

ÖĞÜTÜLMÜŞ ZEOLİTİK DOĞAL PUZOLANIN ÇİMENTO HARCININ DAYANIM GELİŞİMİNE ETKİSİ*

Aytaç DİĞİŞ¹, Atiye TUĞRUL², Hasan YILDIRIM³

Özet

Beton bileşimine puzolanik karakterli malzemelerin dâhil edilmesi, hem dayanım gelişimine hem de dayanıklılığa katkıları nedeniyle yaygın başvurulan bir uygulamadır. Ayrıca puzolanik katkılar sayesinde betonun iç yapısında önemli bir kompozite artışı elde edilebilmektedir. Bu çalışmada çimentoya ikame öğütülmüş zeolitik doğal puzolanın (ZDP) harcın dayanım gelişimi üzerindeki etkileri ele alınmaktadır. Farklı kaynaklardan temin edilmiş üç ayrı ZDP numunesi ilk aşamada karakterizasyonu yapılmak üzere incelemeye tabi tutulmuş, ardından farklı oranda ikame ZDP içeren çimento harçlarında dayanım gelişimi ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar çimentoya ZDP ikamesinin harcın dayanım gelişimine özellikle ileri yaşlarda önemli ölçüde katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

1. GİRİŞ

Volkanik kayalar içerisinde bulunan levha yapılı bir hidrate alüminosilikat minerali olan doğal zeolit (DZ), birçok farklı uygulama alanında değerlendirilmektedir. Zeolitik puzolanlar çimento üretiminde, mineral katkı olarak beton bileşiminde ve farklı yapı malzemelerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çimento sanayisinin CO₂ emisyonlarının yaklaşık %7'sinden sorumlu olduğu tahmin edilmektedir [1, 2]. Bu nedenle, çimento veya beton içerisindeki klinker girdisinin azaltılması, çevreye etkileri bakımından büyük önem taşımaktadır.

Klinoptilolit minerali altere volkanik tüfler ve tuzlu, alkalın göl istifleri içerisinde milyon ton mertebesinde rezervler sunan

Influence of Ground Zeolitic Natural Pozzolana on Strength Development of Cement Mortar

Incorporation of pozzolanic materials into concrete composition is a well known practice for both enhancement of concrete strength and improvement of durability properties. Moreover, addition of pozzolanic material may significantly increase compactness of microstructure. This paper aims to examine influence of zeolitic natural pozzolana (ZNP) as a substitute for cement on strength development of cement mortar. Three ZNP samples obtained from different quarries in Turkey were initially studied for their characterization and then mortars with various ZNP substitution rates were evaluated for their strength development. Results attained show that ZNP substitution of cement is highly effective on the strength development of mortars especially at later ages.

en yaygın DZ türüdür. Tipik olarak klinoptilolit kristalleri 2-20µm boyundadır ve diğer ince taneli minerallerle birlikte bulunur. Levha yapılı bir mineraldir ve monoklinal kristallerden oluşur. Mohs sertliği 3,5-4,0 mertebesindedir.

Dünya DZ rezervlerini kesin rakamlarla ifade edebilmek mümkün olmamakla beraber öngörülen rezerv 100 milyar tonun üzerindedir. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı Dokuzuncu Kalkınma Planı (2007) verilerine göre, Türkiye'nin toplam rezervi (görünür+muhtemel, klinoptilolit+heulandit) 345 milyon ton mertebesindedir [3].

USGS (Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Dairesi) 2015 yılı verilerine göre, dünyada zeolit üretimi 2,78 milyon ton/yıl mertebesindedir [4]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı Maden İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2011 yılı

verilerine göre, Türkiye'nin üretimi ise 55 bin ton/yıl civarındadır [5].

Genel olarak doğal zeolitin puzolanik aktivitesinin mikrosilis ve uçucu kül arası bir mertebede olduğu ifade edilmektedir [6]. Puzolanın ileri yaşlardaki veya nihai aktivitesi kimyasal ve mineralojik bileşimi ile ilişkili iken, erken yaşlardaki aktivitesi ise temel olarak özgül yüzeyine bağlıdır [7].

