

IV. ÇEVRE-TASARIM KONGRESİ 2016

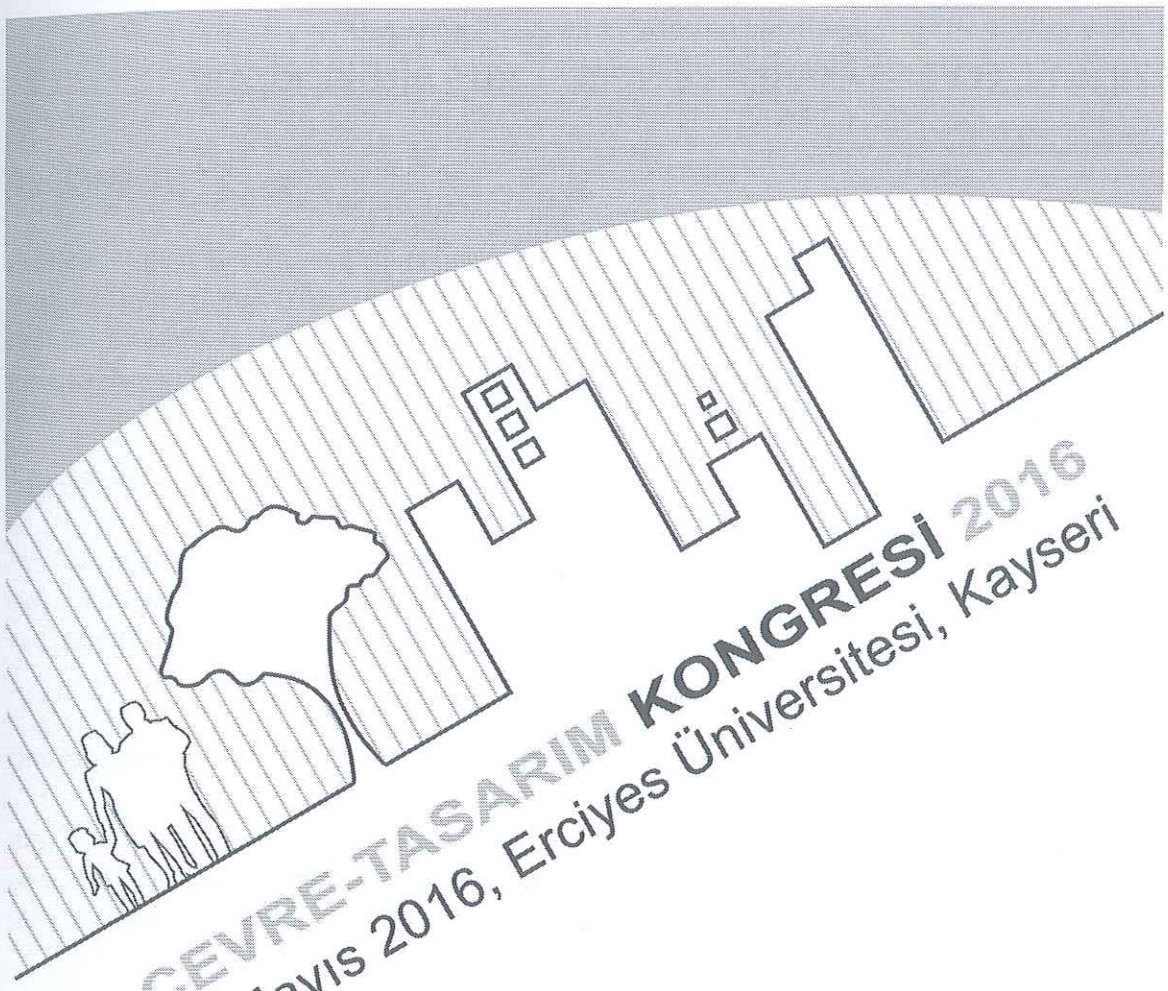
05-06 Mayıs 2016, Erciyes Üniversitesi, Kayseri

TARİHİ ÇEVREDE TASARIM

BİLDİRİ KİTABI

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ 1978

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ 1911



TARİHİ ÇEVREDE TASARIM

BİLDİRİ KİTABI

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ MİMARLIK FAKÜLTESİ MİMARLIK BÖLÜMÜ

©2016 IV. ÇEVRE-TASARIM KONGRESİ 2016 BİLDİRİ KİTABI

Editörler:
Seda TÖNÜK
Gonca BÜYÜKMIHÇI
Burcu SALGIN
Sevim SEYHAN AYTEN
Zeynep ERGEN
Ayşegül KILIÇ

ERCİYES ÜNİVERSİTESİ YAYINLARI
Yayın No: 208
ISBN: 978-605-64541-3-4

Bütün hakları saklıdır. ©2016. Erciyes Üniversitesi

Bu eserin bir kısmı ve tamamı Erciyes Üniversitesi Rektörlüğü'nün izni olmadan, hiçbir şekilde çoğaltılamaz, kopya edilemez. Bu kitabın 5846 ve 2936 sayılı fikir ve sanat eserleri yasası hükümleri gereğince yazarın yazılı izni olmadan kitabın bir bölümünden alıntı yapılamaz, fotokopi yöntemiyle resim, şekil, şema, grafik vb.'ler kopya edilemez.

Bu eserde yer alan her türlü, şekil, grafik, harita, resim gibi görsel öge ve bilimsel düşünce veya ifadelerle ilgili anlatımların sorumluluğu yazar/yazarlara aittir. Erciyes Üniversitesi bu ve benzeri iddialarla ilgili herhangi bir hukuki sorumluluk üstlenmez.

200 adet basılmıştır.

Baskı-Cilt: ESER DİJİTAL BASIMEVİ
Adres: Cumhuriyet Mahallesi Aytar Sokak Cumhuriyet İşhanı Altı No: 6/E Melikgazi / KAYSERİ
Tel: 0352 222 88 88 / Fax: 0352 222 88 89
e-posta: info@esercopy.com / web: www.esercopy.com

DOĞAL PUZOLAN KATKILI KİREÇ BAĞLAYICININ YAPI MALZEMESİ OLARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

Kübra Ekiz Barış, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi
Leyla Tanaçan, İstanbul Teknik Üniversites, Mimarlık Fakültesi

