | 0,1295 | 0,1273 | 0,1275 | 0,1280 | 0,1276 | 0,1278 | 0,1303 | | |
| | 497,17 | 500,13 | 501,53 | 503,30 | 504,98 | 506,72 | 508,52 | 510,10 | 511,90 | 513,69 | 515,38 | 517,17 | | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | İşlem | 0,1973 | 0,1453 | 0,1362 | 0,1302 | 0,1273 | 0,1261 | 0,1231 | 0,1228 | 0,1224 | 0,1214 | 0,1212 | 0,1276 | | |
| | 493,11 | 494,76 | 497,12 | 498,99 | 500,17 | 502,56 | 504,89 | 505,07 | 507,56 | 509,35 | 511,06 | 513,12 | | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | İşlem | 0,1338 | 0,1383 | 0,1352 | 0,1217 | 0,1303 | 0,1354 | 0,1178 | 0,1246 | 0,1244 | 0,1238 | 0,1255 | 0,1277 | | |
| | 503,40 | 505,48 | 507,16 | 508,60 | 510,54 | 512,11 | 514,19 | 515,89 | 517,79 | 519,32 | 521,45 | 523,21 | | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | İşlem | 0,1486 | 0,1343 | 0,1238 | 0,1275 | 0,1244 | 0,1285 | 0,1274 | 0,1285 | 0,1263 | 0,1289 | 0,1286 | 0,1278 | | |
| | 495,13 | 498,61 | 499,56 | 501,47 | 503,90 | 504,72 | 506,11 | 508,19 | 509,66 | 511,94 | 513,68 | 515,12 | | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | İşlem | 0,1820 | 0,1477 | 0,1409 | 0,1462 | 0,1279 | 0,1220 | 0,1244 | 0,1211 | 0,1245 | 0,1237 | 0,1212 | 0,1299 | | |
| | 500,80 | 503,69 | 505,01 | 506,73 | 508,39 | 510,14 | 512,00 | 513,65 | 515,51 | 517,41 | 519,18 | 521,07 | | 0,1310 | 0,89 |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | İşlem | 0,1657 | 0,1352 | 0,1270 | 0,1219 | 0,1200 | 0,1199 | 0,1179 | 0,1181 | 0,1186 | 0,1181 | 0,1184 | 0,1215 | | |
| | 508,54 | 511,70 | 513,01 | 514,79 | 516,44 | 518,23 | 520,14 | 521,84 | 523,74 | 525,63 | 527,42 | 529,32 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | İşlem | 0,1605 | 0,1489 | 0,1388 | 0,1316 | 0,1291 | 0,1288 | 0,1266 | 0,1266 | 0,1265 | 0,1258 | 0,1258 | 0,1308 | | |
| | 491,09 | 494,20 | 495,50 | 497,23 | 498,84 | 500,55 | 502,32 | 503,85 | 505,61 | 507,35 | 509,00 | 510,74 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | İşlem | 0,1860 | 0,1460 | 0,1355 | 0,1283 | 0,1253 | 0,1240 | 0,1207 | 0,1202 | 0,1196 | 0,1186 | 0,1183 | 0,1257 | | |
| | 498,16 | 501,15 | 502,60 | 504,77 | 506,38 | 508,19 | 510,55 | 511,60 | 513,77 | 515,71 | 517,03 | 519,22 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | İşlem | 0,1762 | 0,1531 | 0,1520 | 0,1417 | 0,1383 | 0,1424 | 0,1324 | 0,1346 | 0,1345 | 0,1301 | 0,1320 | 0,1391 | | |
| | 506,11 | 509,59 | 511,27 | 512,04 | 514,60 | 516,12 | 518,88 | 519,24 | 521,00 | 523,11 | 525,87 | 527,43 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | İşlem | 0,1918 | 0,1719 | 0,1317 | 0,1414 | 0,1334 | 0,1418 | 0,1250 | 0,1240 | 0,1258 | 0,1316 | 0,1291 | 0,1356 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 489,16 | 492,01 | 493,56 | 495,00 | 496,14 | 498,67 | 500,18 | 501,89 | 503,61 | 505,16 | 507,83 | 508,19 | 0,1331 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | İşlem | 0,1736 | 0,1571 | 0,1390 | 0,1246 | 0,1359 | 0,1312 | 0,1299 | 0,1290 | 0,1270 | 0,1334 | 0,1236 | | | |
| | 505,12 | 508,43 | 510,16 | 512,51 | 514,67 | 516,99 | 518,40 | 521,06 | 523,21 | 525,17 | 527,98 | 528,10 | | 0,1051 | 1,25 |
| 15SK-1-0.3-1 | İşlem | 0,1427 | 0,1238 | 0,1210 | 0,1173 | 0,1167 | 0,1088 | 0,1119 | 0,1111 | 0,1095 | 0,1123 | 0,1027 | 0,1135 | | |
| | 481,65 | 484,13 | 486,06 | 488,11 | 490,20 | 492,38 | 494,10 | 496,17 | 498,25 | 500,66 | 502,19 | 504,33 | | | |
| 15SK-1-0.3-2 | İşlem | 0,1219 | 0,1084 | 0,1058 | 0,1050 | 0,1055 | 0,1020 | 0,1019 | 0,1020 | 0,1038 | 0,1009 | 0,1013 | 0,1037 | | |
| | 468,67 | 470,11 | 472,45 | 474,37 | 476,02 | 478,20 | 480,74 | 482,97 | 483,12 | 485,43 | 487,16 | 489,55 | | | |
| 15SK-1-0.3-3 | İşlem | 0,0708 | 0,0929 | 0,0934 | 0,0903 | 0,0937 | 0,0989 | 0,1004 | 0,0888 | 0,0915 | 0,0909 | 0,0933 | 0,0934 | | |
| | 503,45 | 506,55 | 508,17 | 510,10 | 512,82 | 514,76 | 516,01 | 519,67 | 521,11 | 523,25 | 525,15 | 526,00 | | | |
| 15SK-1-0.3-4 | İşlem | 0,1323 | 0,1160 | 0,1089 | 0,1151 | 0,1112 | 0,1029 | 0,1139 | 0,1085 | 0,1081 | 0,1066 | 0,1007 | 0,1092 | | |
| | 479,01 | 482,34 | 484,67 | 486,89 | 488,12 | 490,00 | 492,18 | 494,23 | 496,77 | 498,12 | 500,02 | 501,45 | | | |
| 15SK-1-0.3-5 | İşlem | 0,1536 | 0,1391 | 0,1291 | 0,1119 | 0,1080 | 0,1079 | 0,1068 | 0,1091 | 0,1043 | 0,1032 | 0,1002 | 0,1120 | | |
| | 466,11 | 468,83 | 470,45 | 472,27 | 474,03 | 476,60 | 478,12 | 480,17 | 481,99 | 483,56 | 485,10 | 487,56 | | | |
| 15SK-1-0.3-6 | İşlem | 0,1237 | 0,1066 | 0,1009 | 0,0973 | 0,1031 | 0,0984 | 0,0987 | 0,0975 | 0,0953 | 0,0933 | 0,0958 | 0,0987 | | |
| | 506,01 | 509,97 | 511,29 | 513,34 | 515,67 | 517,21 | 519,08 | 521,45 | 523,28 | 525,15 | 527,48 | 529,50 | | 0,1085 | 1,17 |
| 15SK-1.5-0.3-1 | İşlem | 0,1560 | 0,1307 | 0,1210 | 0,1196 | 0,1109 | 0,1078 | 0,1092 | 0,1069 | 0,1053 | 0,1063 | 0,1057 | 0,1123 | | |
| | 490,25 | 494,69 | 495,85 | 497,18 | 499,76 | 501,59 | 503,34 | 505,31 | 507,62 | 509,20 | 511,33 | 512,97 | | | |
| 15SK-1.5-0.3-2 | İşlem | 0,1598 | 0,1386 | 0,1144 | 0,1177 | 0,1123 | 0,1080 | 0,1065 | 0,1075 | 0,1042 | 0,1044 | 0,1023 | 0,1116 | | |
| | 492,12 | 495,76 | 497,42 | 499,60 | 500,92 | 502,56 | 504,41 | 506,32 | 508,26 | 510,68 | 512,56 | 514,39 | | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | İşlem | 0,1584 | 0,1299 | 0,1222 | 0,1078 | 0,1024 | 0,1004 | 0,0994 | 0,0989 | 0,1011 | 0,1002 | 0,0992 | 0,1062 | | |
| | 504,70 | 507,13 | 509,52 | 511,71 | 513,52 | 515,44 | 517,35 | 519,27 | 521,37 | 523,24 | 525,30 | 527,46 | | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | İşlem | 0,1185 | 0,1176 | 0,1140 | 0,1076 | 0,1048 | 0,1028 | 0,1015 | 0,1016 | 0,1005 | 0,1005 | 0,1009 | 0,1052 | | |
| | 488,25 | 491,50 | 493,45 | 495,87 | 497,79 | 499,17 | 501,09 | 503,61 | 505,54 | 507,43 | 508,04 | 510,51 | | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | İşlem | 0,1385 | 0,1268 | 0,1239 | 0,1163 | 0,1065 | 0,1044 | 0,1070 | 0,1054 | 0,1040 | 0,0965 | 0,0992 | 0,1090 | | |
| | 490,05 | 493,60 | 495,53 | 497,87 | 499,31 | 500,50 | 502,53 | 504,09 | 506,39 | 508,21 | 510,85 | 511,14 | | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | İşlem | 0,1532 | 0,1337 | 0,1272 | 0,1129 | 0,1020 | 0,1015 | 0,0978 | 0,0996 | 0,0984 | 0,1015 | 0,0935 | 0,1068 | | |
| | 511,40 | 514,61 | 517,87 | 519,37 | 521,85 | 524,12 | 526,99 | 529,06 | 531,42 | 534,50 | 537,44 | 539,76 | | 0,1120 | 1,19 |
| 15SK-2-0.3-1 | İşlem | 0,1427 | 0,1438 | 0,1181 | 0,1161 | 0,1131 | 0,1155 | 0,1121 | 0,1112 | 0,1141 | 0,1157 | 0,1146 | 0,1174 | | |
| | 502,86 | 505,98 | 507,05 | 510,17 | 512,18 | 514,55 | 517,49 | 519,98 | 522,11 | 524,00 | 527,48 | 530,13 | | | |
| 15SK-2-0.3-2 | İşlem | 0,1187 | 0,0931 | 0,1083 | 0,1036 | 0,1039 | 0,1084 | 0,1087 | 0,1069 | 0,1044 | 0,1094 | 0,1102 | 0,1057 | | |
| | 488,31 | 491,00 | 493,47 | 495,16 | 497,85 | 500,22 | 502,09 | 505,84 | 507,97 | 510,12 | 512,71 | 515,37 | | | |
| 15SK-2-0.3-3 | İşlem | 0,1206 | 0,1157 | 0,1024 | 0,1070 | 0,1068 | 0,1030 | 0,1123 | 0,1102 | 0,1087 | 0,1094 | 0,1103 | 0,1086 | | |
| | 509,15 | 512,78 | 515,36 | 517,43 | 520,05 | 522,92 | 524,99 | 527,14 | 529,67 | 531,66 | 534,23 | 537,45 | | | |
| 15SK-2-0.3-4 | İşlem | 0,1413 | 0,1380 | 0,1227 | 0,1211 | 0,1224 | 0,1173 | 0,1142 | 0,1140 | 0,1112 | 0,1115 | 0,1143 | 0,1187 | | |
| | 500,07 | 503,24 | 505,08 | 508,16 | 510,34 | 512,26 | 515,18 | 517,21 | 520,42 | 522,12 | 524,29 | 528,63 | | | |
| 15SK-2-0.3-5 | İşlem | 0,1209 | 0,1113 | 0,1199 | 0,1141 | 0,1084 | 0,1119 | 0,1088 | 0,1131 | 0,1089 | 0,1076 | 0,1154 | 0,1119 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 486,36 | 489,11 | 491,30 | 493,69 | 495,81 | 498,22 | 500,46 | 503,02 | 505,26 | 508,10 | 510,87 | 513,64 | 0,1095 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Numune kodu | İşlem | 0,1250 | 0,1123 | 0,1111 | 0,1074 | 0,1078 | 0,1068 | 0,1082 | 0,1074 | 0,1098 | 0,1114 | 0,1127 | Hesap sonucu | | |
| | 489,38 | 493,46 | 495,15 | 498,56 | 501,25 | 503,04 | 506,94 | 509,85 | 512,64 | 515,89 | 517,80 | 520,77 | | 0,1156 | 1,12 |
| 15SK-2.5-0.3-1 | İşlem | 0,1400 | 0,1202 | 0,1275 | 0,1236 | 0,1138 | 0,1219 | 0,1218 | 0,1211 | 0,1227 | 0,1184 | 0,1189 | 0,1210 | | |
| | 508,26 | 512,33 | 514,87 | 517,62 | 520,29 | 523,03 | 526,15 | 528,84 | 531,81 | 535,02 | 537,91 | 540,56 | | | |
| 15SK-2.5-0.3-2 | İşlem | 0,1409 | 0,1306 | 0,1233 | 0,1189 | 0,1168 | 0,1179 | 0,1162 | 0,1164 | 0,1175 | 0,1172 | 0,1161 | 0,1191 | | |
| | 493,00 | 496,29 | 498,09 | 501,57 | 503,47 | 506,75 | 508,10 | 511,35 | 514,61 | 517,13 | 519,75 | 522,17 | | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | İşlem | 0,1171 | 0,1060 | 0,1190 | 0,1085 | 0,1146 | 0,1049 | 0,1092 | 0,1126 | 0,1117 | 0,1115 | 0,1105 | 0,1108 | | |
| | 487,38 | 491,33 | 493,71 | 496,19 | 499,99 | 501,86 | 504,07 | 507,21 | 510,58 | 513,07 | 515,90 | 518,00 | | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | İşlem | 0,1319 | 0,1297 | 0,1204 | 0,1292 | 0,1187 | 0,1140 | 0,1161 | 0,1189 | 0,1170 | 0,1169 | 0,1141 | 0,1195 | | |
| | 506,24 | 510,46 | 512,63 | 515,08 | 518,57 | 521,22 | 524,11 | 526,55 | 529,43 | 532,11 | 535,00 | 538,47 | | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | İşlem | 0,1455 | 0,1253 | 0,1156 | 0,1209 | 0,1175 | 0,1168 | 0,1138 | 0,1137 | 0,1127 | 0,1128 | 0,1149 | 0,1164 | | |
| | 491,90 | 494,88 | 496,15 | 499,33 | 501,36 | 504,17 | 506,58 | 508,27 | 512,82 | 515,45 | 517,89 | 520,04 | | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | İşlem | 0,1196 | 0,0924 | 0,1077 | 0,1028 | 0,1067 | 0,1064 | 0,1017 | 0,1137 | 0,1138 | 0,1130 | 0,1112 | 0,1069 | | |
| | 502,33 | 505,47 | 507,61 | 509,78 | 511,99 | 513,45 | 515,09 | 518,04 | 520,98 | 522,86 | 524,13 | 525,17 | | 0,0816 | 0,82 |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | İşlem | 0,1063 | 0,0978 | 0,0920 | 0,0894 | 0,0824 | 0,0788 | 0,0831 | 0,0863 | 0,0845 | 0,0807 | 0,0769 | 0,0852 | | |
| | 478,16 | 481,24 | 483,06 | 485,45 | 487,32 | 489,29 | 491,68 | 493,86 | 495,25 | 497,63 | 499,06 | 501,35 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | İşlem | 0,1041 | 0,0907 | 0,0900 | 0,0848 | 0,0824 | 0,0835 | 0,0831 | 0,0791 | 0,0801 | 0,0774 | 0,0781 | 0,0829 | | |
| | 465,44 | 467,17 | 469,35 | 471,37 | 473,19 | 475,77 | 477,74 | 479,92 | 480,32 | 482,46 | 484,19 | 486,25 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | İşlem | 0,0665 | 0,0752 | 0,0760 | 0,0745 | 0,0795 | 0,0788 | 0,0796 | 0,0715 | 0,0727 | 0,0721 | 0,0728 | 0,0753 | | |
| | 500,11 | 503,58 | 505,17 | 507,21 | 509,99 | 511,87 | 513,31 | 516,42 | 518,44 | 520,67 | 522,24 | 523,99 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | İşlem | 0,1085 | 0,0937 | 0,0877 | 0,0915 | 0,0871 | 0,0815 | 0,0863 | 0,0849 | 0,0846 | 0,0820 | 0,0804 | 0,0860 | | |
| | 476,16 | 479,34 | 481,42 | 483,86 | 485,14 | 487,10 | 489,17 | 491,10 | 493,74 | 495,11 | 497,23 | 498,98 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | İşlem | 0,1078 | 0,0974 | 0,0951 | 0,0831 | 0,0810 | 0,0803 | 0,0790 | 0,0814 | 0,0780 | 0,0780 | 0,0768 | 0,0830 | | |
| | 463,23 | 465,16 | 467,48 | 469,19 | 471,56 | 473,57 | 475,38 | 477,77 | 478,81 | 480,59 | 482,15 | 484,51 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | İşlem | 0,0742 | 0,0817 | 0,0764 | 0,0801 | 0,0795 | 0,0779 | 0,0799 | 0,0749 | 0,0742 | 0,0728 | 0,0744 | 0,0772 | | |
| | 509,11 | 512,46 | 515,28 | 517,17 | 520,16 | 522,44 | 524,68 | 527,36 | 529,90 | 532,61 | 535,18 | 537,21 | | 0,1123 | 0,91 |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | İşlem | 0,1357 | 0,1341 | 0,1168 | 0,1201 | 0,1159 | 0,1128 | 0,1134 | 0,1130 | 0,1135 | 0,1133 | 0,1111 | 0,1164 | | |
| | 500,00 | 503,12 | 505,47 | 508,88 | 510,16 | 512,21 | 515,24 | 517,66 | 520,48 | 522,89 | 525,35 | 528,45 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | İşlem | 0,1257 | 0,1189 | 0,1287 | 0,1104 | 0,1062 | 0,1104 | 0,1097 | 0,1113 | 0,1106 | 0,1102 | 0,1125 | 0,1129 | | |
| | 486,21 | 489,90 | 491,32 | 493,68 | 495,27 | 498,25 | 500,17 | 503,45 | 505,62 | 508,87 | 510,76 | 513,12 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | İşlem | 0,1277 | 0,1161 | 0,1132 | 0,1030 | 0,1095 | 0,1058 | 0,1119 | 0,1103 | 0,1144 | 0,1116 | 0,1112 | 0,1107 | | |
| | 507,42 | 510,87 | 513,24 | 515,55 | 518,66 | 520,22 | 522,65 | 525,40 | 527,11 | 529,00 | 532,19 | 535,17 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | İşlem | 0,1365 | 0,1265 | 0,1178 | 0,1222 | 0,1113 | 0,1104 | 0,1117 | 0,1070 | 0,1043 | 0,1077 | 0,1097 | 0,1129 | | |
| | 498,14 | 501,36 | 503,27 | 506,86 | 508,45 | 510,46 | 513,25 | 515,34 | 518,19 | 520,08 | 522,71 | 526,51 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | İşlem | 0,1206 | 0,1120 | 0,1269 | 0,1126 | 0,1076 | 0,1100 | 0,1073 | 0,1094 | 0,1065 | 0,1073 | 0,1126 | 0,1112 | | |