Poon ve diğ. (1999), %15 oranında ikame DZ içeren harçlarda erken dayanımda gerileme, buna karşılık 28 gün ve sonrasında ise şahidinkine eş değer dayanım elde etmişlerdir [6].

Perraki ve diğ. (2010) tarafından yapılan araştırmada, %10 ve %20 oranında heulandit tipi DZ ikame edilmiş çimento hamurunda, şahide kıyasla belirgin kıvam suyu artışı görülmüştür [8].

¹⁾ aytacdigis@yahoo.com ²⁾ tugrul@istanbul.edu.tr ³⁾ hasanyildirim@itu.edu.tr / İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

Ahmadi ve Shekarchi (2010), %95 oranında klinoptilolit içeren karışımlardaki DZ miktarı arttıkça viskozitenin de arttığından ve kıvamı düzenlemek amacıyla daha fazla süper akışkanlaştırıcıya ihtiyaç duyulduğundan söz etmektedir [9]. DZ katkılı betonlarda süper akışkanlaştırıcı ile 3, 7, 28 ve 90 günde şahitten yüksek basınç dayanımı elde etmişlerdir [9].

2. MALZEME

Çalışma kapsamında hazırlanan harç karışımlarında TS EN 197-1/2002 Standardı'na uygun CEM I 42.5R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan CEM I 42,5R tipi çimentonun kimyasal özellikleri.

Toplam SiO₂	18,90	K₂O	0,65	ZnO	0,00
Çözünmeyen Kalıntı	0,30	Na₂O	0,14	SrO	0,12
Al₂O₃	5,04	TiO₂	0,28	Cl⁻	0,02
Fe₂O₃	2,72	P₂O₅	0,18	Kızdırma Kaybı	3,07
CaO	63,32	Cr₂O₃	0,04	Tayin Edilemeyen	1,43
MgO	1,55	MnO	0,08	Serbest CaO	1,10
SO₃	3,18				

Harç bileşiminde TS EN 196-1/2002'ye uygun standart kum ve şebeke suyu kullanılmıştır. ZDP numuneleri ise Gördes (Manisa) ve Bigadiç (Balıkesir) bölgelerinden temin edilmiştir.

3. DENEYLER

3.1. ZDP Numunelerinin Hazırlanması

Doğal zeolitin puzolanik aktivite gösterebilmesi ve dolayısıyla harçta mineral katkı olarak kullanılabilmesi için yeterince ince öğütülmüş olması gereklidir. Bu nedenle üreticiden temin edilen granüler ZDP numuneleri, 45µm elek bakiyesi (elek üstünde kalan) %30±3 aralığında olacak şekilde bilyalı laboratuvar değirmeninde öğütülmüştür. Hedef elek bakiyesi seçiminde, hem endüstriyel olarak hem de laboratuvarında elde edilebilme açısından makul sayılabilecek bir incelik değeri hedeflenmeye çalışılmıştır. Granüler ZDP numunelerinin tane boyu ve öğütüldükten sonraki elek bakiyesi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Granüler ZDP numunelerinin tane boyu ve öğütüldükten sonraki elek bakiyesi.

Numune No	Numunenin Alındığı Yer	Granüler Malzeme Boyu (mm)	45µm Elek Bakiyesi* (%)
ZDP3	Gördes (Manisa)	1,18-3	30,4
ZDP4		1-3	27,4
ZDP5	Bigadiç (Balıkesir)	2-5	31,2

* Hedeflenen 45µm elek bakiyesi %30±3

3.2. ZDP Numunelerinin Karakterizasyonu

3.2.1. Mineraloji ve Petrografi

ZDP numunelerinin XRD (X-ray Diffraction) yöntemi ile hesaplanan yaklaşık mineralojik bileşimi Tablo 3'te verilmiştir.