ÖZET

Datça bölgesindeki doğal puzolanla kireç karışımından elde edilen bağlayıcının mukavemet gelişimi üzerinde düşük sıcaklık ve buhar basınçlı otoklav kürü koşullarının etkisi irdelenerek bölücü duvar malzemesi üretim olanakları araştırılmıştır. Kür süresinin, farklı sıcaklıkların ve farklı sıcaklık ve su buharı basıncının etkisini karşılaştırmak amacıyla numuneler; ortam koşullarında, su içinde, etüvde ve otoklavda kürlenmiştir. Fiziksel ve mekanik özellikleri, kür süresi artışının olumlu yönde, sıcaklık artışının ise olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Otoklavda kürleme ile elde edilen malzemenin, pişmiş toprak tuğla, bimsblok, gazbeton ve kireç-kumtaşı bloklarına alternatif olabileceği görülmüştür. Ayrıca, üretilen harcın tarihi yapıların onarımında tamir harcı olarak kullanılabileceği de tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Kireç, Puzolan, Puzolanik Aktivite, Kür Koşulları, Otoklav

1.GİRİŞ

Puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince taneli durumdayken, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan silisli ve alüminli malzemelerdir [1]. Puzolanik aktivite, puzolanik malzemelerin sulu ortamda kireçle reaksiyona girme ve sertleşme kapasitesidir. Bu puzolanik özellik sayesinde, çimentonun ana bileşeni olan kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminat bileşikleri ile suda çözünmeyen yüksek dayanımlı bir bağlayıcı elde edilmektedir. Puzolanlar kireç harçlarında kullanıldıklarında harç üzerinde iyi bir etki yapmakta ve kireci suya dirençli hale getirmektedir. Sert iklim ve nem koşullarında ileri derecede dayanıklılık ve yüksek mekanik mukavemet sergileyen kireç-puzolan harçları hem yapısal hem de yapısal olmayan amaçlarla kullanılmaktadır [2]. Ayrıca kireç-puzolan harçları, tarihi yapı malzemelerine fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından uyum sağlaması nedeniyle özellikle tarihi yapıların onarımında da kullanılabilmektedir.

Kireç-puzolan harçlarının mekanik özellikleri iki sertleşme mekanizmasından dolayı gelişir: Puzolanik reaksiyonunun yavaş gelişimi ve karbonatlaşma [3]. Puzolanik reaksiyonda, sönmüş kirecin ($Ca(OH)_2$) bir kısmı ortam sıcaklığında (yaklaşık 20°C) puzolan ile tepkimeye girer ve hidrate edilmiş kalsiyum silikat ve alüminatları oluşturur. 25°C sıcaklıkta 12.45 pH değerine sahip karışım suyunda yüksek yoğunlukta bulunan $(OH)^-$ iyonları nedeniyle Ca^{+2} iyonları çözeltiye geçer. Eş zamanlı olarak, silikat ve alüminat bağlayıcılar hidrolize olur ve aşağıdaki kimyasal denklemlere göre iyonlar oluşur [4]:

$$\equiv Si - O - Si\equiv + 8OH^- \rightarrow 2[SiO(OH)_3]^- + H_2O \qquad (1)$$

$\equiv Si - O - Al\equiv + 7OH^- \rightarrow 2[SiO(OH)_3]^- + [Al(OH)_4]^-$ (2)

Basit silikat ve alüminat iyonları Ca^{+2} iyonları ile temas ettiğinde, kalsiyumun puzolandaki aktif silis ve alümin ile karmaşık amorf kalsiyum aluminat hidrat ve kalsiyum silikat hidratları oluşturmak için kimyasal olarak bağlandığı en önemli reaksiyon gerçekleşir [3]:

$SiO_2, nH_2O + Ca(OH)_2 + mH_2O \rightarrow CaO, SiO_2, (n+m+1)\ H_2O$ (3)

$Al_2O_3, SiO_2, nH_2O + Ca(OH)_2 + mH_2O \rightarrow CaO, Al_2O_3, SiO_2, (n+m+1)\ H_2O$ (4)

Puzolanın $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu C_4AH_{13} (kalsiyum alüminat hidrat), C_3AH_6 (trikalsiyum alüminat hidrat), ve C_2ASH_8 (hidrate gehlenit) oluşumuyla da sonuçlanabilir [3]. Bu ürünler Portland çimentoya su katıldığında üretilen temel bileşenler olup suda çözünmeyen kalsiyum silikat jel içeren bağlayıcı maddelerdir. Ayrıca, puzolanik aktivite ile birlikte karbonatlaşma oluşur: $Ca(OH)_2$ in bir kısmı $CaCO_3$ oluşturmak üzere havadaki CO_2 ile reaksiyona girer. Karbonatlaşma ortamdaki CO_2 oranına bağlı olarak uzun sürede yavaş gelişen bir reaksiyodur. Kireç harçlarındaki karbonatlaşmanın ne kadar sürede tamamlanacağı ve harcın en yüksek mukavemet değerine ne zaman ulaşacağı tam olarak bilinmemektedir [5].

Her iki sertleşme mekanizmasında oluşan bileşenlerin miktarı; puzolanın inceliğine, harçtaki karışım suyu miktarına, havadaki CO_2 yoğunluğuna, kür koşullarına ve harcın porozitesine bağlıdır. Literatürde kür sıcaklığı, bağıl nem ve kür süresi gibi parametrelerin kireç-puzolan harçlarının mukavemet gelişimi üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar bulunmaktadır.

Datça toprağının puzolanik özelliğinin araştırıldığı çalışmada numuneler, farklı etüv sıcaklığında, sabit dış ortam koşullarında ve su içerisinde farklı sürelerde kürlenmiştir [3]. Çalışma sonucunda harç özelliklerinin, suda kürlendiğinde dış ortam ve etüv koşullarında kürlenmeye nazaran daha olumlu yönde geliştiği tespit edilmiştir. Buradan, kireç-puzolan harcının hidrolik bir harç olduğu anlaşılmaktadır. Çalışmada ayrıca, %100 bağıl nemde etüv sıcaklığının 55°C'den 70°C ve 90°C'ye yükselmesi ve kür süresinin artmasıyla mukavemet gelişiminin olduğu tespit edilmiştir.