**Çizelge A.5 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kapiler su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | $m_d$ (kuru numune ağırlığı) (g) | t=1 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=4 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=9 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=16 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=25 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=36 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=49 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=64 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=81 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=100 dk ölçüm ağırlığı (g) | t=121 dk ölçüm ağırlığı (g) | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 484,17 | 487,18 | 489,10 | 491,12 | 493,99 | 496,25 | 498,01 | 501,76 | 503,45 | 506,12 | 508,18 | 511,16 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | İşlem | 0,1268 | 0,1120 | 0,1053 | 0,1116 | 0,1098 | 0,1048 | 0,1142 | 0,1095 | 0,1109 | 0,1091 | 0,1115 | 0,1099 | | |
| | 500,80 | 503,69 | 505,01 | 506,73 | 508,39 | 510,14 | 512,00 | 513,65 | 515,51 | 517,41 | 519,18 | 521,07 | | 0,1310 | 0,89 |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | İşlem | 0,1657 | 0,1352 | 0,1270 | 0,1219 | 0,1200 | 0,1199 | 0,1179 | 0,1181 | 0,1186 | 0,1181 | 0,1184 | 0,1215 | | |
| | 508,54 | 511,70 | 513,01 | 514,79 | 516,44 | 518,23 | 520,14 | 521,84 | 523,74 | 525,63 | 527,42 | 529,32 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | İşlem | 0,1605 | 0,1489 | 0,1388 | 0,1316 | 0,1291 | 0,1288 | 0,1266 | 0,1266 | 0,1265 | 0,1258 | 0,1258 | 0,1308 | | |
| | 491,09 | 494,20 | 495,50 | 497,23 | 498,84 | 500,55 | 502,32 | 503,85 | 505,61 | 507,35 | 509,00 | 510,74 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | İşlem | 0,1860 | 0,1460 | 0,1355 | 0,1283 | 0,1253 | 0,1240 | 0,1207 | 0,1202 | 0,1196 | 0,1186 | 0,1183 | 0,1257 | | |
| | 498,16 | 501,15 | 502,60 | 504,77 | 506,38 | 508,19 | 510,55 | 511,60 | 513,77 | 515,71 | 517,03 | 519,22 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | İşlem | 0,1762 | 0,1531 | 0,1520 | 0,1417 | 0,1383 | 0,1424 | 0,1324 | 0,1346 | 0,1345 | 0,1301 | 0,1320 | 0,1391 | | |
| | 506,11 | 509,59 | 511,27 | 512,04 | 514,60 | 516,12 | 518,88 | 519,24 | 521,00 | 523,11 | 525,87 | 527,43 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | İşlem | 0,1918 | 0,1719 | 0,1317 | 0,1414 | 0,1334 | 0,1418 | 0,1250 | 0,1240 | 0,1258 | 0,1316 | 0,1291 | 0,1356 | | |
| | 489,16 | 492,01 | 493,56 | 495,00 | 496,14 | 498,67 | 500,18 | 501,89 | 503,61 | 505,16 | 507,83 | 508,19 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | İşlem | 0,1736 | 0,1571 | 0,1390 | 0,1246 | 0,1359 | 0,1312 | 0,1299 | 0,1290 | 0,1270 | 0,1334 | 0,1236 | 0,1331 | | |
| | 507,33 | 510,68 | 512,21 | 514,57 | 516,76 | 518,52 | 520,08 | 522,69 | 524,10 | 526,35 | 528,33 | 530,97 | | 0,0556 | 0,88 |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | İşlem | 0,0859 | 0,0626 | 0,0619 | 0,0604 | 0,0574 | 0,0545 | 0,0563 | 0,0538 | 0,0542 | 0,0538 | 0,0551 | 0,0570 | | |
| | 491,35 | 495,76 | 496,12 | 498,32 | 500,81 | 502,16 | 504,48 | 506,41 | 508,16 | 510,27 | 512,39 | 513,85 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | İşlem | 0,0832 | 0,0612 | 0,0596 | 0,0606 | 0,0554 | 0,0561 | 0,0552 | 0,0539 | 0,0539 | 0,0524 | 0,0522 | 0,0562 | | |
| | 493,87 | 496,99 | 498,65 | 500,70 | 501,92 | 503,45 | 505,16 | 507,18 | 509,26 | 511,99 | 513,59 | 515,11 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | İşlem | 0,0800 | 0,0614 | 0,0584 | 0,0516 | 0,0491 | 0,0482 | 0,0488 | 0,0493 | 0,0516 | 0,0506 | 0,0495 | 0,0519 | | |
| | 505,71 | 508,42 | 510,53 | 512,79 | 514,12 | 516,89 | 518,11 | 520,20 | 522,23 | 525,78 | 526,18 | 528,48 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | İşlem | 0,0697 | 0,0617 | 0,0605 | 0,0539 | 0,0573 | 0,0530 | 0,0531 | 0,0528 | 0,0572 | 0,0525 | 0,0531 | 0,0555 | | |
| | 489,06 | 492,12 | 494,49 | 496,78 | 498,10 | 500,10 | 502,89 | 504,76 | 506,13 | 508,19 | 509,09 | 511,14 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | İşlem | 0,0787 | 0,0697 | 0,0661 | 0,0580 | 0,0567 | 0,0591 | 0,0575 | 0,0547 | 0,0545 | 0,0514 | 0,0515 | 0,0579 | | |
| | 491,24 | 494,26 | 496,71 | 498,87 | 500,01 | 501,50 | 503,44 | 505,19 | 507,87 | 509,81 | 511,17 | 512,41 | | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | İşlem | 0,0772 | 0,0700 | 0,0651 | 0,0562 | 0,0526 | 0,0521 | 0,0511 | 0,0532 | 0,0529 | 0,0511 | 0,0493 | 0,0554 | | |

**Çizelge A.6 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | $A_b$ (su emme oranı) (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 506,77 | 544,77 | 292,88 | 7,50 | 7,61 | 1,73 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 482,80 | 520,14 | 278,65 | 7,73 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 469,29 | 505,35 | 270,40 | 7,68 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 502,16 | 543,70 | 289,99 | 8,27 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 484,71 | 519,16 | 276,34 | 7,11 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 470,22 | 504,83 | 269,86 | 7,36 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 506,26 | 543,60 | 290,45 | 7,38 | 7,43 | 0,69 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 491,92 | 528,14 | 283,06 | 7,36 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 492,25 | 529,16 | 282,10 | 7,50 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 507,17 | 545,00 | 289,44 | 7,46 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 489,17 | 525,56 | 281,11 | 7,44 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 490,66 | 527,13 | 282,48 | 7,43 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 512,76 | 551,50 | 296,08 | 7,56 | 7,31 | 1,68 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 505,60 | 542,12 | 291,39 | 7,22 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 490,20 | 526,52 | 282,93 | 7,41 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 514,00 | 553,17 | 297,34 | 7,62 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 504,71 | 540,11 | 288,36 | 7,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 490,22 | 524,66 | 281,98 | 7,03 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 492,71 | 530,34 | 286,49 | 7,64 | 7,19 | 1,48 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 514,53 | 551,68 | 298,81 | 7,22 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 498,06 | 534,70 | 288,60 | 7,36 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 499,52 | 530,99 | 285,44 | 6,30 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 510,65 | 548,67 | 294,13 | 7,45 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 494,55 | 530,11 | 286,00 | 7,19 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 512,86 | 548,43 | 294,17 | 6,94 | 7,01 | 1,42 |
| 10SK-1-0.3-2 | 500,57 | 535,79 | 289,07 | 7,04 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 494,34 | 529,16 | 285,25 | 7,04 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 511,69 | 546,11 | 292,88 | 6,73 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 499,18 | 534,77 | 287,16 | 7,13 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 491,93 | 527,42 | 283,33 | 7,21 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 490,69 | 524,92 | 281,72 | 6,98 | 6,98 | 1,21 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 498,26 | 533,10 | 286,78 | 6,99 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 502,99 | 538,09 | 288,58 | 6,98 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 488,00 | 520,87 | 277,72 | 6,74 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 495,34 | 530,00 | 287,66 | 7,00 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 500,10 | 536,22 | 289,53 | 7,22 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 498,96 | 533,02 | 286,89 | 6,83 | 6,92 | 1,03 |
| 10SK-2-0.3-2 | 499,19 | 533,81 | 289,08 | 6,94 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 508,35 | 543,89 | 292,70 | 6,99 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 500,11 | 532,02 | 290,00 | 6,38 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 495,19 | 532,17 | 288,23 | 7,47 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 507,18 | 542,13 | 292,68 | 6,89 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 489,01 | 515,55 | 278,14 | 5,43 | 6,86 | 1,51 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 492,55 | 526,85 | 283,88 | 6,96 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 507,54 | 543,00 | 292,93 | 6,99 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 484,12 | 517,38 | 280,97 | 6,87 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 490,48 | 529,03 | 289,17 | 7,86 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 507,17 | 542,98 | 294,90 | 7,06 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 493,92 | 525,29 | 285,62 | 6,35 | 6,38 | 1,33 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 495,50 | 527,24 | 286,67 | 6,41 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 501,21 | 533,17 | 288,90 | 6,38 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 493,20 | 521,11 | 281,13 | 5,66 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 494,52 | 527,38 | 285,10 | 6,64 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 500,18 | 534,46 | 289,24 | 6,85 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 504,99 | 534,67 | 290,93 | 5,88 | 5,87 | 1,66 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 495,55 | 524,64 | 284,13 | 5,87 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 510,46 | 540,44 | 293,07 | 5,87 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 501,96 | 534,12 | 289,90 | 6,41 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 496,90 | 522,51 | 281,41 | 5,15 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 507,40 | 538,13 | 290,11 | 6,06 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 495,26 | 527,58 | 287,87 | 6,53 | 5,76 | 1,73 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 510,16 | 538,90 | 293,66 | 5,63 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 499,17 | 530,24 | 289,39 | 6,22 | | |