Numunelerde zeolit grubu minerali olarak klinoptilolit (Na, K)₆[Al₆Si₃₀O₇₂].20H₂O tespit edilmiştir [10].

Tablo 3. ZDP numunelerine ait XRD analiz sonuçları.

Numune Kodu	Mineral İçeriği* (%)			
	Feldspat	İllit	Klinoptilolit	Kuvars
ZDP3	24,0	4,8	55,8	15,4
ZDP4	21,0	4,8	45,7	28,6
ZDP5	12,9	2,4	35,7	49,1

*Yaklaşık

El numunelerinden hazırlanan ince kesitler polarizan mikroskop altında incelenmiştir. Zeolitik doğal puzolanların tüflerde geliştiği ve camsı yapıda oldukları belirtilmiştir [10].

3.2.2. Kimyasal Özellikler

Yaş Analiz

İncelenen ZDP numunelerinin yaş analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Yaş analiz için TS EN 196-2/2002 ve TS 25/2008

standartlarının gereklerine uyulmuştur. Numunelerin, TS 25/2008 Standardı'nda doğal puzolanlar için tanımlanmış $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (min %70), SO_3 (max %3), reaktif silis (min %25) ve klorür (max %0,1) sınır değerlerine uygun olduğu görülmektedir.

Puzolanik Aktivite

Puzolanik aktivite deneyi TS 25/2008 Standardı'nın Ek A kısmında tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Ancak standardın tarifindeki $4000 \text{ cm}^2/\text{g} + \%25$ Blaine inceliği hedefi dikkate alınmamış, $45 \mu\text{m}$ elek bakiyesi $\%30 + 3$ hedefine göre öğütülen ZDP numuneleri kullanılmıştır (Tablo 5). ZDP numunelerinin Blaine ve BET değerleri Tablo 5'te verildiği gibidir. Özgül yüzey ölçümünde TS EN 196-6/2010 Standardı'na uyulmuştur.

Tablo 4. ZDP numuneleri üzerinde yapılan yaş analiz sonuçları.

Numune Kodu	İçerik*		
	ZDP3	ZDP4	ZDP5
Kızdırma Kaybı (%)	11,95	9,82	12,06
Çözünmeyen Kalıntı (%)	37,75	51,9	44,66
Toplam SiO_2 (%)	66,94	72,2	66,06
Reaktif SiO_2 (%)	62,64	61,7	57,1
Al_2O_3 (%)	10,51	10,6	11,32
Fe_2O_3 (%)	2,16	2,35	1,26
CaO (%)	1,28	1,34	1,35
MgO (%)	2,49	1,57	3,14
Bilinmeyen (%)	3,28	1,7	4,12
Klorür (%)	0,004	0,003	0,005
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	79,61	85,1	78,64
SO_3 (%)	Eser Miktar	Eser Miktar	Eser Miktar
* Ağırlıkça %.			

Tablo 5. Öğütülmüş ZDP numunelerinin yoğunluk, Blaine ve BET değerleri.

Numune Kodu	Yoğunluk (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	BET (m^2/g)
ZDP3	2,13	10.070	43,4
ZDP4	2,27	10.080	47,1
ZDP5	2,21	13.640	23,9

TS 25/2008 Standardı'ndaki puzolanik aktivite tanımına göre, harç prizmalarının 7 günlük basınç dayanımı 4MPa'dan büyük olmalıdır. İncelenen ZDP numunelerinin puzolanik aktivitesi standarttaki sınır değer 3 katı mertebesindedir (Tablo 6). Bu durum, öncelikle yüksek reaktif silis miktarı olmak üzere, doğal zeolitlerin kimyasal bileşimlerinin ve yüksek incelekte öğütülmüş olmalarının ortak sonucudur. Kimyasal ve mineralojik bileşimleri farklı olmasına rağmen, ZDP numunelerinin puzolanik aktivite değerleri birbirlerine oldukça yakındır (Tablo 6).

Tablo 6. ZDP numunelerinin puzolanik aktivitesi (TS 25/2008'e göre).