Öte yandan, sıcaklık ve buhar basıncı altında otoklavda kür yöntemiyle çimento esaslı yapı ürünleri üretilmektedir. Bu yöntem, havada kür yöntemine göre birkaç avantaj sağlamaktadır: yüksek dayanımın birkaç saat içerisinde gelişimi, zamandan tasarruf, kuruma rötresinde azalma ve karbonatlaşma ve sülfat atağı gibi kimyasal etkilere karşı üstün bir dayanıklılık [6]. Kalsiyum silikat tuğla üretiminde de kullanılan otoklav küründe, kum ile kireci reaksiyona sokmak için gerekli olan otoklav sıcaklığı 170-210°C'dir. Ancak bu sıcaklık kireç-puzolan harcı ile üretilecek malzeme için yüksek gelebilmektedir. Çünkü kireç-puzolan reaksiyonunun ana bileşeni C-S-H'a kimyasal olarak bağlı su 95-120°C arasında dehidrate olmakta ve bağlayıcı matrisin önemli bir kısmının yapısı bozulmaktadır [3]. Nitekim puzolan katkılı kireç harcında otoklavda 70°C'nin üzerindeki kür sıcaklığının, reaksiyona giren kireç oranının azalmasına bağlı olarak, malzemenin mukavemeti üzerinde olumsuz etki yaptığı görülmüş; 70°C'de 15 saat otoklavda düşük basınçlı buhar kürüyle ise kireç-kumtaşı tuğlasına benzer özelliklerde ve 450-550 kgf/cm^2 mukavemete sahip tuğla üretmenin mümkün olduğu belirtilmiştir [7]. Aynı araştırmacıların farklı bir puzolan türü ile yapmış oldukları

diğer bir çalışmada, kür sıcaklığının 60°C'den 75°C'ye arttırılması, basınç dayanımında belirgin bir artış sağlamış ve malzeme porozitesinin azalmasına neden olurken 75°C'den 90°C'ye arttırılması toplam poroziteyi arttırmıştır. Kür süresinin 8 saatten 72 saate çıkartılması ise malzeme mukavemetini %40 arttırmıştır [8]. Diğer bir çalışmada, puzolan katkılı kireç harcının özellikleri üzerinde otoklav ve etüv kürünün etkileri incelenmiş, sıcaklık artışının malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği, etüvde 70°C'de 7 gün kür ile elde edilen mukavemet değerinin otoklavda daha yüksek sıcaklıkta 10 saatte sağlandığı görülmüştür [9]. Bu makalede, Datça Bölgesi'ndeki doğal puzolanla kireç karışımından elde edilen bağlayıcının mukavemet gelişimi üzerinde düşük sıcaklık ve buhar basınçlı otoklav kürü koşullarının etkisi irdelenerek bölücü duvar malzemesi üretim olanakları araştırılmıştır.

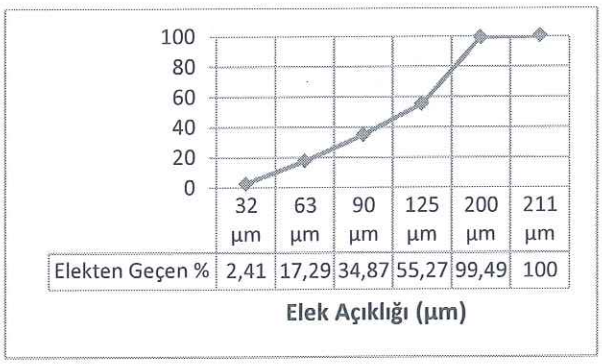
2. MALZEME VE YÖNTEM

Hidrate kireç, laboratuvarda su ile söndürüldükten sonra "sönmüş hidrate kireç" olarak harç karışımında kullanılmıştır. Doğal puzolan Datça Bölgesi'nden temin edilmiş ve deneylerde kullanılmak üzere önce 70°C etüvde kurutulup öngörülen granülometriye getirilmiştir. Deney süreci iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada doğal puzolan toprak üzerinde TS 25'de belirtilen puzolanik aktivite deneyi yapılmıştır [10]. İkinci aşamada hazırlanan puzolan katkılı kireç harçları üzerinde sıcaklık, süre, nem gibi kür koşullarının etkisi irdelenmiştir. Karışıma giren maddelerin miktarı Çizelge 1'de belirtilmiştir.

Çizelge 1. Numunelerin karışım oranı

Kuru Kireç / Puzolan (%)	Kuru Kireç / Puzolan (gr)	Su / Kireç + Puzolan (Katı) (%)	Kirecin içindeki su oranı (%)	Sönmüş Kireç (gr)
35	315/900	35	57.63	743

Harçta kullanılan puzolanın en büyük dane boyutu 200 µm olarak belirlenmiş ve granülometrik dağılımı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Puzolanın granülometrik dağılımı

Otoklavda kür koşullarının malzeme özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak üzere yapılan bu çalışmada, otoklav kürü sonucundaki mukavemet gelişiminin sıcaklık, ortam koşulları ve su içindeki küre nazaran nasıl bir gelişme gösterdiğini gözlemlemek amacıyla sıcaklık, ortam ve su içindeki kür koşulları da deneysel süreç kapsamına alınmıştır. Bu bağlamda, malzemenin özellikleri üzerinde:

- Kür süresinin etkisini ölçmek amacıyla numuneler ortam koşullarında (20°C ve %50 RN) 7 ve 28 gün süreyle;
- Suyun etkisini ölçmek amacıyla numuneler su içerisinde (20°C) 7 ve 28 gün süreyle;
- Farklı sıcaklıkların etkisini ölçmek amacıyla numuneler 70 ve 90 C, %95 RN'de 7 gün süreyle;
- Farklı sıcaklık ve su buharı basıncı etkisini ölçmek amacıyla numuneler 70 ve 90°C ve basınç altında (sırasıyla 0.1 ve 0.4 bar), maksimum 3 bar basınç ve 180°C sıcaklığa çıkabilen Kerman Marka Dik otoklavda 6, 8 ve 10 saat süreyle kürlenmiştir.

Kür süresi sonunda numuneler 50°C etüvde 24 saat kurutulduktan sonra deneyler yapılmıştır. Her bir deney sonucu için üç numune hazırlanmıştır. Kürlenen numunelerden 3 adetine sırasıyla kapiler su emme, ağırlıkça su emme, birim hacim ağırlık, özgül ağırlık ve ultrases hızı fiziksel deneyleri, 3 adetine sırasıyla eğilme dayanımı ve basınç dayanımı mekanik deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 2'de gösterilmiştir. Numuneler, [XX/XX/XX/XX] şeklinde kodlanmıştır. Bu kodlamada sırasıyla: Ağırlıkça kuru kireç/puzolan oranı; Ağırlıkça su/katı oranı; Kür sıcaklığı; Kür süresi (gün ve saat olarak) yer almaktadır.