**Çizelge A.6 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | $A_b$ (su emme oranı) (%) Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.5SK-2-0.3-4 | 510,41 | 536,55 | 293,98 | 5,12 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 508,16 | 536,09 | 291,43 | 5,50 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 500,41 | 528,26 | 290,86 | 5,57 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 503,80 | 532,02 | 288,90 | 5,60 | 5,48 | 1,68 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 510,54 | 538,67 | 292,89 | 5,51 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 495,09 | 523,95 | 285,56 | 5,83 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 505,66 | 532,17 | 289,96 | 5,24 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 509,54 | 538,14 | 288,11 | 5,61 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 495,80 | 520,98 | 282,17 | 5,08 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 500,74 | 542,66 | 289,18 | 8,37 | 8,00 | 1,46 |
| 15SK-1-0.3-2 | 480,83 | 520,24 | 278,40 | 8,20 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 468,08 | 504,39 | 269,65 | 7,76 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 501,60 | 542,41 | 289,96 | 8,14 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 485,33 | 522,47 | 281,66 | 7,65 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 470,19 | 507,35 | 272,18 | 7,90 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 505,26 | 542,18 | 288,47 | 7,31 | 7,76 | 1,74 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 487,19 | 525,61 | 281,09 | 7,89 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 490,23 | 528,12 | 282,10 | 7,73 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 505,15 | 543,80 | 289,45 | 7,65 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 485,88 | 525,93 | 278,96 | 8,24 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 491,96 | 530,17 | 282,17 | 7,77 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 506,97 | 541,99 | 288,08 | 6,91 | 7,55 | 1,34 |
| 15SK-2-0.3-2 | 501,60 | 540,12 | 290,39 | 7,68 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 489,24 | 526,52 | 281,93 | 7,62 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 512,76 | 551,67 | 295,14 | 7,59 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 503,60 | 542,12 | 290,39 | 7,65 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 488,19 | 526,52 | 280,89 | 7,85 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 496,61 | 529,46 | 284,64 | 6,61 | 7,31 | 1,05 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 510,67 | 550,16 | 294,81 | 7,73 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 503,88 | 536,72 | 289,60 | 6,52 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 491,13 | 528,31 | 285,55 | 7,57 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 510,28 | 550,37 | 294,81 | 7,86 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 495,17 | 532,73 | 285,69 | 7,59 | | |
| | | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 471,96 | 515,74 | 101,8 | 9,28 | 9,14 | 1,49 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 484,55 | 529,18 | 105,9 | 9,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 482,35 | 525,44 | 105,74 | 8,93 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 471,57 | 516,13 | 106,8 | 9,45 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 486,14 | 530,55 | 105,96 | 9,14 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 480,86 | 523,32 | 101,61 | 8,83 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 503,97 | 542,29 | 228,47 | 7,60 | 7,65 | 1,10 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 501,41 | 544,02 | 241,09 | 8,50 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 486,18 | 517,50 | 242,10 | 6,44 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 511,56 | 556,07 | 239,45 | 8,70 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 503,44 | 537,16 | 238,96 | 6,70 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 485,21 | 523,78 | 232,17 | 7,95 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 503,80 | 532,02 | 288,90 | 5,60 | 5,48 | 1,68 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 510,54 | 538,67 | 292,89 | 5,51 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 495,09 | 523,95 | 285,56 | 5,83 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 505,66 | 532,17 | 289,96 | 5,24 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 509,54 | 538,14 | 288,11 | 5,61 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 495,80 | 520,98 | 282,17 | 5,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 511,35 | 547,66 | 137,29 | 7,10 | 7,04 | 1,75 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 476,15 | 509,31 | 134,92 | 6,96 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 477,2 | 513,11 | 139,15 | 7,53 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 514,49 | 549,17 | 139,16 | 6,74 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 478,68 | 510,34 | 136,88 | 6,61 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 478,29 | 513,19 | 130,27 | 7,30 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 479,94 | 516,74 | 80,39 | 7,67 | 8,27 | 0,99 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 478,96 | 516,47 | 102,25 | 7,83 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 485,39 | 529,04 | 116,2 | 8,99 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 476,17 | 515,02 | 81,17 | 8,16 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 475,09 | 514,56 | 103,46 | 8,31 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 485,21 | 527,11 | 117,28 | 8,64 | | |

**Çizelge A.7 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait su emme deney sonuçları.

| Numune kodu | Kuru numune kütlesi ($m_d$) (g) | Doymuş numune kütlesi ($m_{sn}$) (g) | Su içerisine batırılmış numune kütlesi ($m_s$) (g) | $A_b$ (su emme oranı) (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 29,36 | 49,53 | 16,21 | 68,70 | 69,63 | 1,16 |
| SK-20/100-0.5-2 | 28,19 | 48,10 | 17,25 | 70,63 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 29,05 | 48,35 | 17,33 | 66,44 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 28,82 | 48,67 | 16,42 | 68,88 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 28,41 | 48,34 | 16,72 | 70,15 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 28,21 | 48,80 | 16,15 | 72,99 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 35,82 | 58,24 | 20,33 | 62,59 | 66,09 | 1,14 |
| SK-25/100-0.5-2 | 34,17 | 58,75 | 19,11 | 71,93 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 34,75 | 58,62 | 22,28 | 68,69 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 35,94 | 57,78 | 20,62 | 60,77 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 35,86 | 59,40 | 19,29 | 65,64 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 35,68 | 59,55 | 19,91 | 66,90 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 50,01 | 80,32 | 14,28 | 60,61 | 59,15 | 1,46 |
| SK-33/100-0.5-2 | 49,98 | 80,40 | 13,97 | 60,86 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 49,85 | 80,79 | 13,81 | 62,07 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 50,22 | 80,06 | 14,12 | 59,42 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 51,17 | 80,16 | 14,39 | 56,65 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 51,76 | 80,38 | 14,44 | 55,29 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 65,76 | 101,14 | 9,75 | 53,80 | 54,04 | 1,66 |
| SK-50/100-0.5-2 | 66,01 | 102,59 | 9,36 | 55,42 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 66,89 | 102,86 | 9,89 | 53,77 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 65,12 | 99,90 | 10,12 | 53,41 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 65,00 | 101,35 | 10,17 | 55,92 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 67,34 | 102,32 | 9,81 | 51,95 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 88,00 | 132,27 | 29,00 | 50,31 | 48,02 | 1,10 |
| SK-100/100-0.5-2 | 87,82 | 130,01 | 26,84 | 48,04 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 87,35 | 131,16 | 28,21 | 50,15 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 89,90 | 128,00 | 27,15 | 42,38 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 89,26 | 133,13 | 26,83 | 49,15 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 88,77 | 131,45 | 28,86 | 48,08 | | |
| SK-20/100-0-1 | 234,79 | 300,40 | 132,73 | 27,94 | 28,69 | 1,68 |
| SK-20/100-0-2 | 232,14 | 300,15 | 130,86 | 29,30 | | |
| SK-20/100-0-3 | 232,35 | 299,78 | 130,84 | 29,02 | | |
| SK-20/100-0-4 | 233,56 | 300,91 | 133,89 | 28,84 | | |
| SK-20/100-0-5 | 233,18 | 300,69 | 133,55 | 28,95 | | |
| SK-20/100-0-6 | 234,08 | 299,90 | 133,01 | 28,12 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 67,38 | 109,40 | 19,09 | 62,36 | 63,68 | 1,53 |
| SK-20/100-0.25-2 | 65,76 | 109,14 | 18,00 | 65,97 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 66,23 | 110,06 | 18,75 | 66,18 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 67,96 | 109,11 | 18,01 | 60,55 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 67,01 | 110,29 | 20,12 | 64,59 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 67,22 | 109,20 | 18,05 | 62,45 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 29,36 | 49,53 | 16,21 | 68,70 | 69,63 | 1,16 |
| SK-20/100-0.5-2 | 28,19 | 48,10 | 17,25 | 70,63 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 29,05 | 48,35 | 17,33 | 66,44 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 28,82 | 48,67 | 16,42 | 68,88 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 28,41 | 48,34 | 16,72 | 70,15 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 28,21 | 48,80 | 16,15 | 72,99 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 50,01 | 88,83 | 17,33 | 77,62 | 74,75 | 1,68 |
| SK-20/100-1.0-2 | 50,72 | 86,19 | 14,97 | 69,93 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 50,13 | 88,01 | 15,14 | 75,56 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 50,74 | 87,78 | 15,01 | 73,00 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 50,93 | 89,14 | 16,92 | 75,02 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 50,34 | 89,29 | 18,73 | 77,37 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 48,02 | 85,54 | 16,42 | 78,13 | 79,32 | 1,65 |
| SK-20/100-1.5-2 | 48,18 | 86,36 | 16,00 | 79,24 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 48,45 | 85,11 | 15,21 | 75,67 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 47,90 | 86,03 | 15,02 | 79,60 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 47,50 | 86,29 | 15,76 | 81,66 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 47,86 | 86,91 | 15,03 | 81,59 | | |

**Çizelge A.8 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kompasite ve porozite deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık (ρ) ($g/cm^3$) | Özgül kütle (ρr) ($g/cm^3$) | Kompasite (%) | Porozite (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 2,01 | 2,61 | 76,92 | 23,08 | 23,08 | 0,00 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 2,00 | 2,59 | 77,22 | 22,78 | 22,90 | 1,47 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 2,01 | 2,60 | 77,22 | 22,78 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 2,01 | 2,61 | 77,01 | 22,99 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 2,02 | 2,59 | 77,99 | 22,01 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 2,01 | 2,60 | 77,31 | 22,69 | 22,50 | 1,68 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 2,01 | 2,59 | 77,61 | 22,39 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 2,01 | 2,59 | 77,61 | 22,39 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 2,01 | 2,62 | 76,86 | 23,14 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 2,01 | 2,59 | 77,61 | 22,39 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 2,02 | 2,59 | 77,99 | 22,01 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 2,01 | 2,58 | 77,85 | 22,15 | 22,25 | 1,68 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 2,01 | 2,59 | 77,61 | 22,39 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 2,01 | 2,59 | 77,61 | 22,39 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 1,99 | 2,59 | 76,83 | 23,17 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 2,01 | 2,58 | 77,91 | 22,09 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 2,03 | 2,58 | 78,68 | 21,32 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 2,02 | 2,61 | 77,39 | 22,61 | 22,52 | 0,70 |
| 10SK-1-0.3-2 | 2,03 | 2,61 | 77,78 | 22,22 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 2,03 | 2,62 | 77,48 | 22,52 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 2,02 | 2,61 | 77,39 | 22,61 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 2,02 | 2,61 | 77,34 | 22,66 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 2,03 | 2,62 | 77,48 | 22,52 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 2,02 | 2,60 | 77,69 | 22,31 | 22,30 | 1,20 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 2,02 | 2,60 | 77,69 | 22,31 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 2,02 | 2,61 | 77,39 | 22,61 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 2,03 | 2,61 | 77,78 | 22,22 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 2,04 | 2,61 | 78,16 | 21,84 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 2,03 | 2,62 | 77,48 | 22,52 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 2,03 | 2,61 | 77,78 | 22,22 | 22,17 | 0,60 |
| 10SK-2-0.3-2 | 2,04 | 2,62 | 77,86 | 22,14 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 2,02 | 2,60 | 77,69 | 22,31 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 2,03 | 2,60 | 78,08 | 21,92 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 2,03 | 2,61 | 77,78 | 22,22 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 2,03 | 2,61 | 77,78 | 22,22 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 2,03 | 2,60 | 78,08 | 21,92 | 21,84 | 0,95 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 2,03 | 2,60 | 78,08 | 21,92 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 2,03 | 2,61 | 77,93 | 22,07 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 2,05 | 2,61 | 78,54 | 21,46 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 2,04 | 2,61 | 78,16 | 21,84 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 2,04 | 2,61 | 78,16 | 21,84 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 2,06 | 2,62 | 78,63 | 21,37 | 21,47 | 1,25 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 2,06 | 2,62 | 78,63 | 21,37 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 2,05 | 2,61 | 78,54 | 21,46 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 2,06 | 2,61 | 78,93 | 21,07 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 2,04 | 2,61 | 78,31 | 21,69 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 2,04 | 2,61 | 78,16 | 21,84 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 2,07 | 2,63 | 78,71 | 21,29 | 21,29 | 0,52 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 2,06 | 2,61 | 78,93 | 21,07 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 2,06 | 2,62 | 78,69 | 21,31 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 2,06 | 2,62 | 78,63 | 21,37 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 2,06 | 2,62 | 78,63 | 21,37 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 2,07 | 2,63 | 78,71 | 21,29 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 2,07 | 2,64 | 78,53 | 21,47 | 21,20 | 0,76 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 2,06 | 2,61 | 78,93 | 21,07 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 2,06 | 2,61 | 78,93 | 21,07 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 2,06 | 2,61 | 78,93 | 21,07 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 2,08 | 2,64 | 78,79 | 21,21 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 2,07 | 2,63 | 78,71 | 21,29 | | |