Numune Kodu	Puzolanik Aktivite (MPa)
ZDP3	11,9
ZDP4	12,8
ZDP5	11,5

3.3. DeneYler

3.3.1. Harç Bileşimi

Harçların hazırlanmasında TS EN 196-1/2002 Standardı referans alınmıştır. Öğütülmüş ZDP çimentoya ağırlıkça ikame edilmiş, ancak ZDP yoğunluğunun çimentonunkinden düşük olması nedeniyle karışımın toplam hacminde ortaya çıkan artış, standart kum miktarı azaltılarak düzeltilmiştir. Dayanım sonuçlarını bire bir kıyaslayabilmek için sabit hacimli karışımlar hazırlanmıştır. Taze harcı prizma kalıba yerleştirirken kullanılan sarsma cihazının uyguladığı darbe sayısı da sabit tutulmuştur. Çalışmada yüksek çimento dozlu-düşük S/Ç oranlı (YD serisi) ve düşük çimento dozlu-yüksek S/Ç oranlı (DD serisi) olmak üzere iki ayrı harç serisi üretilmiştir. Öğütülmüş ZDP içeren harçlarda, şahit bileşimin çimento miktarı %12 azaltılmış ve bu %12'lik çimento karşılık karışıma farklı oranlarda öğütülmüş ZDP eklenmiştir. Hazırlanan tüm harçların bileşimi Tablo 7a ve 7b'de özet hâlinde verilmektedir. YD ve DD serisi şahit harçların 1m^3 için bileşimi Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 7a. YD serisi şahit ve öğütülmüş ZDP katkılı harçların bileşimi.

ZDP Kodu	CEM I		ZDP		Standart Kum (g)	Su (g)	Su/ (Çimento+ZDP)	Karışım No
	(%)	(g)	(%)	(g)				
-	100	450	-	-	1.350	260	0,578	YD-Şahit
ZDP3	88	396	12	54	1.329	260	0,578	YD-ZDP3-12
	88	396	18	81	1.295	260	0,545	YD-ZDP3-18
	88	396	24	108	1.262	260	0,516	YD- ZDP3-24
	88	396	36	162	1.195	260	0,466	YD- ZDP3-36
ZDP4	88	396	12	54	1.333	260	0,578	YD-ZDP4-12
	88	396	18	81	1.301	260	0,545	YD- ZDP4-18
	88	396	24	108	1.270	260	0,516	YD- ZDP4-24
	88	396	36	162	1.207	260	0,466	YD- ZDP4-36
ZDP5	88	396	12	54	1.332	260	0,578	YD-ZDP5-12
	88	396	18	81	1.299	260	0,545	YD- ZDP5-18
	88	396	24	108	1.267	260	0,516	YD- ZDP5-24
	88	396	36	162	1.202	260	0,466	YD- ZDP5-36

Tablo 7b. DD serisi şahit ve öğütülmüş ZDP katkılı harçların bileşimi

ZDP Kodu	CEM I		ZDP		Standart Kum (g)	Su (g)	Su/ (Çimento+ZDP)	Karışım No
	(%)	(g)	(%)	(g)				
-	100	360	-	-	1.426	260	0,722	DD-Şahit
ZDP3	88	317	12	43	1.409	260	0,722	DD- ZDP3-12
	88	317	24	86	1.355	260	0,645	DD- ZDP3-24
	88	317	36	130	1.301	260	0,582	DD- ZDP3-36
ZDP4	88	317	12	43	1.412	260	0,722	DD- ZDP4-12
	88	317	24	86	1.362	260	0,645	DD- ZDP4-24
	88	317	36	130	1.311	260	0,582	DD- ZDP4-36
ZDP5	88	317	12	43	1.411	260	0,722	DD- ZDP5-12
	88	317	24	86	1.359	260	0,645	DD- ZDP5-24
	88	317	36	130	1.307	260	0,582	DD- ZDP5-36

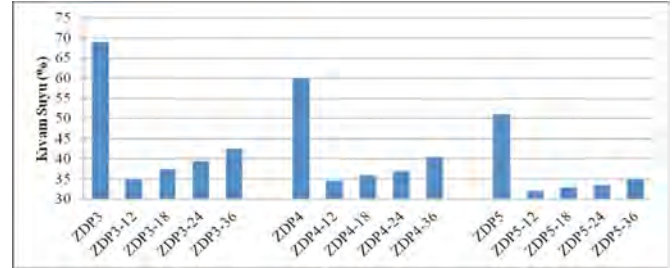
Tablo 8. Şahit harçların bileşimi.