Çizelge 2. Kür koşullarına göre fiziksel ve mekanik deney sonuçları

Kür Koşulu	Numune Kodu	Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)	Ağırlıkça Su Emme (%)	Görünür Porozite (%)	Ultrases Hızı (km/s)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	E-modülü (kN/mm^2)
Ortam	35/35/20/07	1.39	24.05	33.42	1.43	5.74	0.82	2.84
	35/35/20/28	1.41	21.36	30.11	1.50	6.60	1.00	3.17
Su İçinde	35/35/20/07	1.43	19.59	28.01	2.16	6.68	1.11	6.73
	35/35/20/28	1.47	16.26	23.90	2.66	10.91	1.30	10.49
Etüv	35/35/70/07	1.36	21.40	29.10	2.33	10.21	1.01	7.38
	35/35/90/07	1.35	24.80	33.48	1.79	8.52	0.96	4.46
Otoklav	35/35/70/6	1.49	13.92	20.74	2.40	9.86	1.47	8.26
	35/35/70/8	1.41	19.68	27.74	2.15	9.45	0.86	6.61
	35/35/70/10	1.39	21.32	29.63	2.05	8.79	0.51	5.87
	35/35/90/6	1.39	18.72	26.02	2.02	8.52	1.00	5.72
	35/35/90/8	1.31	23.77	31.13	1.35	8.31	0.51	2.39
	35/35/90/10	1.29	25.64	33.07	1.33	8.21	0.30	2.27

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Puzolanik Aktivite

TS 25'e göre, kireç-puzolan karışımı ile hazırlanan numunelerin 7 günlük eğilmede çekme dayanımı en az 1N/mm² ve basınç dayanımı en az 4 N/mm² olmalıdır. Ayrıca puzolanın özgül yüzey alanının 4000 ±

%25 cm^2/gr ve içerdiği $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ oranının en az %70, MgO ve SO_3 oranının sırasıyla en fazla %5 ve %3 olması gerekmektedir. Datça toprağının ve bu topraktan üretilen harcın TS 25'te belirtilen puzolanik aktivite deneyi için gereken fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3'te verilmiştir.

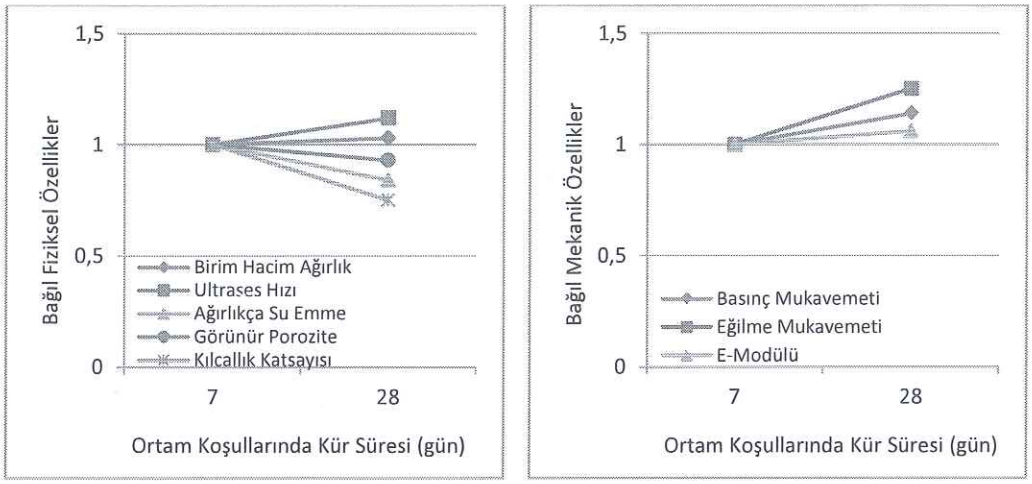
Çizelge 3. Puzolan ve harcın puzolanik aktivite için gereken kimyasal ve mekanik özellikleri

TS 25 Standart Gereksinimi	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ (%)	MgO (%)	SO_3 (%)	Özgül Yüzey Alanı (cm^2/gr)	Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
	≥ %70	≤ %5	≤ %3	4000 ± %25	≥ 4	≥ 1
Datça Toprağı	86.52	0.44	-	5278,71	-	-
Puzolanik Harç					6,12	1,43

Datça toprağının kimyasal analizi ve özgül yüzey alanının standartta belirtilen değerlere uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca 7. günde test edilen numunelerin eğilmede çekme dayanımı ve basınç dayanımının standart değerlerinin üstünde çıkmasıyla, bu toprağın puzolanik özellikte olduğu belirlenmiştir.

3.2. Ortam Koşullarında Kürleme

Kireç-puzolan harcının ortam koşullarında 7 ve 28 gün süreyle kürlenmesi sonucunda kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Buna göre;



Şekil 2. Ortam koşullarında kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikler

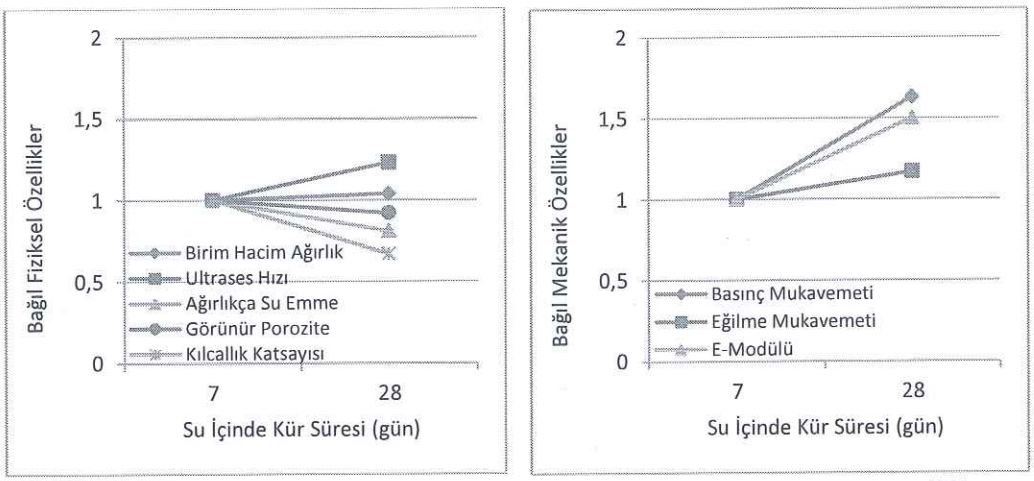
Malzemelerin fiziksel özellikleri genelde içyapıdaki boşluklarla ilişkili olup boşluk oranı (porozite) malzemenin; mukavemeti, yoğunluğu, su emme miktarı, ısı, buhar ve ses geçirimliliği hakkında bilgi verir. Ortam koşullarında kürlenen numunelerin porozite oranı 28. günde 7. güne göre 0.90 kat azalmıştır. Porozitenin zaman içinde azalması, kireç-puzolan harçlarının yavaş gelişen puzolanik reaksiyonuna ve karbonatlaşmaya bağlı olduğu söylenebilir [12]. Birim hacim ağırlığı, numune bünyesindeki boşluk gelişimine bağlı bir fiziksel özellik olup porozite ile ters orantılı olarak artmakta