**Çizelge A.8 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait kompasite ve porozite deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık (ρ) ($g/cm^3$) | Özgül kütle (ρr) ($g/cm^3$) | Kompasite (%) | Porozite (%) Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 2,07 | 2,61 | 79,31 | 20,69 | 21,00 | 0,94 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 2,08 | 2,63 | 79,09 | 20,91 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 2,08 | 2,63 | 79,03 | 20,97 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 2,07 | 2,62 | 79,01 | 20,99 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 2,08 | 2,64 | 78,79 | 21,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 2,08 | 2,64 | 78,79 | 21,21 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | 23,85 | 0,43 |
| 15SK-1-0.3-2 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 2,00 | 2,63 | 76,05 | 23,95 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 1,99 | 2,62 | 76,10 | 23,90 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 2,00 | 2,63 | 76,05 | 23,95 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | 23,76 | 0,45 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 1,99 | 2,62 | 76,04 | 23,96 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 1,99 | 2,61 | 76,25 | 23,75 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 2,00 | 2,62 | 76,34 | 23,66 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 2,00 | 2,62 | 76,34 | 23,66 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 2,01 | 2,63 | 76,43 | 23,57 | 23,45 | 0,42 |
| 15SK-2-0.3-2 | 2,01 | 2,63 | 76,43 | 23,57 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 2,00 | 2,61 | 76,63 | 23,37 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 2,00 | 2,61 | 76,63 | 23,37 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 2,00 | 2,61 | 76,63 | 23,37 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 1,99 | 2,60 | 76,54 | 23,46 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 2,00 | 2,61 | 76,63 | 23,37 | 23,30 | 1,17 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 2,00 | 2,61 | 76,57 | 23,43 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 2,00 | 2,62 | 76,34 | 23,66 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 2,02 | 2,62 | 77,10 | 22,90 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 2,00 | 2,60 | 76,92 | 23,08 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 2,00 | 2,61 | 76,63 | 23,37 | | |
| | | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 1,14 | 2,63 | 43,35 | 56,65 | 56,65 | 0,17 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 1,14 | 2,63 | 43,35 | 56,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 1,15 | 2,65 | 43,48 | 56,52 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 1,15 | 2,65 | 43,40 | 56,60 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 1,14 | 2,64 | 43,18 | 56,82 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 1,14 | 2,63 | 43,35 | 56,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 1,39 | 2,63 | 52,85 | 47,15 | 46,96 | 0,61 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 1,39 | 2,63 | 52,85 | 47,15 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 1,39 | 2,63 | 52,85 | 47,15 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 1,39 | 2,63 | 52,85 | 47,15 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 1,41 | 2,64 | 53,41 | 46,59 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 1,41 | 2,64 | 53,41 | 46,59 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 2,07 | 2,61 | 79,31 | 20,69 | 21,00 | 0,94 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 2,08 | 2,63 | 79,09 | 20,91 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 2,08 | 2,63 | 79,03 | 20,97 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 2,07 | 2,62 | 79,01 | 20,99 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 2,08 | 2,64 | 78,79 | 21,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 2,08 | 2,64 | 78,79 | 21,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 1,27 | 2,53 | 50,20 | 49,80 | 48,94 | 1,14 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 1,30 | 2,55 | 50,98 | 49,02 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 1,30 | 2,55 | 50,98 | 49,02 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 1,29 | 2,54 | 50,89 | 49,11 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 1,31 | 2,54 | 51,57 | 48,43 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 1,32 | 2,55 | 51,76 | 48,24 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 1,10 | 2,65 | 41,51 | 58,49 | 57,04 | 1,47 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 1,16 | 2,65 | 43,77 | 56,23 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 1,19 | 2,68 | 44,40 | 55,60 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 1,10 | 2,66 | 41,43 | 58,57 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 1,14 | 2,70 | 42,22 | 57,78 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 1,20 | 2,70 | 44,44 | 55,56 | | |

**Çizelge A.9 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait kompasite ve porozite deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık (ρ) ($g/cm^3$) | Özgül kütle (ρr) ($g/cm^3$) | Kompasite (%) | Porozite (%) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 0,51 | 2,20 | 23,18 | 76,82 | 76,80 | 0,39 |
| SK-20/100-0.5-2 | 0,52 | 2,21 | 23,53 | 76,47 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 0,52 | 2,21 | 23,53 | 76,47 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 0,51 | 2,20 | 23,18 | 76,82 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 0,51 | 2,21 | 23,08 | 76,92 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 0,50 | 2,20 | 22,73 | 77,27 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 0,55 | 2,00 | 27,50 | 72,50 | 72,72 | 0,68 |
| SK-25/100-0.5-2 | 0,53 | 2,01 | 26,37 | 73,63 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 0,55 | 1,99 | 27,64 | 72,36 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 0,56 | 2,02 | 27,72 | 72,28 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 0,55 | 2,02 | 27,30 | 72,70 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 0,54 | 1,99 | 27,14 | 72,86 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 0,59 | 2,03 | 29,06 | 70,94 | 70,62 | 0,28 |
| SK-33/100-0.5-2 | 0,59 | 2,01 | 29,29 | 70,71 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 0,59 | 2,02 | 29,28 | 70,72 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 0,59 | 2,00 | 29,50 | 70,50 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 0,60 | 2,03 | 29,56 | 70,44 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 0,60 | 2,03 | 29,56 | 70,44 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 0,64 | 2,03 | 31,53 | 68,47 | 68,47 | 0,51 |
| SK-50/100-0.5-2 | 0,63 | 2,02 | 31,19 | 68,81 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 0,65 | 2,04 | 31,86 | 68,14 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 0,65 | 2,05 | 31,71 | 68,29 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 0,63 | 2,03 | 31,03 | 68,97 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 0,65 | 2,04 | 31,86 | 68,14 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 0,85 | 2,36 | 36,02 | 63,98 | 64,01 | 0,38 |
| SK-100/100-0.5-2 | 0,85 | 2,36 | 36,02 | 63,98 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 0,85 | 2,35 | 36,17 | 63,83 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 0,85 | 2,37 | 35,86 | 64,14 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 0,84 | 2,36 | 35,59 | 64,41 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 0,86 | 2,37 | 36,29 | 63,71 | | |
| SK-20/100-0-1 | 1,29 | 2,26 | 57,08 | 42,92 | 43,72 | 1,10 |
| SK-20/100-0-2 | 1,28 | 2,28 | 56,14 | 43,86 | | |
| SK-20/100-0-3 | 1,28 | 2,28 | 56,14 | 43,86 | | |
| SK-20/100-0-4 | 1,30 | 2,30 | 56,52 | 43,48 | | |
| SK-20/100-0-5 | 1,28 | 2,28 | 56,14 | 43,86 | | |
| SK-20/100-0-6 | 1,28 | 2,30 | 55,65 | 44,35 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 0,60 | 2,16 | 27,78 | 72,22 | 72,31 | 0,37 |
| SK-20/100-0.25-2 | 0,61 | 2,18 | 27,98 | 72,02 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 0,59 | 2,16 | 27,31 | 72,69 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 0,61 | 2,18 | 27,98 | 72,02 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 0,60 | 2,18 | 27,59 | 72,41 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 0,60 | 2,18 | 27,52 | 72,48 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 0,51 | 2,20 | 23,18 | 76,82 | 76,80 | 0,39 |
| SK-20/100-0.5-2 | 0,52 | 2,21 | 23,53 | 76,47 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 0,52 | 2,21 | 23,53 | 76,47 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 0,51 | 2,20 | 23,18 | 76,82 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 0,51 | 2,21 | 23,08 | 76,92 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 0,50 | 2,20 | 22,73 | 77,27 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 0,48 | 2,36 | 20,34 | 79,66 | 79,69 | 0,11 |
| SK-20/100-1.0-2 | 0,49 | 2,40 | 20,42 | 79,58 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 0,48 | 2,38 | 20,17 | 79,83 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 0,48 | 2,37 | 20,25 | 79,75 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 0,48 | 2,36 | 20,34 | 79,66 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 0,48 | 2,36 | 20,34 | 79,66 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 0,46 | 2,70 | 17,04 | 82,96 | 82,66 | 0,41 |
| SK-20/100-1.5-2 | 0,46 | 2,68 | 17,16 | 82,84 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 0,48 | 2,68 | 17,91 | 82,09 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 0,46 | 2,68 | 17,16 | 82,84 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 0,47 | 2,67 | 17,60 | 82,40 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 0,46 | 2,68 | 17,16 | 82,84 | | |

**Çizelge A.10 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait ultrases hızı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune uzunluğu (mm) | Ses geçiş süresi (µs ) | Ultrases hızı (km/s) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 160,00 | 63,44 | 2,52 | 2,51 | 0,85 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 160,05 | 62,99 | 2,54 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 160,07 | 64,16 | 2,49 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 160,08 | 64,42 | 2,48 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 160,00 | 63,35 | 2,53 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 159,99 | 64,00 | 2,50 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 160,00 | 60,85 | 2,63 | 2,63 | 1,13 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 159,95 | 61,01 | 2,62 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 159,87 | 62,06 | 2,58 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 159,82 | 61,15 | 2,61 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 160,00 | 60,18 | 2,66 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 159,99 | 60,33 | 2,65 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 159,97 | 59,22 | 2,70 | 2,73 | 1,45 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 159,91 | 59,47 | 2,69 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 160,00 | 58,67 | 2,73 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 159,94 | 58,56 | 2,73 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 159,92 | 57,12 | 2,80 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 160,00 | 58,10 | 2,75 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 159,82 | 55,98 | 2,85 | 2,84 | 119 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 160,07 | 57,16 | 2,80 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 160,00 | 56,40 | 2,84 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 160,08 | 56,88 | 2,81 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 160,00 | 54,13 | 2,96 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 159,97 | 57,51 | 2,78 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 160,07 | 55,19 | 2,90 | 2,80 | 1,62 |
| 10SK-1-0.3-2 | 160,00 | 56,81 | 2,82 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 159,97 | 58,89 | 2,72 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 159,82 | 57,07 | 2,80 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 160,08 | 56,15 | 2,85 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 160,00 | 58,91 | 2,72 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 159,97 | 57,12 | 2,80 | 2,86 | 1,17 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 160,08 | 57,94 | 2,76 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 159,82 | 55,13 | 2,90 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 160,05 | 54,88 | 2,92 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 160,08 | 55,19 | 2,90 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 160,00 | 55,82 | 2,87 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 160,05 | 53,26 | 3,01 | 2,90 | 1,64 |
| 10SK-2-0.3-2 | 160,00 | 57,81 | 2,77 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 159,82 | 55,53 | 2,88 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 159,97 | 56,00 | 2,86 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 159,91 | 54,90 | 2,91 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 160,05 | 54,18 | 2,95 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 159,97 | 53,53 | 2,99 | 2,94 | 1,22 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 160,00 | 55,67 | 2,87 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 160,05 | 53,78 | 2,98 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 159,82 | 52,89 | 3,02 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 160,00 | 55,16 | 2,90 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 159,82 | 55,71 | 2,87 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 159,97 | 56,12 | 2,85 | 2,90 | 1,59 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 160,00 | 54,85 | 2,92 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 159,91 | 54,25 | 2,95 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 160,00 | 55,98 | 2,86 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 159,91 | 54,11 | 2,96 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 160,00 | 55,74 | 2,87 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 159,82 | 56,71 | 2,82 | 2,93 | 1,71 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 160,00 | 54,80 | 2,92 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 160,05 | 53,16 | 3,01 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 160,00 | 55,91 | 2,86 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 160,00 | 54,62 | 2,93 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 159,82 | 52,74 | 3,03 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 159,50 | 53,10 | 3,00 | 2,96 | 1,26 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 160,00 | 55,60 | 2,88 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 160,05 | 56,98 | 2,81 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 160,00 | 53,06 | 3,02 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 159,95 | 54,10 | 2,96 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 160,00 | 52,12 | 3,07 | | |

**Çizelge A.10 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait ultrases hızı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune uzunluğu (mm) | Ses geçiş süresi (µs ) | Ultrases hızı (km/s) Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 159,82 | 51,16 | 3,12 | 3,13 | 1,73 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 160,05 | 49,88 | 3,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 159,91 | 48,66 | 3,29 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 160,05 | 51,21 | 3,13 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 160,00 | 51,84 | 3,09 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 159,97 | 54,73 | 2,92 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 160,05 | 65,09 | 2,46 | 2,46 | 1,79 |
| 15SK-1-0.3-2 | 159,90 | 68,00 | 2,35 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 159,82 | 66,55 | 2,40 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 159,97 | 65,41 | 2,45 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 160,05 | 64,49 | 2,48 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 160,00 | 60,92 | 2,63 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 160,00 | 61,16 | 2,62 | 2,67 | 1,68 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 159,94 | 60,45 | 2,65 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 160,00 | 60,94 | 2,63 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 160,05 | 59,90 | 2,67 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 159,82 | 58,33 | 2,74 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 159,91 | 58,56 | 2,73 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 160,08 | 59,00 | 2,71 | 2,80 | 1,56 |
| 15SK-2-0.3-2 | 160,00 | 59,91 | 2,67 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 159,82 | 57,78 | 2,77 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 159,97 | 54,02 | 2,96 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 160,00 | 58,91 | 2,72 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 160,08 | 54,24 | 2,95 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 160,00 | 55,15 | 2,90 | 2,86 | 1,70 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 160,05 | 55,29 | 2,89 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 159,92 | 54,98 | 2,91 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 159,97 | 57,21 | 2,80 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 160,05 | 56,18 | 2,85 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 160,00 | 57,42 | 2,79 | | |
| | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 160,00 | 85,00 | 1,88 | 1,90 | 1,14 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 159,97 | 82,36 | 1,94 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 160,00 | 84,25 | 1,90 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 160,05 | 83,89 | 1,91 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 160,08 | 84,97 | 1,88 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 159,82 | 83,98 | 1,90 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 160,00 | 63,29 | 2,53 | 2,58 | 1,68 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 159,91 | 60,38 | 2,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 160,08 | 64,39 | 2,49 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 160,00 | 61,10 | 2,62 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 159,82 | 60,21 | 2,65 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 160,05 | 62,68 | 2,55 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 160,00 | 51,16 | 3,13 | 3,13 | 1,73 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 159,97 | 49,88 | 3,21 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 160,00 | 48,66 | 3,29 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 160,05 | 51,21 | 3,13 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 160,08 | 51,84 | 3,09 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 159,92 | 54,73 | 2,92 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 160,00 | 66,47 | 2,35 | 2,33 | 1,76 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 159,97 | 68,15 | 2,44 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 160,08 | 65,67 | 2,45 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 160,08 | 65,33 | 2,42 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 159,82 | 66,23 | 2,43 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 160,05 | 65,9 | 1,92 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 160,00 | 83,25 | 1,92 | 1,95 | 0,97 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 159,97 | 81,1 | 1,97 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 159,93 | 81,73 | 1,96 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 160,08 | 83,08 | 1,93 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 159,97 | 82,00 | 1,95 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 159,86 | 82,21 | 1,94 | | |