	Yüksek Dozlu Seri	Düşük Dozlu Seri
Numune Kodu	YD-Şahit	DD-Şahit
Çimento (kg/m ³)	476	380
S/Ç	0,578	0,722
Standart Kum (kg/m ³)	1.428	1.505
Hava (%)	3,4	3,6

3.3.2. Deney Sonuçları Kıvam Suyu ve Yayılma

Kıvam suyu ihtiyacının ölçümü ZDP+su ve çimento+ZDP+su hamurlarında TS EN 196-3/2002'ye göre yapılmıştır. ZDP3, ZDP4 ve ZDP5 kodlu numunelerin kıvam suyu ihtiyacı sırasıyla %69, %60 ve %51 olarak ölçülmüştür (Şekil 1).

YD ve DD serisi harçların tamamı ASTM C 1437-07 Standardı'nda tarif edildiği şekilde yayılma deneyine tabi tutulmuştur. Yayılma ölçümlerinin sonucu Tablo 9'da verilmiştir. Karışımdaki ZDP miktarının artışına paralel olarak kıvamda (ve dolayısıyla ölçülen yayılma değerlerinde) önemli bir düşüş meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 1. Öğütülmüş ZDP hamuru ve çimento+öğütülmüş ZDP hamurunun kıvam suyu ihtiyacı.

Tablo 9. Harçların yayılma değerleri (ASTM C 1437-07'ye göre).

ZDP Kodu	Yüksek Dozlu Harç Serisi			
	Karışım No	CEM I 42.5R (%)	ZDP (%)	Yayılma (mm)
-	YD-Şahit	100	-	222
ZDP3	YD-ZDP3-12	88	12	173
	YD-ZDP3-18	88	18	148
	YD-ZDP3-24	88	24	121
	YD-ZDP3-36	88	36	110
ZDP4	YD-ZDP4-12	88	12	172
	YD-ZDP4-18	88	18	154
	YD-ZDP4-24	88	24	129
	YD-ZDP4-36	88	36	100
ZDP5	YD-ZDP5-12	88	12	199
	YD-ZDP5-18	88	18	192
	YD-ZDP5-24	88	24	174
	YD-ZDP5-36	88	36	148

ZDP Kodu	Düşük Dozlu Harç Serisi			
	Karışım No	CEM I 42.5R (%)	ZDP (%)	Yayılma (mm)
-	DD-Şahit	100	-	212
ZDP3	DD-ZDP3-12	88	12	177
	-	-	-	-
	DD-ZDP3-24	88	24	149
	DD-ZDP3-36	88	36	120
ZDP4	DD-ZDP4-12	88	12	175
	-	-	-	-
	DD-ZDP4-24	88	24	152
	DD-ZDP4-36	88	36	121
ZDP5	DD-ZDP5-12	88	12	197
	-	-	-	-
	DD-ZDP5-24	88	24	184
	DD-ZDP5-36	88	36	168

Eğilme ve Basınç Dayanımı

Harç numunelerinde eğilme ve basınç dayanımı ölçümü TS EN 196-1/2002 Standardı'nda tarif edildiği şekilde yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 10. YD serisi harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre).