veya azalmaktadır. Ortam koşullarında kürlenen numunelerin, porozite azalışına ve gözenek boyutlarının küçülmesine bağlı olarak; birim hacim ağırlık değerlerinin zamanla 1.01 kat arttığı ve ağırlıkça su emme oranının 0.88 kat azaldığı tespit edilmiştir. Kapiler su emme, malzeme yüzeyleri su ile temas ettiğinde suyun yüzey gerilimi ile kılcal boşluklardan yukarı doğru yükselmesidir. Duvar bloğu için kapilaritenin yüksek olması, zemin suyunun çok yükseklere çıkmasına neden olabilirken, kapiler suyun buharlaşması çiçeklenmeye neden olur. Ortam koşullarında kürlenen numunelerin boşluk oranının zamanla azalması, kılcal etkiye bağlı olarak su emme miktarının da 0.83 kat azalmasına neden olmuştur.

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 neden olmaktadır. Ses geçiş hızının çok düşük değerlerde olması, malzemenin yapısında çok fazla boşluk olduğunun göstergesidir [13]. Ultrases hızının tespiti, malzemenin boşluk yapısı ile birlikte, malzemedeki bozulmalar, çatlak oluşumu, elastiklik modülü ve dayanım gibi özelliklerde de bilgi vermektedir. Ortam koşullarında kürlenen numunelerin ultrases hızı zamana bağlı olarak 1.04 kat artış göstermiştir. Numunelerde ses geçiş hızının artması zamanla harcın dayanımının da arttığı yönünde yorum yapılmasına olanak tanımıştır. Mekanik deneyler sonucunda, numunelerin 7. günden 28. güne; basınç mukavemeti 1.1 kat artarak 6.60 MPa, eğilme mukavemeti 0.82 kat artarak 1.00 MPa ve elastiklik modülü 1.11 kat artarak 3.17 kN/mm^2 değerine ulaşmıştır. Nitekim bu sonuçlar, fiziksel deneylerde elde edilen bulgular ile örtüşmüştür. Ancak ortam koşullarında 7 gün kür sonucunda numunelerin mekanik mukavemet değerleri puzolanik aktivite (55 C, 7 gün) deneyindeki değerlerin gerisinde kalmıştır. Bu durum kireç-puzolan harcının mekanik mukavemetinin gelişiminde ilk zamandaki kür sıcaklığının önemini ortaya koymuştur.

3.3.Su İçerisinde Kürleme

Kireç-puzolan harcının su içerisinde 7 ve 28 gün süreyle kürlenmesi sonucunda kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikleri Şekil 3'de gösterilmiştir.

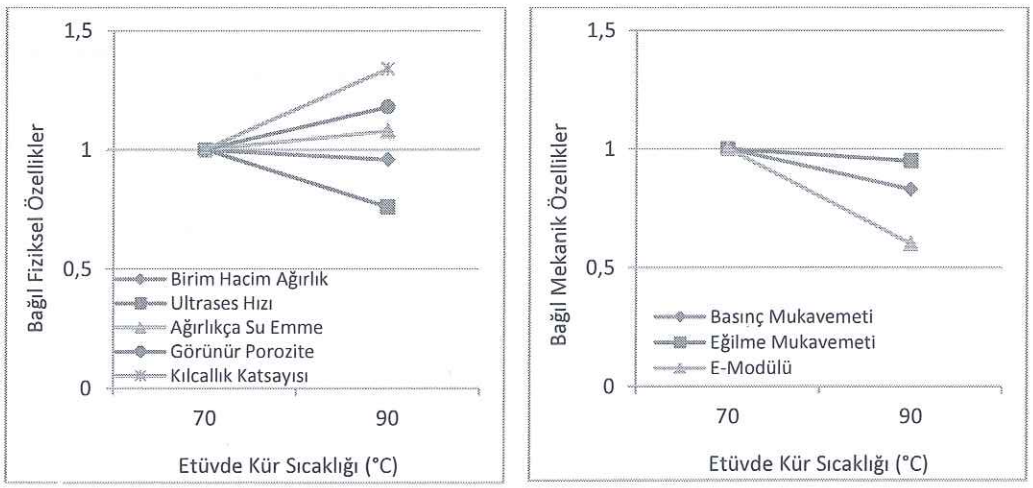


Şekil 3. Su içinde kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikler

Su içerisinde kürlenen numunelerin porozite oranı, 28. günde 7. güne göre 0.85 kat azalmış ve porozitedeki azalışa bağlı olarak numunelerin birim hacim ağırlık değeri 1.01 kat artmış, ağırlıkça su emme oranı 0.88 kat ve kılcal etkiye bağlı olarak su emme miktarı da 0.70 kat azalmıştır. Su içerisinde kürlenen numunelerin ultrases hızı zamana bağlı olarak 1.23 kat artış göstermiştir. Ultrases hızının malzemenin dayanımı hakkında fikir yürütülmesinde etkili bir faktör olması ve su içerisinde kür ile ultrases hızındaki artış oranının ortam koşullarındaki küre nazaran % 18 daha fazla olması, fiziksel ve mekanik özelliklerin su içerisinde daha iyi bir şekilde geliştiğinin göstergesidir. Nitekim eğilme ve basınç dayanımı deneyleri ile bu durum ispatlanmıştır. Numunelerin 7. günden 28. güne; basınç mukavemeti 1.63 kat artarak 10.91 MPa, eğilme mukavemeti 1.17 kat artarak 1.30 MPa ve elastiklik modülü 1.55 kat artarak 10.49 kN / mm^2 değerine ulaşmıştır.