**Çizelge A.11 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ultrases hızı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune uzunluğu (mm) | Ses geçiş süresi (µs ) | Ultrases hızı (km/s) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 160,00 | 128,03 | 1,25 | 1,25 | 0,69 |
| SK-20/100-0.5-2 | 159,95 | 127,16 | 1,26 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 159,87 | 127,52 | 1,25 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 159,82 | 126,98 | 1,26 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 160,00 | 129,05 | 1,24 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 159,99 | 129,12 | 1,24 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 159,97 | 125,11 | 1,28 | 1,28 | 0,81 |
| SK-25/100-0.5-2 | 159,97 | 126,82 | 1,26 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 160,07 | 125,71 | 1,27 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 160,00 | 124,00 | 1,29 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 159,97 | 125,56 | 1,27 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 159,82 | 124,23 | 1,29 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 160,08 | 120,18 | 1,33 | 1,32 | 0,52 |
| SK-33/100-0.5-2 | 160,00 | 121,34 | 1,32 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 160,00 | 121,48 | 1,32 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 160,05 | 120,92 | 1,32 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 160,07 | 120,71 | 1,33 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 160,08 | 121,94 | 1,31 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 159,99 | 112,23 | 1,43 | 1,44 | 1,16 |
| SK-50/100-0.5-2 | 160,00 | 111,46 | 1,44 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 159,97 | 112,73 | 1,42 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 160,08 | 111,91 | 1,43 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 159,82 | 109,07 | 1,47 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 160,05 | 110,62 | 1,45 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 160,08 | 100,85 | 1,59 | 1,60 | 0,86 |
| SK-100/100-0.5-2 | 159,82 | 100,56 | 1,59 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 159,97 | 99,34 | 1,61 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 159,91 | 98,61 | 1,62 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 160,05 | 99,42 | 1,61 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 159,97 | 100,32 | 1,59 | | |
| SK-20/100-0-1 | 159,82 | 83,02 | 1,93 | 1,95 | 0,87 |
| SK-20/100-0-2 | 160,00 | 82,46 | 1,94 | | |
| SK-20/100-0-3 | 159,82 | 81,40 | 1,96 | | |
| SK-20/100-0-4 | 159,97 | 81,61 | 1,96 | | |
| SK-20/100-0-5 | 160,00 | 82,94 | 1,93 | | |
| SK-20/100-0-6 | 159,91 | 81,62 | 1,96 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 160,00 | 114,74 | 1,39 | 1,41 | 0,68 |
| SK-20/100-0.25-2 | 159,82 | 112,87 | 1,42 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 160,07 | 112,46 | 1,42 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 160,00 | 113,12 | 1,41 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 160,08 | 113,58 | 1,41 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 160,05 | 113,29 | 1,41 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 160,00 | 128,03 | 1,25 | 1,25 | 0,69 |
| SK-20/100-0.5-2 | 159,95 | 127,16 | 1,26 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 159,87 | 127,52 | 1,25 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 159,82 | 126,98 | 1,26 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 160,00 | 129,05 | 1,24 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 159,99 | 129,12 | 1,24 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 160,05 | 173,16 | 0,92 | 0,91 | 0,71 |
| SK-20/100-1.0-2 | 160,00 | 175,39 | 0,91 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 160,00 | 174,32 | 0,92 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 159,82 | 174,87 | 0,91 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 160,01 | 174,82 | 0,92 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 160,03 | 176,93 | 0,90 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 160,07 | 245,72 | 0,65 | 0,65 | 0,40 |
| SK-20/100-1.5-2 | 160,00 | 246,80 | 0,65 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 160,05 | 248,27 | 0,64 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 159,91 | 246,85 | 0,65 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 160,00 | 248,29 | 0,64 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 159,94 | 247,11 | 0,65 | | |

**Çizelge A.12 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait elastiklik modülü deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | Ultrases hızı (km/s) | Elastiklik modülü (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 2,01 | 2,52 | 12764 | 12612 | 1,36 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 2,00 | 2,54 | 12903 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 2,00 | 2,49 | 12400 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 2,00 | 2,48 | 12301 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 2,00 | 2,53 | 12802 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 2,00 | 2,50 | 12500 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 2,00 | 2,63 | 13834 | 13818 | 1,40 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 2,01 | 2,62 | 13797 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 2,00 | 2,58 | 13313 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 1,99 | 2,61 | 13556 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 2,01 | 2,66 | 14222 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 2,02 | 2,65 | 14185 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 2,01 | 2,70 | 14653 | 15032 | 1,23 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 2,01 | 2,69 | 14545 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 2,01 | 2,73 | 14980 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 2,01 | 2,73 | 14980 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 2,01 | 2,80 | 15758 | | |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 2,02 | 2,75 | 15276 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 2,01 | 2,85 | 16326 | 16218 | 1,11 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 2,01 | 2,80 | 15758 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 2,01 | 2,84 | 16212 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 1,99 | 2,81 | 15713 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 2,01 | 2,96 | 17611 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 2,03 | 2,78 | 15689 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 2,02 | 2,90 | 16988 | 15902 | 1,25 |
| 10SK-1-0.3-2 | 2,03 | 2,82 | 16143 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 2,03 | 2,72 | 15019 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 2,02 | 2,80 | 15837 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 2,02 | 2,85 | 16407 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 2,03 | 2,72 | 15019 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 2,02 | 2,80 | 15837 | 16566 | 1,18 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 2,02 | 2,76 | 15388 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 2,02 | 2,90 | 16988 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 2,03 | 2,92 | 17309 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 2,04 | 2,90 | 17156 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 2,03 | 2,87 | 16721 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 2,03 | 3,01 | 18392 | 17043 | 1,07 |
| 10SK-2-0.3-2 | 2,04 | 2,77 | 15653 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 2,02 | 2,88 | 16755 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 2,03 | 2,86 | 16605 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 2,03 | 2,91 | 17190 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 2,03 | 2,95 | 17666 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 2,03 | 2,99 | 18148 | 17592 | 1,04 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 2,03 | 2,87 | 16721 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 2,03 | 2,98 | 18027 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 2,05 | 3,02 | 18697 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 2,04 | 2,90 | 17156 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 2,04 | 2,87 | 16803 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 2,06 | 2,85 | 16732 | 17277 | 1,14 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 2,06 | 2,92 | 17564 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 2,05 | 2,95 | 17840 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 2,06 | 2,86 | 16850 | | |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 2,04 | 2,96 | 17874 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 2,04 | 2,87 | 16803 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 2,07 | 2,82 | 16461 | 17705 | 1,12 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 2,06 | 2,92 | 17564 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 2,06 | 3,01 | 18664 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 2,06 | 2,86 | 16850 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 2,06 | 2,93 | 17685 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 2,07 | 3,03 | 19004 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 2,07 | 3,00 | 18630 | 18084 | 1,42 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 2,06 | 2,88 | 17086 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 2,06 | 2,81 | 16266 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 2,06 | 3,02 | 18788 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 2,08 | 2,96 | 18224 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 2,07 | 3,07 | 19510 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 2,07 | 3,12 | 20150 | 20329 | 1,56 |

**Çizelge A.12 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait elastiklik modülü deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | Ultrases hızı (km/s) | Elastiklik modülü (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 2,08 | 3,21 | 21433 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 2,08 | 3,29 | 22514 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 2,07 | 3,13 | 20280 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 2,08 | 3,09 | 19860 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 2,08 | 2,92 | 17735 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 1,99 | 2,46 | 12043 | 12095 | 1,45 |
| 15SK-1-0.3-2 | 1,99 | 2,35 | 10990 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 1,99 | 2,40 | 11462 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 2,00 | 2,45 | 12005 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 1,99 | 2,48 | 12239 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 2,00 | 2,63 | 13834 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 1,99 | 2,62 | 13660 | 14251 | 1,28 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 1,99 | 2,65 | 13975 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 1,99 | 2,63 | 13765 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 1,99 | 2,67 | 14187 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 2,00 | 2,74 | 15015 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 2,00 | 2,73 | 14906 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 2,01 | 2,71 | 14762 | 15679 | 1,33 |
| 15SK-2-0.3-2 | 2,01 | 2,67 | 14329 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 2,00 | 2,77 | 15346 | | |
| 15SK-2-0.3-4 | 2,00 | 2,96 | 17523 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 2,00 | 2,72 | 14797 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 1,99 | 2,95 | 17318 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 2,00 | 2,90 | 16820 | 16352 | 1,23 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 2,00 | 2,89 | 16704 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 2,00 | 2,91 | 16936 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 2,02 | 2,80 | 15837 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 2,00 | 2,85 | 16245 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 2,00 | 2,79 | 15568 | | |
| | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 1,14 | 1,88 | 4029 | 4135 | 0,96 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 1,14 | 1,94 | 4291 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 1,15 | 1,90 | 4152 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 1,15 | 1,91 | 4195 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 1,14 | 1,88 | 4029 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 1,14 | 1,90 | 4115 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 1,39 | 2,53 | 8897 | 9315 | 1,10 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 1,39 | 2,65 | 9761 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 1,39 | 2,49 | 8618 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 1,39 | 2,62 | 9542 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 1,41 | 2,65 | 9902 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 1,41 | 2,55 | 9169 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 2,07 | 3,12 | 20150 | 20329 | 1,56 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 2,08 | 3,21 | 21433 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 2,08 | 3,29 | 22514 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 2,07 | 3,13 | 20280 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 2,08 | 3,09 | 19860 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 2,08 | 2,92 | 17735 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 1,27 | 2,35 | 7014 | 7119 | 0,87 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 1,30 | 2,44 | 7740 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 1,30 | 2,45 | 7803 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 1,29 | 2,42 | 7555 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 1,31 | 2,43 | 7735 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 1,32 | 1,92 | 4866 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 1,10 | 1,92 | 4055 | 4346 | 0,89 |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 1,16 | 1,97 | 4502 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 1,19 | 1,96 | 4572 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 1,10 | 1,93 | 4097 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 1,14 | 1,95 | 4335 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 1,20 | 1,94 | 4516 | | |

**Çizelge A.13 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait elastiklik modülü deney sonuçları.

| Numune kodu | Birim hacim ağırlık ($g/cm^3$) | Ultrases hızı (km/s) | Elastiklik modülü (MPa) | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 0,51 | 1,25 | 797 | 800 | 0,90 |
| SK-20/100-0.5-2 | 0,52 | 1,26 | 826 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 0,52 | 1,25 | 813 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 0,51 | 1,26 | 810 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 0,51 | 1,24 | 784 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 0,50 | 1,24 | 769 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 0,55 | 1,28 | 901 | 891 | 0,78 |
| SK-25/100-0.5-2 | 0,53 | 1,26 | 841 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 0,55 | 1,27 | 887 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 0,56 | 1,29 | 932 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 0,55 | 1,27 | 887 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 0,54 | 1,29 | 899 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 0,59 | 1,33 | 1044 | 1036 | 0,65 |
| SK-33/100-0.5-2 | 0,59 | 1,32 | 1028 | | |
| SK-33/100-0.5-3 | 0,59 | 1,32 | 1028 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 0,59 | 1,32 | 1028 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 0,60 | 1,33 | 1061 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 0,60 | 1,31 | 1030 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 0,64 | 1,43 | 1309 | 1330 | 1,23 |
| SK-50/100-0.5-2 | 0,63 | 1,44 | 1306 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 0,65 | 1,42 | 1311 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 0,65 | 1,43 | 1329 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 0,63 | 1,47 | 1361 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 0,65 | 1,45 | 1367 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 0,85 | 1,59 | 2149 | 2181 | 1,42 |
| SK-100/100-0.5-2 | 0,85 | 1,59 | 2149 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 0,85 | 1,61 | 2203 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 0,85 | 1,62 | 2231 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 0,84 | 1,61 | 2177 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 0,86 | 1,59 | 2174 | | |
| | | | | | |
| SK-20/100-0-1 | 1,29 | 1,93 | 4805 | 4870 | 1,15 |
| SK-20/100-0-2 | 1,28 | 1,94 | 4817 | | |
| SK-20/100-0-3 | 1,28 | 1,96 | 4917 | | |
| SK-20/100-0-4 | 1,30 | 1,96 | 4994 | | |
| SK-20/100-0-5 | 1,28 | 1,93 | 4768 | | |
| SK-20/100-0-6 | 1,28 | 1,96 | 4917 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 0,60 | 1,39 | 1159 | 1196 | 1,22 |
| SK-20/100-0.25-2 | 0,61 | 1,42 | 1230 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 0,59 | 1,42 | 1190 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 0,61 | 1,41 | 1213 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 0,60 | 1,41 | 1193 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 0,60 | 1,41 | 1193 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 0,51 | 1,25 | 797 | 800 | 0,90 |
| SK-20/100-0.5-2 | 0,52 | 1,26 | 826 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 0,52 | 1,25 | 813 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 0,51 | 1,26 | 810 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 0,51 | 1,24 | 784 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 0,50 | 1,24 | 769 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 0,48 | 0,92 | 406 | 402 | 0,96 |
| SK-20/100-1.0-2 | 0,49 | 0,91 | 406 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 0,48 | 0,92 | 406 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 0,48 | 0,91 | 397 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 0,48 | 0,92 | 406 | | |
| SK-20/100-1.0-6 | 0,48 | 0,90 | 389 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 0,46 | 0,65 | 194 | 194 | 0,76 |
| SK-20/100-1.5-2 | 0,46 | 0,65 | 194 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 0,48 | 0,64 | 197 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 0,46 | 0,65 | 194 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 0,47 | 0,64 | 193 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 0,46 | 0,65 | 194 | | |