3.4. Etüvde Kürleme

Kireç-puzolan harcının etüvde 7 gün süreyle 70 ve 90°C'de kürlenmesi sonucunda kür sıcaklığının fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikleri Şekil 4'de gösterilmiştir. Buna gore kür sıcaklığının 70°C'den 90°C'ye arttırılmasıyla;



Şekil 4. Etüvde kür sıcaklığının fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikler

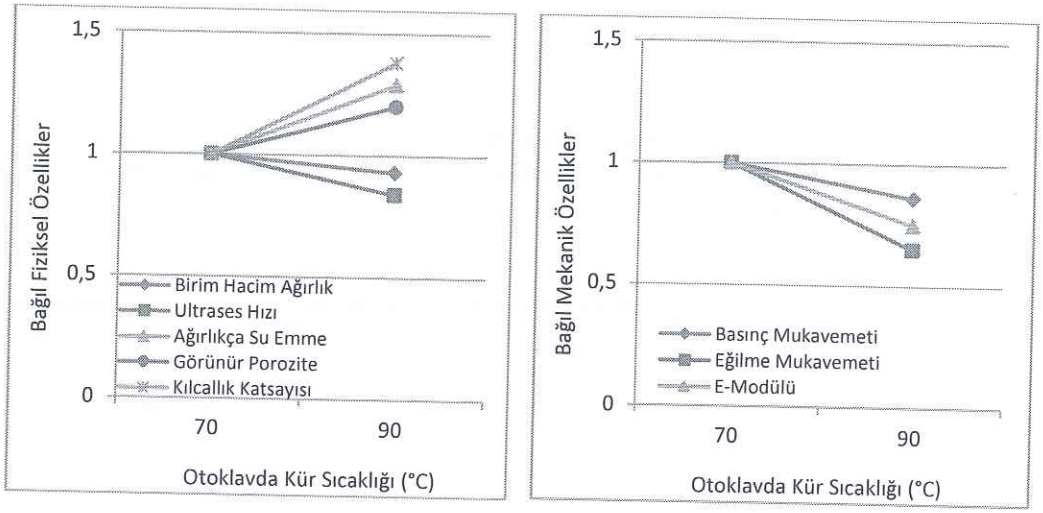
Harcın porozitesi 1.15 kat artmıştır ve poroz bir yapı meydana gelmiştir. Nitekim porozite artışına bağlı olarak birim hacim ağırlık değerinin 0.99 kat azaldığı, ağırlıkça su emme oranının 1.15 kat ve kapiler su emme katsayısının da 1.34 kat arttığı tespit edilmiştir. Porozite artışından beklendiği üzere, numunelerin ultrases hızı değeri de sıcaklık artışıyla birlikte 0.76 kat azalmıştır.

Kireç-puzolan harçlarının dayanımı kür sıcaklığına oldukça duyarlıdır. Yüksek kür sıcaklığı kireç-puzolan harcında daha düşük bir dayanıma neden olur [14]. Kür sıcaklığının 70°C'den 90°C'ye artmasıyla basınç mukavemeti 0.83 kat azalarak 8.52 MPa, eğilme mukavemeti 0.95 kat azalarak 0.96 MPa ve elastiklik modülü 0.60 kat azalarak 4.46 kN/mm^2 değerine ulaşması bu bilgiyi doğrulamıştır. 70°C'nin üzerindeki kür sıcaklığının malzeme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak kireç-puzolan hidratasyonu ana bileşeni C-S-H'a kimyasal olarak bağlı suyun 95-

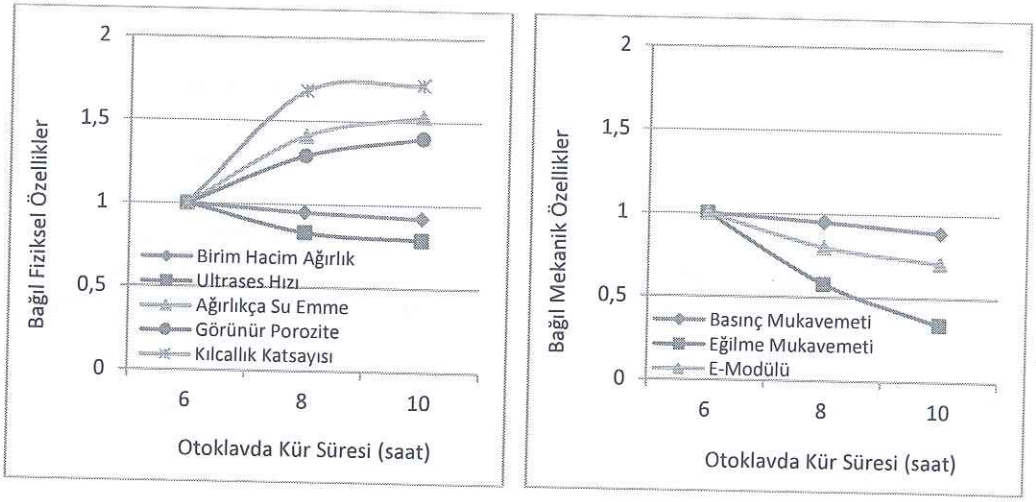
120°C arasında dehidrate olmaya başlaması ve bağlayıcı matrisin önemli bir kısmının yapısının bozulması gösterilebilir [3]. Nitekim aynı koşullarda kürlenen Konya çevresindeki volkanik tüfler de kür sıcaklığının artışı karşısında aynı reaksiyonu göstermiştir [9].

3.5. Otokavda Kürleme

Kireç-puzolan harcının otoklavda 6, 8 ve 10 saat süreyle 70 ve 90°C'de kürlenmesi sonucunda kür sıcaklığının fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikleri Şekil 5 ve kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikleri Şekil 6 'da gösterilmiştir. Buna göre;



Şekil 5. Otoklavda kür sıcaklığının fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikler



Şekil 6. Otoklavda kür süresinin fonksiyonu olarak bağıl fiziksel ve mekanik özellikler

Kür sıcaklığının 70°C'den 90°C'ye arttırılmasıyla; numunelerin porozitesi 1.25 kat artmış olup bu artışa bağlı olarak; birim hacim ağırlık değeri 0.93 kat azalmış, ağırlıkça su emme oranı 1.41 kat ve kapiler su emme katsayısı da 1.34 kat artmıştır. Porozite artışının beklenildiği gibi, ultrases hızını 0.84 kat azalttığı tespit edilmiştir. Kür süresinin 6 saatten 10 saate çıkarılmasıyla; numunelerin porozitesi 1.42 kat artmış ve bundan dolayı birim hacim ağırlık değerinde 0.94 kat azalış, ağırlıkça su emme oranında 1.53 kat ve kapiler su emme katsayısı da 1.72 kat artış olduğu belirlenmiştir. Kür süresinin etkisiyle oluşan porozite artışı Şekil 1'de görüldüğü üzere numunelerin ultrases hızında 0.85 kat azalmaya neden olmuştur.