**Çizelge A.14 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5N-0-0.3-1 | 40,22 | 40,15 | 590 | 1,36 | 1,33 | 1,07 | 4820 | 4810 | 3,00 | 2,99 | 3,02 | 0,80 |
| 7.5N-0-0.3-2 | 40,27 | 40,06 | 550 | 1,28 | | | 4800 | 4850 | 2,98 | 3,01 | | |
| 7.5N-0-0.3-3 | 39,76 | 39,82 | 570 | 1,36 | | | 4860 | 4800 | 3,06 | 3,02 | | |
| 7.5N-0-0.3-4 | 40,12 | 40,15 | 560 | 1,30 | | | 4890 | 4870 | 3,05 | 3,03 | | |
| 7.5N-0-0.3-5 | 39,95 | 40,06 | 560 | 1,31 | | | 4810 | 4850 | 3,01 | 3,04 | | |
| 7.5N-0-0.3-6 | 39,74 | 39,87 | 580 | 1,38 | | | 4800 | 4840 | 3,02 | 3,04 | | |
| 7.5K-0-0.3-1 | 40,15 | 39,80 | 610 | 1,44 | 1,40 | 1,67 | 5320 | 5310 | 3,31 | 3,31 | 3,33 | 0,84 |
| 7.5K-0-0.3-2 | 40,06 | 40,27 | 590 | 1,36 | | | 5300 | 5360 | 3,31 | 3,34 | | |
| 7.5K-0-0.3-3 | 40,27 | 39,87 | 600 | 1,41 | | | 5330 | 5310 | 3,31 | 3,30 | | |
| 7.5K-0-0.3-4 | 39,87 | 40,12 | 620 | 1,45 | | | 5390 | 5370 | 3,38 | 3,37 | | |
| 7.5K-0-0.3-5 | 39,95 | 39,89 | 570 | 1,34 | | | 5350 | 5340 | 3,35 | 3,34 | | |
| 7.5K-0-0.3-6 | 40,19 | 40,05 | 610 | 1,42 | | | 5300 | 5340 | 3,30 | 3,32 | | |
| 7.5SN-1-0.3-1 | 39,74 | 40,05 | 610 | 1,44 | 1,45 | 1,42 | 5990 | 5990 | 3,77 | 3,77 | 3,75 | |
| 7.5SN-1-0.3-2 | 40,27 | 39,82 | 650 | 1,53 | | | 5970 | 5980 | 3,71 | 3,71 | | 0,92 |
| 7.5SN-1-0.3-3 | 40,05 | 40,15 | 600 | 1,39 | | | 6030 | 6060 | 3,76 | 3,78 | | |
| 7.5SN-1-0.3-4 | 40,22 | 39,91 | 620 | 1,45 | | | 5980 | 5990 | 3,72 | 3,72 | | |
| 7.5SN-1-0.3-5 | 40,27 | 40,28 | 610 | 1,40 | | | 6020 | 6000 | 3,74 | 3,72 | | |
| 7.5SN-1-0.3-6 | 39,76 | 40,15 | 630 | 1,47 | | | 6050 | 6040 | 3,80 | 3,80 | | |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 40,28 | 39,74 | 740 | 1,74 | 1,75 | 1,32 | 9280 | 9260 | 5,76 | 5,75 | 5,78 | 0,56 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 39,90 | 39,82 | 740 | 1,75 | | | 9280 | 9290 | 5,81 | 5,82 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 40,11 | 40,15 | 760 | 1,76 | | | 9250 | 9290 | 5,77 | 5,79 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 39,80 | 40,06 | 750 | 1,76 | | | 9130 | 9160 | 5,73 | 5,75 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 40,17 | 40,27 | 740 | 1,70 | | | 9250 | 9230 | 5,76 | 5,74 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 39,82 | 40,28 | 760 | 1,76 | | | 9240 | 9280 | 5,80 | 5,83 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-1 | 40,28 | 39,74 | 740 | 1,74 | 1,75 | 1,32 | 9280 | 9260 | 5,76 | 5,75 | 5,78 | 0,56 |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-2 | 39,90 | 39,82 | 740 | 1,75 | | | 9280 | 9290 | 5,81 | 5,82 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-3 | 40,11 | 40,15 | 760 | 1,76 | | | 9250 | 9290 | 5,77 | 5,79 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-4 | 39,80 | 40,06 | 750 | 1,76 | | | 9130 | 9160 | 5,73 | 5,75 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-5 | 40,17 | 40,27 | 740 | 1,70 | | | 9250 | 9230 | 5,76 | 5,74 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE-6 | 39,82 | 40,28 | 760 | 1,76 | | | 9240 | 9280 | 5,80 | 5,83 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-1 | 39,76 | 40,05 | 180 | 0,42 | 0,45 | 1,09 | 6800 | 6860 | 4,28 | 4,31 | 4,26 | 0,58 |

**Çizelge A.14 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-2 | 39,95 | 39,82 | 220 | 0,52 | | | 6800 | 6810 | 4,26 | 4,26 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-3 | 40,15 | 40,15 | 200 | 0,46 | | | 6820 | 6860 | 4,25 | 4,27 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-4 | 40,06 | 40,06 | 180 | 0,42 | | | 6830 | 6800 | 4,26 | 4,24 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-5 | 40,27 | 39,87 | 190 | 0,45 | | | 6820 | 6810 | 4,23 | 4,23 | | |
| 7.5SK-1-0.3-70C-PE'siz-6 | 39,87 | 39,80 | 190 | 0,45 | | | 6840 | 6830 | 4,29 | 4,28 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-1 | 40,27 | 39,95 | 820 | 1,91 | 1,90 | 1,51 | 14950 | 14980 | 9,28 | 9,30 | 9,36 | 0,68 |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-2 | 40,17 | 40,27 | 800 | 1,84 | | | 14970 | 14990 | 9,32 | 9,33 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-3 | 40,19 | 39,87 | 810 | 1,90 | | | 15060 | 14940 | 9,37 | 9,29 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-4 | 39,82 | 40,12 | 830 | 1,94 | | | 15080 | 14930 | 9,47 | 9,37 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-5 | 39,76 | 39,75 | 820 | 1,96 | | | 14980 | 15050 | 9,42 | 9,46 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE-6 | 40,12 | 40,23 | 800 | 1,85 | | | 14950 | 15000 | 9,32 | 9,35 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-1 | 39,95 | 39,82 | 290 | 0,69 | 0,68 | 1,76 | 8990 | 8920 | 5,63 | 5,58 | 5,60 | 1,00 |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-2 | 39,74 | 40,15 | 260 | 0,61 | | | 8890 | 8880 | 5,59 | 5,59 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-3 | 40,22 | 40,06 | 300 | 0,70 | | | 8870 | 8850 | 5,51 | 5,50 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-4 | 40,27 | 39,95 | 310 | 0,72 | | | 9030 | 9000 | 5,61 | 5,59 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-5 | 39,76 | 39,87 | 290 | 0,69 | | | 9050 | 9020 | 5,69 | 5,67 | | |
| 7.5SK-1-0.3-90C-PE'siz-6 | 39,95 | 39,80 | 280 | 0,66 | | | 9000 | 9010 | 5,63 | 5,64 | | |
| 7.5SK-1-0.3-1 | 40,05 | 40,21 | 1000 | 2,32 | 2,59 | 1,25 | 7500 | 7530 | 4,68 | 4,70 | 4,62 | 1,48 |
| 7.5SK-1-0.3-2 | 40,17 | 39,80 | 1040 | 2,45 | | | 7540 | 7550 | 4,69 | 4,70 | | |
| 7.5SK-1-0.3-3 | 40,12 | 39,95 | 1100 | 2,58 | | | 7320 | 7300 | 4,56 | 4,55 | | |
| 7.5SK-1-0.3-4 | 39,95 | 40,12 | 1210 | 2,82 | | | 7490 | 7420 | 4,69 | 4,64 | | |
| 7.5SK-1-0.3-5 | 39,91 | 39,95 | 1170 | 2,76 | | | 7380 | 7320 | 4,62 | 4,59 | | |
| 7.5SK-1-0.3-6 | 39,85 | 39,74 | 1100 | 2,62 | | | 7220 | 7230 | 4,53 | 4,54 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-1 | 39,89 | 40,28 | 1200 | 2,78 | 2,75 | 1,48 | 7800 | 7750 | 4,89 | 4,86 | 4,80 | 1,79 |
| 7.5SK-1.5-0.3-2 | 40,21 | 40,21 | 1250 | 2,88 | | | 7710 | 7740 | 4,79 | 4,81 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-3 | 40,28 | 39,82 | 1080 | 2,54 | | | 7590 | 7530 | 4,71 | 4,67 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-4 | 40,19 | 39,75 | 1100 | 2,60 | | | 7660 | 7720 | 4,76 | 4,80 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-5 | 39,87 | 40,23 | 1200 | 2,79 | | | 7570 | 7550 | 4,75 | 4,73 | | |
| 7.5SK-1.5-0.3-6 | 39,88 | 40,06 | 1240 | 2,91 | | | 7860 | 7890 | 4,93 | 4,95 | | |
| 7.5SK-2-0.3-1 | 39,80 | 40,27 | 1200 | 2,79 | 2,83 | 1,24 | 8700 | 8780 | 5,46 | 5,52 | 5,51 | 1,20 |
| 7.5SK-2-0.3-2 | 40,22 | 40,05 | 1270 | 2,95 | | | 8990 | 8910 | 5,59 | 5,54 | | |
| 7.5SK-2-0.3-3 | 40,27 | 40,17 | 1180 | 2,72 | | | 8940 | 8970 | 5,55 | 5,57 | | |
| 7.5SK-2-0.3-4 | 39,76 | 40,17 | 1290 | 3,02 | | | 8780 | 8820 | 5,52 | 5,55 | | |
| 7.5SK-2-0.3-5 | 39,82 | 40,12 | 1190 | 2,78 | | | 8730 | 8790 | 5,48 | 5,52 | | |

**Çizelge A.14 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 7.5SK-2-0.3-6 | 40,09 | 39,95 | 1170 | 2,74 | | | 8600 | 8670 | 5,36 | 5,41 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-1 | 40,06 | 39,91 | 1360 | 3,20 | 3,25 | 1,64 | 9860 | 9960 | 6,15 | 6,22 | 6,16 | 1,46 |
| 7.5SK-2.5-0.3-2 | 40,11 | 39,82 | 1350 | 3,18 | | | 9900 | 9950 | 6,17 | 6,20 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-3 | 40,14 | 39,75 | 1430 | 3,38 | | | 9900 | 9880 | 6,17 | 6,15 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-4 | 40,19 | 40,23 | 1450 | 3,34 | | | 9970 | 10070 | 6,20 | 6,26 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-5 | 40,25 | 40,06 | 1380 | 3,20 | | | 9970 | 10000 | 6,19 | 6,21 | | |
| 7.5SK-2.5-0.3-6 | 40,23 | 40,17 | 1390 | 3,21 | | | 9560 | 9690 | 5,94 | 6,02 | | |
| 10SK-1-0.3-1 | 39,85 | 40,12 | 1560 | 3,65 | 3,41 | 1,38 | 7890 | 7910 | 4,95 | 4,96 | 4,82 | 1,70 |
| 10SK-1-0.3-2 | 39,89 | 39,95 | 1510 | 3,56 | | | 7700 | 7720 | 4,83 | 4,84 | | |
| 10SK-1-0.3-3 | 40,21 | 39,91 | 1390 | 3,26 | | | 7810 | 7700 | 4,86 | 4,79 | | |
| 10SK-1-0.3-4 | 40,28 | 39,95 | 1400 | 3,27 | | | 7630 | 7550 | 4,74 | 4,69 | | |
| 10SK-1-0.3-5 | 39,82 | 39,82 | 1360 | 3,23 | | | 7760 | 7710 | 4,87 | 4,84 | | |
| 10SK-1-0.3-6 | 39,95 | 39,95 | 1500 | 3,53 | | | 7630 | 7600 | 4,77 | 4,76 | | |
| 10SK-1.5-0.3-1 | 40,12 | 40,19 | 1630 | 3,77 | 3,67 | 1,72 | 8100 | 8060 | 5,05 | 5,02 | 5,00 | 1,18 |
| 10SK-1.5-0.3-2 | 39,80 | 39,74 | 1560 | 3,72 | | | 8090 | 8030 | 5,08 | 5,04 | | |
| 10SK-1.5-0.3-3 | 39,87 | 40,27 | 1590 | 3,69 | | | 7890 | 7820 | 4,95 | 4,90 | | |
| 10SK-1.5-0.3-4 | 39,82 | 40,21 | 1490 | 3,47 | | | 7970 | 7990 | 5,00 | 5,02 | | |
| 10SK-1.5-0.3-5 | 40,28 | 39,82 | 1470 | 3,45 | | | 7950 | 7900 | 4,93 | 4,90 | | |
| 10SK-1.5-0.3-6 | 39,95 | 39,75 | 1650 | 3,92 | | | 8000 | 8040 | 5,01 | 5,03 | | |
| 10SK-2-0.3-1 | 39,95 | 40,23 | 1630 | 3,78 | 3,74 | 1,03 | 8790 | 8820 | 5,50 | 5,52 | 5,64 | 1,31 |
| 10SK-2-0.3-2 | 39,89 | 40,06 | 1650 | 3,87 | | | 8990 | 8980 | 5,63 | 5,63 | | |
| 10SK-2-0.3-3 | 40,17 | 39,82 | 1580 | 3,72 | | | 8980 | 8990 | 5,59 | 5,59 | | |
| 10SK-2-0.3-4 | 39,95 | 40,14 | 1580 | 3,68 | | | 9030 | 9080 | 5,65 | 5,68 | | |
| 10SK-2-0.3-5 | 39,82 | 40,19 | 1570 | 3,66 | | | 9100 | 9120 | 5,71 | 5,73 | | |
| 10SK-2-0.3-6 | 39,76 | 40,25 | 1590 | 3,70 | | | 9040 | 9080 | 5,68 | 5,71 | | |
| 10SK-2.5-0.3-1 | 40,28 | 39,82 | 1800 | 4,23 | 4,23 | 1,30 | 9900 | 9980 | 6,14 | 6,19 | 6,29 | 1,65 |
| 10SK-2.5-0.3-2 | 40,06 | 40,15 | 1760 | 4,09 | | | 9850 | 9970 | 6,15 | 6,22 | | |
| 10SK-2.5-0.3-3 | 39,89 | 40,06 | 1730 | 4,05 | | | 10200 | 10250 | 6,39 | 6,42 | | |
| 10SK-2.5-0.3-4 | 40,17 | 40,27 | 1850 | 4,26 | | | 9980 | 10090 | 6,21 | 6,28 | | |
| 10SK-2.5-0.3-5 | 39,76 | 39,87 | 1840 | 4,37 | | | 10200 | 10180 | 6,41 | 6,40 | | |
| 10SK-2.5-0.3-6 | 40,27 | 39,82 | 1870 | 4,39 | | | 10180 | 10140 | 6,32 | 6,30 | | |
| 12.5SK-1-0.3-1 | 40,15 | 39,76 | 2090 | 4,94 | 4,63 | 1,16 | 9850 | 9900 | 6,13 | 6,16 | 6,17 | 0,95 |
| 12.5SK-1-0.3-2 | 39,82 | 40,13 | 1990 | 4,65 | | | 9790 | 9840 | 6,15 | 6,18 | | |
| 12.5SK-1-0.3-3 | 39,75 | 40,27 | 2050 | 4,77 | | | 9970 | 10000 | 6,27 | 6,29 | | |
| 12.5SK-1-0.3-4 | 40,23 | 40,25 | 1890 | 4,35 | | | 9780 | 9890 | 6,08 | 6,15 | | |