Otoklavda 6 saat kür süresince sıcaklığın 70°C'den 90°C'ye artmasıyla mekanik dayanımları genel olarak azaldığı belirlenmiş, basınç mukavemetinin 0.86 kat, eğilme mukavemetinin 0.68 kat ve elastiklik modülünün 0.69 kat düştüğü tespit edilmiştir. Ayrıca 70°C'de kür süresinin 6 saatten 8 ve 10 saate artmasıyla basınç mukavemeti sırasıyla 0.95 ve 0.89 kat, eğilme mukavemeti 0.58 ve 0.34 kat, elastiklik modülü ise 0.80 ve 0.71 kat azalmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, otoklavda kürlenen numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kür sıcaklığı ve kürleme süresi ile ters orantılı olarak geliştiği, 70°C'nin üzerindeki kür sıcaklığı ve 6 saatten daha uzun kür süresinin malzeme yapısını bozduğu belirlenmiştir. Bu bozulma, otoklavdaki sıcaklık ve buhar basıncı etkisiyle ve otoklav süresinin uzun olması sebebiyle oluşan C-S-H jellerinin, amorf yapıdan kristal yapıya dönüşerek kararsız hale gelmesi ve boşlukları dolduramaması sonucunda daha gözenekli bir içyapı oluşturması ile açıklanabilir [15].

3.6. Kür Koşullarının Değerlendirilmesi

Ortam koşullarında ve su içerisinde kürlenen malzemenin kür süresi arttıkça; doluluk oranı ve buna bağlı olarak birim hacim kütlesi, ultrases hızı ve buhar geçirgenlik direnç faktörünün arttığı, boşluk oranı, ağırlıkça su emme oranı ve kapilerite katsayısının ise azaldığı tesbit edilmiştir. Mekanik özelliklerin de fiziksel özellikler ile örtüştüğü, her iki kür koşulunda da mekanik dayanımın zamanla arttığı ve bu artış oranının su içindeki kürde daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 7 günlük kür süresinde su içerisinde kürlenen numunelerin basınç ve eğilme mukavemetinin ortam koşullarında küre nazaran sırasıyla %16 ve %35 fazla olması kireç-puzolan harcının mekanik mukavemetinin gelişiminde doyma noktasına yakın bir rölatif nem oranının olumlu etkisini göstermiştir.

Otoklavda 70°C'de kür ile aynı sıcaklıktaki etüv kürüne nazaran daha düşük porozite, daha az su emme oranı ve daha yüksek ultrases hızına sahip numuneler üretilmesi, otoklavda bulunan yüksek nem miktarının malzeme özelliklerinin gelişimi üzerinde pozitif bir etki yaptığını göstermiştir. Bu yüksek nem oranı ve sıcaklığın etkisiyle otoklavda, hidratasyon sonucunda oluşan C-S-H bileşikleri diğer koşullarda kürlenen numunelerdeki hidratasyon olayına göre daha hızlı oluşmuştur. Böylece malzeme daha kısa sürede yüksek dayanım kazanmıştır.

Ortam koşullarında kürlenen numunelerin bünyesinde bulundurduğu nemi kaybetmesini önleyecek herhangi bir muhafaza olmadığından yüzeylerinde kuruma sonucunda rötre çatlakları oluşurken su içerisinde, etüvde ve otoklavda bu tür çatlaklara rastlanılmamıştır.

Su içerisindeki malzemelerin mukavemet gelişiminin diğer kür koşullarına göre daha olumlu gerçekleştiği belirlenmiştir. Datça toprağının puzolanik özelliğinin araştırıldığı çalışma sonuçları da bu

bulguyu desteklemektedir [3]. Bununla birlikte, etüv ve otoklav küründe optimum sıcaklığın 70°C olduğu tespit edilmiş olup elde edilen değerler su içinde 28 gündeki basınç mukavemetine oldukça yakındır. Ayrıca 90°C'de etüvde kürlenen malzemenin 7 gün sonunda basınç mukavemetinin aynı sıcaklıkta otoklavda düşük basınçlı buhar kürü ile 6 saatte elde edilebilmesi çalışmanın önemli bir sonucudur. Otoklav kürü ile ürünlerin kısa sürede hazırlanabilmesi üretimde hızı ve pratikliği beraberinde getirecektir. Otoklavda 6 saatlik elektrik sarfiyatıyla üretilen numuneler kısa sürede kullanılabilir duruma gelirken, etüvde bu süre 7 güne çıkmaktadır. Bu durum malzemenin seri üretime hizmet vermesi açısından önemlidir.

Yapılarda kullanılan bölücü duvar malzemelerine ait birim hacim ağırlığı ve basınç mukavemeti ilişkisi Çizelge 4'te belirtilmiştir. Buna göre puzolan katkılı kireç harcının otoklavda 70°C'de 6 saat kürlenmesi sonucunda hızlı bir şekilde üretilen malzemenin mekanik mukavemet bakımından yapılarda bölücü pişmiş toprak, bimsblok, gazbeton ve kireç-kumtaşı duvar blokları yerine kullanılması mümkündür.

Çizelge 4. Bölücü duvar malzemelerin özellikleri

Malzeme	**Birim Hacim Ağırlık (gr/cm^3)**	**Basınç Mukavemeti (N/mm^2)**
Tuğla (dolu ve düşey delikli) [16]	1.2-2	6-24
Tuğla (yatay delikli) [16]	0.5-1.0	2.5-7.5
Bimsblok [17]	0.8-1.6	2.5-15.0
Gazbeton [18]	0.3-1.0	1.5-10
Kireç-kumtaşı tuğlası [19]	0.5-3	5-75
Datça Puzolanı	1.49	9.86

Tamir harçları üzerine yapılan çalışmada, geliştirilen puzolanik tamir harcının basınç dayanımı 1 ay sonunda 3.48 N/mm^2 ve 1 yıl sonra 5.67 N/mm^2 olarak tespit edilmiştir [20]. Bu çalışmada numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının bahsi geçen çalışmadan daha yüksek sonuçlar vermesi, üretilen harcın tarihi yapıların onarımında tamir harcı olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, Çizelge 5'te tarihi yapılarda kullanılan sıva ve derz harçları için gerekli olan özellikler verilmektedir [21].

Çizelge 5. Tarihi yapılarda kullanılacak sıva ve derz harçlarının özelliklerinin genel gereksinimleri [21]

Harç Türü	**Mekanik Özellikler**			**Su Davranışı**	
	Eğilme Mukavemeti (N/mm^2)	**Basınç Mukavemeti** (N/mm^2)	**Elastiklik Modülü** (N/mm^2)	**Hava Tabakası Kalınlığı** Sd (m)	**Kapilarite Katsayısı** ($kg/m^2/min^{1/2}$)
Kaba sıva harcı	0.2–0.7	0.4–2.5	2000–5000	≤0.08	1.0-1.5
İnce sıva harcı	0.2–0.7	0.4–2.5	2000–5000	≤0.10	-
Derz harcı	0.4–0.8	0.6–3.0	3000–6000	≤0.10	1.0-1.5
Datça Puzolanı	1.00	6.60	31700	-	1.5

Çizelge 5'e göre, ortam koşullarında 28 gün kür sonucunda numunelerin kapilarite katsayısı ve elastiklik modülünün çizelgede belirtilen değerlerle aynı, basınç ve eğilme mukavemetinin ise daha yüksek olması; bu malzemenin tarihi yapılarda da sıva ve derz harcı olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Bu tür kireçce zengin harçlar, diğer çimento katkılı kireç harçlarında görülmeyen bir

plastik bölge sergilerler. Dolayısıyla, bu harçlar kırılmadan önce yüksek derecede deformasyonu absorbe edebilirler. Bundan dolayı, tarihi yapıların hareketlerine uyum sağlayabilen bu harçlar restorasyon işlerinde kullanılmak için büyük bir potansiyele sahiptir [22].

4. SONUÇ

- Datça toprağı ve sönmüş hidrate kireçten üretilen puzolanik harcın fiziksel ve mekanik özelliklerinin, önceki çalışmada olduğu gibi, su içerisinde kürleme ile en etkili bir şekilde geliştiği belirlenmiştir.

- Etüv ve otoklavdaki kür koşullarında optimum sıcaklığın 70°C olduğu; daha yüksek sıcaklıklarda harcın fiziksel ve mekanik özelliklerini bozduğu tespit edilmiştir.

- 90°C'de etüv ve otoklav küründe mekanik özellikler bakımından aynı sonuçların elde edilmesi, otoklavda 6 saatlik kürle, etüvde oluşan 144 saatlik zaman kaybı ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca otoklavda 6 saatlik kürde yaklaşık 24 kW elektrik harcanırken, etüvde 6 günlük kürde yaklaşık 430 kW elektrik harcandığı tespit edilmiştir. Bu durum otoklav kürünün etüv kürüne göre 18 kat daha fazla elektrik enerjisi tasarrufu sağladığını göstermiştir.

- Az miktarda enerji kullanılarak mümkün olduğunca kısa sürede hızlı bir üretim gerçekleştirmek amacıyla, karışımın optimum üretim koşulunun otoklavda 70 °C sıcaklıkta 6 saat kür olduğu tespit edilmiştir. Bu koşulda üretilen bölücü duvar bloğunun, yapılarda bölücü pişmiş toprak, bimsblok, gazbeton blok ve kireç-kumtaşı tuğlasına alternatif olarak kullanilmasi olanaklıdır.

- Datça toprağı ve sönmüş hidrate kireçten üretilen puzolanik karışımın, tarihi yapılarda kullanılan sıva ve derz harçları için gerekli olan özellikleri sağladığı tespit edildiğinden bu harçların, tarihi yapilarda kullanilmasinin olanaklı olduğu da tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] ASTM C-618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, American Standarts and Testing Methods, 2005, US.
[2] Shi, C., Studies on Several Factors Affecting Hydration and Properties of Lime-Pozzolan Cements, Journal of Materials in Civil Engineering, 2001.13, 441-445, 2001.
[3] Akgül, E., Tanaçan, L., Evaluation of the Pozzolanic Activity of the Earth of Datça as a Building Material, International Journal of Architectural Heritage, 5:1, 1-26, 2010.
[4] Cerny, R., Kunca, A., Tydlitat, V., Drchalova, J. and Rovnanikova, P., Effect of Pozzolanic Admixtures on Mechanical, Thermal and Hygric Properties of Lime Plasters, Construction and Building Materials, 20, 849-857, 2006.
[5] Lanas, J., Alvarez, J.I., Masonry Repair Lime-Based Mortars: Factors Affecting the Mechanical Behavior, Cement and Concrete Research, 33, 1867–1876, 2003.
[6] Gutovic, M., Klimesch, D.S., Ray, A., Strength Development in Autoclaved Blends Made with OPC and Clay-Brick Waste, Construction and Building Materials, 19, 353–358, 2005.

[7] A.Marcialis, A., Massidda, L. and Sanna,U., Low Pressure Steam Curing of Compacted Lime-Pozzolana Mixtures, Cement and Concrete Research, 6, 497-506, 1976.
[8] Low temperature steam curing hydration of lime-fly-ash compacts, Cement and Concrete Research, 13, 887-894, 1983.
[9] Koçu, N., Konya Çevresindeki Volkanik Tüflerin Yapı Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi ve Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997, İstanbul.
[10] TS 25, Doğal Puzolan (Tras) - Çimento ve Betonda Kullanılan - Tarifler, Gerekler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, 2008, Ankara.
[11] TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları-Bölüm 1-Dayanım Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, 2009, Ankara.
[12] Papayianni, I., Stefanidou, M., Strength - Porosity Relationships in Lime-Pozzolan Mortars, Construction and Building Materials, 20, 700–705, 2006.
[13] Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri-İç Yapı ve Mekanik Özellikler, Cilt 1, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1981.
[14] Shi, C.,Day, R.L., Comparison of Different Methods for Enhancing Reactivity of Pozzolans, Cement and Concrete Research, 31, 813-818, 2001.
[15] Uygunoğlu, T., Ünal, O., Buhar Kürü Uygulanmış Pomzalı Hafif Betonun Özellikleri, Politeknik Dergisi, 10, 1, 111-116, 2007.
[16] TS EN 771- 1, Kâgir Birimler - Özellikler -Bölüm 1: Kil Kâgir Birimler (Tuğlalar), Türk Standartları Enstitüsü, 2005, Ankara.
[17] TS-2823, Bimsbetondan Mamul Yapı Elemanları, Türk Standartları Enstitüsü,1986, Ankara.
[18] TS EN 12602:2008+A1, Önyapımlı Donatılı Gazbeton Yapı Elemanları, Türk Standardları Enstitüsü, 2014, Ankara.
[19] TS EN 771-2:2011+A1, Kâgir birimler - Özellikler - Bölüm 2: Kireç kumtaşı kâgir birimler, Türk Standardları Enstitüsü, 2015, Ankara.
[20] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., and Kilikoglou, V., Hydraulic Lime Mortars for the Restoration of Historic Masonry in Crete, Cement and Concrete Research, 35, 1577-1586, 2005.
[21] Veiga, M.R., Fragata, A., Velosa, A.L., Magalhaes, A.C. and Margalha, G., Lime-Based Mortars: Viability for Use as Substitution Renders in Historical Buildings, International Journal of Architectural Heritage, 4, 177–195, 2010.
[22] Arandigoyen, M.,Alvarez, J.I., Pore Structure and Mechanical Properties of Cement–Lime Mortars, Cement and Concrete Research, 37, 767–775, 2007.