**Çizelge A.14 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 12.5SK-1-0.3-5 | 40,06 | 39,82 | 1840 | 4,35 | | | 9860 | 9850 | 6,15 | 6,15 | | |
| 12.5SK-1-0.3-6 | 39,76 | 39,75 | 1980 | 4,73 | | | 9750 | 9790 | 6,13 | 6,16 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-1 | 39,87 | 40,23 | 2120 | 4,93 | 4,76 | 1,71 | 10060 | 10090 | 6,31 | 6,33 | 6,25 | 1,41 |
| 12.5SK-1.5-0.3-2 | 39,78 | 40,06 | 2090 | 4,91 | | | 10150 | 10000 | 6,38 | 6,28 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-3 | 40,28 | 40,17 | 1980 | 4,57 | | | 9800 | 9870 | 6,08 | 6,13 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-4 | 40,15 | 40,12 | 1960 | 4,55 | | | 9940 | 9920 | 6,19 | 6,18 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-5 | 39,89 | 39,95 | 1990 | 4,69 | | | 9980 | 10000 | 6,25 | 6,27 | | |
| 12.5SK-1.5-0.3-6 | 39,80 | 39,91 | 2070 | 4,90 | | | 10020 | 10050 | 6,29 | 6,31 | | |
| 12.5SK-2-0.3-1 | 40,23 | 39,76 | 2050 | 4,84 | 4,82 | 1,20 | 12700 | 12880 | 7,89 | 8,00 | 7,90 | 1,57 |
| 12.5SK-2-0.3-2 | 39,87 | 39,82 | 2030 | 4,82 | | | 12670 | 12810 | 7,94 | 8,03 | | |
| 12.5SK-2-0.3-3 | 39,76 | 39,95 | 2100 | 4,96 | | | 12690 | 12840 | 7,98 | 8,07 | | |
| 12.5SK-2-0.3-4 | 40,06 | 40,19 | 2000 | 4,64 | | | 12490 | 12300 | 7,79 | 7,68 | | |
| 12.5SK-2-0.3-5 | 40,13 | 39,89 | 2070 | 4,86 | | | 12490 | 12450 | 7,78 | 7,76 | | |
| 12.5SK-2-0.3-6 | 40,27 | 40,05 | 2080 | 4,83 | | | 12650 | 12840 | 7,85 | 7,97 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 40,06 | 39,82 | 2190 | 5,17 | 5,47 | 1,69 | 16850 | 16800 | 10,52 | 10,48 | 10,57 | 2,86 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 39,82 | 40,15 | 2260 | 5,28 | | | 16240 | 16300 | 10,20 | 10,23 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 40,12 | 40,06 | 2370 | 5,52 | | | 16470 | 16500 | 10,26 | 10,28 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 39,76 | 40,27 | 2390 | 5,56 | | | 16850 | 16760 | 10,59 | 10,54 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 40,11 | 39,87 | 2380 | 5,60 | | | 17670 | 17780 | 11,01 | 11,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 39,80 | 39,76 | 2390 | 5,70 | | | 17180 | 17200 | 10,79 | 10,80 | | |
| 15SK-1-0.3-1 | 40,17 | 40,17 | 1170 | 2,71 | 2,49 | 1,68 | 7160 | 7100 | 4,46 | 4,42 | 4,34 | 2,10 |
| 15SK-1-0.3-2 | 39,89 | 40,12 | 1050 | 2,45 | | | 7040 | 7090 | 4,41 | 4,44 | | |
| 15SK-1-0.3-3 | 40,05 | 39,95 | 980 | 2,30 | | | 7010 | 7000 | 4,38 | 4,37 | | |
| 15SK-1-0.3-4 | 39,82 | 39,91 | 950 | 2,25 | | | 6900 | 6920 | 4,33 | 4,34 | | |
| 15SK-1-0.3-5 | 39,76 | 39,95 | 1110 | 2,62 | | | 6740 | 6720 | 4,24 | 4,23 | | |
| 15SK-1-0.3-6 | 40,15 | 40,19 | 1140 | 2,64 | | | 6790 | 6760 | 4,23 | 4,21 | | |
| 15SK-1.5-0.3-1 | 40,23 | 40,13 | 1210 | 2,80 | 2,70 | 1,47 | 7330 | 7340 | 4,56 | 4,56 | 4,65 | 1,37 |
| 15SK-1.5-0.3-2 | 39,87 | 40,27 | 1190 | 2,76 | | | 7350 | 7290 | 4,61 | 4,57 | | |
| 15SK-1.5-0.3-3 | 40,12 | 39,89 | 1110 | 2,61 | | | 7580 | 7560 | 4,72 | 4,71 | | |
| 15SK-1.5-0.3-4 | 39,77 | 40,05 | 1040 | 2,45 | | | 7510 | 7500 | 4,72 | 4,71 | | |
| 15SK-1.5-0.3-5 | 39,95 | 40,05 | 1260 | 2,95 | | | 7420 | 7380 | 4,64 | 4,62 | | |
| 15SK-1.5-0.3-6 | 40,11 | 39,82 | 1120 | 2,64 | | | 7450 | 7500 | 4,64 | 4,67 | | |
| 15SK-2-0.3-1 | 39,76 | 39,80 | 1230 | 2,93 | 2,87 | 1,04 | 8630 | 8690 | 5,43 | 5,46 | 5,38 | 0,94 |
| 15SK-2-0.3-2 | 40,28 | 40,17 | 1250 | 2,88 | | | 8560 | 8580 | 5,31 | 5,33 | | |
| 15SK-2-0.3-3 | 40,16 | 39,89 | 1160 | 2,72 | | | 8590 | 8560 | 5,35 | 5,33 | | |

**Çizelge A.14 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 15SK-2-0.3-4 | 39,91 | 39,80 | 1190 | 2,82 | | | 8650 | 8630 | 5,42 | 5,41 | | |
| 15SK-2-0.3-5 | 39,82 | 40,12 | 1270 | 2,97 | | | 8600 | 8640 | 5,40 | 5,42 | | |
| 15SK-2-0.3-6 | 40,17 | 39,76 | 1220 | 2,88 | | | 8590 | 8570 | 5,35 | 5,33 | | |
| 15SK-2.5-0.3-1 | 40,23 | 40,11 | 1370 | 3,18 | 3,16 | 1,63 | 9490 | 9580 | 5,90 | 5,95 | 6,00 | 0,78 |
| 15SK-2.5-0.3-2 | 39,90 | 39,80 | 1400 | 3,32 | | | 9560 | 9600 | 5,99 | 6,02 | | |
| 15SK-2.5-0.3-3 | 40,12 | 40,17 | 1380 | 3,20 | | | 9680 | 9650 | 6,03 | 6,01 | | |
| 15SK-2.5-0.3-4 | 39,95 | 40,23 | 1260 | 2,92 | | | 9590 | 9640 | 6,00 | 6,03 | | |
| 15SK-2.5-0.3-5 | 39,80 | 39,95 | 1390 | 3,28 | | | 9670 | 9590 | 6,07 | 6,02 | | |
| 15SK-2.5-0.3-6 | 40,06 | 39,82 | 1300 | 3,07 | | | 9590 | 9530 | 5,98 | 5,95 | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-1 | 40,23 | 40,06 | 400 | 0,93 | 1,00 | 1,02 | 3950 | 3900 | 2,45 | 2,42 | 2,50 | 1,81 |
| 12.5SK-2.5-0.1-2 | 40,28 | 40,27 | 470 | 1,08 | | | 3980 | 4000 | 2,47 | 2,48 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-3 | 40,19 | 39,87 | 400 | 0,94 | | | 4100 | 4030 | 2,55 | 2,51 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-4 | 39,82 | 39,80 | 460 | 1,09 | | | 3970 | 3930 | 2,49 | 2,47 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-5 | 39,76 | 40,17 | 430 | 1,01 | | | 4050 | 4110 | 2,55 | 2,58 | | |
| 12.5SK-2.5-0.1-6 | 39,89 | 39,89 | 410 | 0,97 | | | 3950 | 3990 | 2,48 | 2,50 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-1 | 40,12 | 40,17 | 970 | 2,25 | 2,21 | 1,70 | 7740 | 7780 | 4,82 | 4,85 | 4,88 | 0,75 |
| 12.5SK-2.5-0.2-2 | 39,95 | 40,12 | 1030 | 2,40 | | | 7850 | 7890 | 4,91 | 4,94 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-3 | 40,19 | 39,95 | 1000 | 2,34 | | | 7860 | 7880 | 4,89 | 4,90 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-4 | 39,80 | 39,91 | 930 | 2,20 | | | 7690 | 7730 | 4,83 | 4,86 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-5 | 40,17 | 40,28 | 900 | 2,07 | | | 7890 | 7830 | 4,91 | 4,87 | | |
| 12.5SK-2.5-0.2-6 | 39,89 | 40,23 | 870 | 2,02 | | | 7850 | 7810 | 4,92 | 4,89 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-1 | 39,82 | 39,80 | 2190 | 5,21 | 5,47 | 1,69 | 16850 | 16800 | 10,52 | 10,48 | 10,57 | 2,86 |
| 12.5SK-2.5-0.3-2 | 40,15 | 40,17 | 2260 | 5,23 | | | 16240 | 16300 | 10,20 | 10,23 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-3 | 40,06 | 39,89 | 2370 | 5,58 | | | 16470 | 16500 | 10,26 | 10,28 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-4 | 40,27 | 39,95 | 2390 | 5,58 | | | 16850 | 16760 | 10,59 | 10,54 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-5 | 39,87 | 40,15 | 2380 | 5,55 | | | 17670 | 17780 | 11,01 | 11,08 | | |
| 12.5SK-2.5-0.3-6 | 39,95 | 40,06 | 2390 | 5,59 | | | 17180 | 17200 | 10,79 | 10,80 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-1 | 40,12 | 40,27 | 1290 | 2,97 | 3,07 | 1,68 | 6020 | 6080 | 3,75 | 3,79 | 3,83 | 1,26 |
| 12.5SK-2.5-0.4-2 | 39,95 | 39,87 | 1320 | 3,12 | | | 6140 | 6180 | 3,84 | 3,87 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-3 | 39,74 | 40,12 | 1260 | 2,95 | | | 6210 | 6190 | 3,91 | 3,89 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-4 | 40,28 | 39,76 | 1270 | 2,99 | | | 6130 | 6170 | 3,80 | 3,83 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-5 | 39,90 | 40,11 | 1330 | 3,11 | | | 6100 | 6180 | 3,82 | 3,87 | | |
| 12.5SK-2.5-0.4-6 | 39,95 | 39,80 | 1370 | 3,25 | | | 6090 | 6030 | 3,81 | 3,77 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-1 | 39,82 | 40,17 | 670 | 1,56 | 1,70 | 1,21 | 4080 | 4030 | 2,56 | 2,53 | 2,52 | 1,94 |

**Çizelge A.14 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer bağlayıcıya ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| 12.5SK-2.5-0.5-2 | 39,95 | 39,82 | 730 | 1,73 | | | 3960 | 3990 | 2,48 | 2,50 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-3 | 40,19 | 40,15 | 780 | 1,81 | | | 4020 | 4070 | 2,50 | 2,53 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-4 | 39,74 | 40,06 | 720 | 1,69 | | | 4150 | 4110 | 2,61 | 2,59 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-5 | 40,27 | 40,27 | 690 | 1,58 | | | 3980 | 3940 | 2,47 | 2,45 | | |
| 12.5SK-2.5-0.5-6 | 40,17 | 39,87 | 770 | 1,81 | | | 4000 | 4070 | 2,49 | 2,53 | | |

**Çizelge A.15 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0.5-1 | 39,85 | 40,12 | 390 | 0,91 | 0,90 | 1,26 | 2180 | 2150 | 1,37 | 1,35 | 1,39 | 1,54 |
| SK-20/100-0.5-2 | 39,89 | 39,95 | 350 | 0,82 | | | 2270 | 2270 | 1,42 | 1,42 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 40,21 | 39,91 | 410 | 0,96 | | | 2180 | 2190 | 1,36 | 1,36 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 40,28 | 39,95 | 360 | 0,84 | | | 2190 | 2150 | 1,36 | 1,33 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 39,82 | 39,82 | 400 | 0,95 | | | 2270 | 2250 | 1,43 | 1,41 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 39,95 | 39,95 | 390 | 0,92 | | | 2250 | 2280 | 1,41 | 1,43 | | |
| SK-25/100-0.5-1 | 39,80 | 40,27 | 420 | 0,98 | 1,02 | 1,13 | 2440 | 2520 | 1,53 | 1,58 | 1,63 | 1,84 |
| SK-25/100-0.5-2 | 40,22 | 40,05 | 440 | 1,02 | | | 2600 | 2560 | 1,62 | 1,59 | | |
| SK-25/100-0.5-3 | 40,27 | 40,17 | 420 | 0,97 | | | 2590 | 2610 | 1,61 | 1,62 | | |
| SK-25/100-0.5-4 | 39,76 | 40,17 | 450 | 1,05 | | | 2600 | 2570 | 1,63 | 1,62 | | |
| SK-25/100-0.5-5 | 39,82 | 40,12 | 460 | 1,08 | | | 2640 | 2680 | 1,66 | 1,68 | | |
| SK-25/100-0.5-6 | 40,09 | 39,95 | 430 | 1,01 | | | 2730 | 2660 | 1,70 | 1,66 | | |
| SK-33/100-0.5-1 | 39,89 | 40,28 | 500 | 1,16 | 1,15 | 1,35 | 2770 | 2790 | 1,74 | 1,75 | 1,76 | |
| SK-33/100-0.5-2 | 40,21 | 40,21 | 520 | 1,20 | | | 2870 | 2890 | 1,78 | 1,80 | | 1,58 |
| SK-33/100-0.5-3 | 40,28 | 39,82 | 490 | 1,15 | | | 2800 | 2840 | 1,74 | 1,76 | | |
| SK-33/100-0.5-4 | 40,19 | 39,75 | 500 | 1,18 | | | 2860 | 2780 | 1,78 | 1,73 | | |
| SK-33/100-0.5-5 | 39,87 | 40,23 | 470 | 1,09 | | | 2720 | 2780 | 1,71 | 1,74 | | |
| SK-33/100-0.5-6 | 39,88 | 40,06 | 480 | 1,13 | | | 2850 | 2830 | 1,79 | 1,77 | | |
| SK-50/100-0.5-1 | 40,12 | 40,19 | 560 | 1,30 | 1,37 | 1,01 | 3120 | 3150 | 1,94 | 1,96 | 1,95 | 1,62 |

**Çizelge A.15 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-50/100-0.5-2 | 39,80 | 39,74 | 540 | 1,29 | | | 3000 | 3070 | 1,88 | 1,93 | | |
| SK-50/100-0.5-3 | 39,87 | 40,27 | 630 | 1,46 | | | 3150 | 3110 | 1,98 | 1,95 | | |
| SK-50/100-0.5-4 | 39,82 | 40,21 | 610 | 1,42 | | | 3200 | 3130 | 2,01 | 1,97 | | |
| SK-50/100-0.5-5 | 40,28 | 39,82 | 590 | 1,39 | | | 3180 | 3120 | 1,97 | 1,94 | | |
| SK-50/100-0.5-6 | 39,95 | 39,75 | 570 | 1,35 | | | 3170 | 3100 | 1,98 | 1,94 | | |
| SK-100/100-0.5-1 | 39,85 | 40,12 | 720 | 1,68 | 1,62 | 1,69 | 4000 | 4040 | 2,51 | 2,53 | 2,52 | 0,91 |
| SK-100/100-0.5-2 | 39,89 | 39,95 | 670 | 1,58 | | | 4050 | 4080 | 2,54 | 2,56 | | |
| SK-100/100-0.5-3 | 40,21 | 39,91 | 680 | 1,59 | | | 4100 | 4070 | 2,55 | 2,53 | | |
| SK-100/100-0.5-4 | 40,28 | 39,95 | 680 | 1,59 | | | 4090 | 4070 | 2,54 | 2,53 | | |
| SK-100/100-0.5-5 | 39,82 | 39,82 | 700 | 1,66 | | | 3960 | 4030 | 2,49 | 2,53 | | |
| SK-100/100-0.5-6 | 39,95 | 39,95 | 690 | 1,62 | | | 4010 | 3970 | 2,51 | 2,48 | | |
| SK-20/100-0-1 | 39,95 | 40,23 | 1630 | 3,78 | 3,92 | 1,27 | 9090 | 9070 | 5,69 | 5,68 | 5,69 | 0,78 |
| SK-20/100-0-2 | 39,89 | 40,06 | 1660 | 3,89 | | | 9100 | 9120 | 5,70 | 5,72 | | |
| SK-20/100-0-3 | 40,17 | 39,82 | 1720 | 4,05 | | | 9070 | 9090 | 5,64 | 5,66 | | |
| SK-20/100-0-4 | 39,95 | 40,14 | 1690 | 3,94 | | | 9080 | 8980 | 5,68 | 5,62 | | |
| SK-20/100-0-5 | 39,82 | 40,19 | 1670 | 3,89 | | | 9000 | 9050 | 5,65 | 5,68 | | |
| SK-20/100-0-6 | 39,76 | 40,25 | 1700 | 3,96 | | | 9150 | 9180 | 5,75 | 5,77 | | |
| SK-20/100-0.25-1 | 39,87 | 40,23 | 520 | 1,21 | 1,22 | 1,03 | 3320 | 3400 | 2,08 | 2,13 | 2,09 | 1,25 |
| SK-20/100-0.25-2 | 39,78 | 40,06 | 510 | 1,20 | | | 3300 | 3360 | 2,07 | 2,11 | | |
| SK-20/100-0.25-3 | 40,28 | 40,17 | 540 | 1,25 | | | 3350 | 3320 | 2,08 | 2,06 | | |
| SK-20/100-0.25-4 | 40,15 | 40,12 | 500 | 1,16 | | | 3280 | 3390 | 2,04 | 2,11 | | |
| SK-20/100-0.25-5 | 39,89 | 39,95 | 530 | 1,25 | | | 3340 | 3300 | 2,09 | 2,07 | | |
| SK-20/100-0.25-6 | 39,80 | 39,91 | 530 | 1,25 | | | 3370 | 3310 | 2,12 | 2,08 | | |
| SK-20/100-0.5-1 | 39,85 | 40,12 | 390 | 0,91 | 0,90 | 1,26 | 2180 | 2150 | 1,37 | 1,35 | 1,39 | 1,54 |
| SK-20/100-0.5-2 | 39,89 | 39,95 | 350 | 0,82 | | | 2270 | 2270 | 1,42 | 1,42 | | |
| SK-20/100-0.5-3 | 40,21 | 39,91 | 410 | 0,96 | | | 2180 | 2190 | 1,36 | 1,36 | | |
| SK-20/100-0.5-4 | 40,28 | 39,95 | 360 | 0,84 | | | 2190 | 2150 | 1,36 | 1,33 | | |
| SK-20/100-0.5-5 | 39,82 | 39,82 | 400 | 0,95 | | | 2270 | 2250 | 1,43 | 1,41 | | |
| SK-20/100-0.5-6 | 39,95 | 39,95 | 390 | 0,92 | | | 2250 | 2280 | 1,41 | 1,43 | | |
| SK-20/100-1.0-1 | 40,06 | 39,91 | 150 | 0,35 | 0,33 | 1,28 | 1300 | 1350 | 0,81 | 0,84 | 0,85 | 1,57 |
| SK-20/100-1.0-2 | 40,11 | 39,82 | 120 | 0,28 | | | 1330 | 1400 | 0,83 | 0,87 | | |
| SK-20/100-1.0-3 | 40,14 | 39,75 | 130 | 0,31 | | | 1380 | 1350 | 0,86 | 0,84 | | |
| SK-20/100-1.0-4 | 40,19 | 40,23 | 130 | 0,30 | | | 1320 | 1350 | 0,82 | 0,84 | | |
| SK-20/100-1.0-5 | 40,25 | 40,06 | 140 | 0,33 | | | 1400 | 1390 | 0,87 | 0,86 | | |

**Çizelge A.15 (devam) :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait eğilmede çekme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

| Numune kodu | Numune kenar uzunluğu (b) (mm) | Numune yüksekliği (h) (mm) | Numunenin kırıldığı anda ortasına uygulanan yük ($F_f$) (N) | Eğilmede çekme dayanımı ($R_f$) (MPa) | | | Kırılma anındaki en büyük yük ($F_{co}$) (N) | | Basınç dayanımı ($R_c$) (MPa) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Hesap sonucu | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) | 1. parça | 2. parça | Hesap sonucu-1 | Hesap sonucu-2 | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-1.0-6 | 40,23 | 40,17 | 170 | 0,39 | | | 1370 | 1420 | 0,85 | 0,88 | | |
| SK-20/100-1.5-1 | 40,05 | 40,21 | 70 | 0,16 | 0,12 | 1,00 | 700 | 650 | 0,44 | 0,41 | 0,40 | 1,82 |
| SK-20/100-1.5-2 | 40,17 | 39,80 | 50 | 0,12 | | | 670 | 600 | 0,42 | 0,37 | | |
| SK-20/100-1.5-3 | 40,12 | 39,95 | 50 | 0,12 | | | 630 | 590 | 0,39 | 0,37 | | |
| SK-20/100-1.5-4 | 39,95 | 40,12 | 50 | 0,12 | | | 580 | 600 | 0,36 | 0,38 | | |
| SK-20/100-1.5-5 | 39,91 | 39,95 | 40 | 0,09 | | | 620 | 650 | 0,39 | 0,41 | | |
| SK-20/100-1.5-6 | 39,85 | 39,74 | 40 | 0,10 | | | 630 | 670 | 0,40 | 0,42 | | |

**Çizelge A.16 :** Datça Puzolanı esaslı jeopolimer köpüğe ait ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları.

| Numune kodu | Üst numuned en geçen ısı akısı ($Q_1$) ($W/m^2$) | Üst numune kalınlığı ($d_1$) (m) | Üst numune alanı ($A_1$) ($m^2$) | Üst numunenin bir yüzeyindek i sıcaklık ($T_1$) | Üst numunenin diğer yüzeyindek i sıcaklık ($T_2$) | Alt numuned en geçen ısı akısı ($Q_2$) ($W/m^2$) | Alt numune kalınlığı ($d_2$) (m) | Alt numune alanı ($A_2$) ($m^2$) | Alt numunenin bir yüzeyindek i sıcaklık ($T_3$) | Alt numunenin diğer yüzeyindek i sıcaklık ($T_4$) | Isı iletkenlik katsayısı (λ) (W/mK) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | Hesap sonucu | | Ortalama sonuç | Variasyon katsayısı (%) |
| SK-20/100-0-1/2 | 9,082974 | 0,010176 | 0,009261 | 57,38272 | 23,26637 | 9,085628 | 0,011846 | 0,009282 | 57,39827 | 23,27181 | 0,29254 | 0,339777 | 0,312011 | 1,59 |
| SK-20/100-0-3/4 | 9,085547 | 0,011628 | 0,009263 | 57,38563 | 23,26611 | 9,082821 | 0,010551 | 0,009292 | 57,38921 | 23,26693 | 0,334273 | 0,302251 | | |
| SK-20/100-0-5/6 | 9,083811 | 0,010738 | 0,009215 | 57,37263 | 23,27152 | 9,084621 | 0,010133 | 0,009219 | 57,37225 | 23,27219 | 0,310404 | 0,292823 | | |
| SK-20/100-0.25-1/2 | 4,881927 | 0,010194 | 0,009555 | 58,39734 | 19,26752 | 4,891886 | 0,010185 | 0,009576 | 58,39567 | 19,26653 | 0,133106 | 0,13297 | 0,134018 | 0,66 |
| SK-20/100-0.25-3/4 | 4,901953 | 0,01019 | 0,009545 | 58,38432 | 19,27823 | 4,951761 | 0,010176 | 0,009592 | 58,38983 | 19,26349 | 0,133821 | 0,134264 | | |
| SK-20/100-0.25-5/6 | 4,961792 | 0,010173 | 0,009567 | 58,39662 | 19,25889 | 4,95189 | 0,010187 | 0,009542 | 58,37821 | 19,26002 | 0,134808 | 0,135145 | | |
| SK-20/100-0.5-1/2 | 3,38621 | 0,010770 | 0,009215 | 64,07997 | 19,23302 | 3,39653 | 0,010652 | 0,009167 | 64,07522 | 19,24245 | 0,088247 | 0,088033 | 0,088289 | 0,89 |
| SK-20/100-0.5-3/4 | 3,39613 | 0,010726 | 0,009118 | 64,07836 | 19,24031 | 3,38696 | 0,010734 | 0,009276 | 64,07923 | 19,23409 | 0,0891 | 0,087397 | | |
| SK-20/100-0.5-5/6 | 3,38583 | 0,010780 | 0,009289 | 64,07942 | 19,23589 | 3,38567 | 0,010790 | 0,009119 | 64,07871 | 19,23837 | 0,087622 | 0,089341 | | |
| SK-20/100-1.0-1/2 | 3,607966 | 0,010120 | 0,009388 | 65,13309 | 18,86035 | 3,618955 | 0,010962 | 0,009419 | 65,12297 | 18,87128 | 0,084051 | 0,091063 | 0,085776 | 1,64 |
| SK-20/100-1.0-3/4 | 3,602567 | 0,010887 | 0,009643 | 65,12369 | 18,87985 | 3,621769 | 0,010345 | 0,009581 | 65,13508 | 18,86678 | 0,087954 | 0,084519 | | |
| SK-20/100-1.0-5/6 | 3,635725 | 0,010124 | 0,009425 | 65,13922 | 18,86112 | 3,612738 | 0,010136 | 0,009573 | 65,13289 | 18,86814 | 0,084389 | 0,082681 | | |
| SK-20/100-1.5-1/2 | 3,127821 | 0,010762 | 0,009571 | 64,99857 | 18,33443 | 3,117288 | 0,010387 | 0,009428 | 64,98612 | 18,34516 | 0,075369 | 0,073634 | 0,076264 | 1,21 |
| SK-20/100-1.5-3/4 | 3,129172 | 0,010996 | 0,009361 | 64,98256 | 18,34891 | 3,106253 | 0,010562 | 0,009539 | 64,99551 | 18,33772 | 0,078821 | 0,073715 | | |
| SK-20/100-1.5-5/6 | 3,128292 | 0,010661 | 0,009018 | 64,99712 | 18,33826 | 3,127282 | 0,010342 | 0,009027 | 64,99863 | 18,33927 | 0,079261 | 0,076787 | | |

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** **:** Kübra Ekiz BARIŞ

**ÖĞRENİM DURUMU:**

- **Lisans** **:** 2013, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Anabilim Dalı, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

**DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2021. Improving the Geopolymeric Reactivity of Earth of Datça as a Natural Pozzolan in Developing Green Binder, *Journal of Building Engineering,* 41, 102760.
- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2019. Geopolymers in Architecture, *Advancements in Civil Engineering and Architecture, Volume 2: Architecture, Proceedings of the International Civil Engineering & Architecture Conference,* April 17-20, 2019 Trabzon, Turkey.

**DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

**Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI & SSCI & Arts and Humanities)**

- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2017. Earth of Datça: Development of Pozzolanic Activity with Steam Curing, *Construction and Building Materials,* 139, 212-220.
- Ziyaettin, N., **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2021. Effect of Alkoxysilane-Based Treatment on the Durability of North Cyprus Stones for Construction, *Journal of Green Building,* 16(1), 179-196.

**Uluslararası diğer hakemli dergilerde yayınlanan makaleler**

- **Barış, K.E.** 2018. Bozcaada Kimisis Teodoku Rum Ortodoks Kilisesi, *Çanakkale Araştırmaları Türk Yıllığı,* 211-244.

**Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler**

- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2017. Durability of Steam Cured Pozzolanic Mortars at Atmospheric Pressure, *2nd International Conference on Calcined Clays for Sustainable Concrete,* December 05-07, 2017, La Habana, Cuba.
- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2019. Production of Banana Waste Fiber Cement Composite, *Advancements in Civil Engineering and Architecture, Volume 2: Architecture, Proceedings of the International Civil Engineering & Architecture Conference,* Trabzon, Turkey, April 17-20, 2019 Trabzon, Turkey.

**Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan makaleler**

- **Barış, K.E.,** Tanaçan, L. 2017. Datça Toprağı: Alternatif Yapı Malzemesi, *Yapı*, 432, 11/2017, s.136-141, ISSN 1300-3437, Yapı Endüstri Merkezi.

**Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler**

- **Barış, K. E.,** Tanaçan, L. 2016. Doğal Puzolan Katkılı Kireç Bağlayıcının Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi, *IV. Çevre-Tasarım Kongresi,* Mayıs 05-06, 2016 Kayseri, Türkiye.