ZDP Kodu	Karışım No	CEM I 42.5R (%)	ZDP (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)				Basınç Dayanımı (MPa)			
				2gün	7gün	28gün	56gün	2gün	7gün	28gün	56gün
-	YD-Şahit	100	-	4,9	6,2	7,8	8,1	27,7	39,7	50,9	56,0
ZDP3	YD-ZDP3-12	88	12	4,0	5,4	7,4	8,0	21,9	33,4	51,2	57,5
	YD-ZDP3-18	88	18	4,3	5,6	7,7	8,1	23,2	34,8	52,7	57,5
	YD- ZDP3-24	88	24	3,9	5,9	7,7	7,6	22,8	35,6	57,2	60,7
	YD- ZDP3-36	88	36	2,7	4,4	6,4	6,7	16,8	29,2	48,5	56,7
ZDP4	YD-ZDP4-12	88	12	4,4	5,6	7,5	8,0	23,4	34,9	50,5	56,0
	YD- ZDP4-18	88	18	4,3	5,6	6,9	7,5	24,5	36,5	53,0	57,0
	YD- ZDP4-24	88	24	4,0	5,5	7,4	7,9	25,0	37,1	57,8	61,0
	YD- ZDP4-36	88	36	3,4	4,6	6,9	7,0	24,7	35,6	53,4	61,0
ZDP5	YD-ZDP5-12	88	12	4,5	5,9	7,7	8,2	22,0	33,3	50,7	57,2
	YD- ZDP5-18	88	18	4,3	6,1	7,7	8,3	22,0	33,2	53,2	59,4
	YD- ZDP5-24	88	24	4,7	6,0	8,0	8,4	23,3	36,5	58,3	60,5
	YD- ZDP5-36	88	36	4,5	6,4	8,7	8,4	25,4	39,0	61,9	65,9

Tablo 11. DD serisi harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre).

ZDP Kodu	Karışım No	CEM I 42,5R (%)	ZDP (%)	Eğilme Dayanımı (MPa)				Basınç Dayanımı (MPa)			
				2gün	7gün	28gün	56gün	2gün	7gün	28gün	56gün
-	DD-Şahit	100	-	4,1	4,9	6,5	6,8	18,5	26,9	36,5	39,0
ZDP3	DD- ZDP3-12	88	12	2,1	4,2	6,5	7,1	13,4	21,4	37,0	39,6
	DD- ZDP3-24	88	24	2,4	4,0	6,5	7,2	13,2	21,7	38,8	42,8
	DD- ZDP3-36	88	36	2,6	3,8	6,3	6,8	13,7	22,7	42,5	46,6
ZDP4	DD- ZDP4-12	88	12	2,5	4,2	5,9	6,8	14,9	22,6	35,0	39,1
	DD- ZDP4-24	88	24	3,1	4,1	6,5	6,9	14,6	22,9	40,1	43,0
	DD- ZDP4-36	88	36	3,0	3,7	6,2	6,4	15,2	24,2	42,6	45,8
ZDP5	DD- ZDP5-12	88	12	3,2	4,1	6,3	6,8	14,3	22,5	36,5	41,3
	DD- ZDP5-24	88	24	3,0	4,3	6,6	7,3	13,6	22,4	38,7	44,6
	DD- ZDP5-36	88	36	3,1	4,7	7,1	7,3	14,8	24,4	43,7	48,1

YD serisinde, ZDP5 kodlu numunenin %12 katkı oranı ile 2 ve 7 günde şahit harcın dayanımının gerisinde kaldığı, 28 ve 56 günde ise şahide eş değer dayanım performansı sergilediği dikkati çekmektedir (Tablo 10). ZDP katkılı harçların eğilme dayanımı şahide kıyaslandığında ZDP5 en iyi olmak

üzere, ardından ZDP3 ve ZDP4 şeklinde sıralanmaktadır. Düşük kıvam nedeniyle harcın kalıba yeterince boşluksuz yerleştirilememiş olmasıyla ilişkili düşük eğilme dayanımı değerleri %36 oranında katkı içeren ZDP3 ve ZDP4 kodlu numunelerde dikkati çekmektedir.

DD serisindeki ZDP katkılı harçların eğilme dayanımı 2 ve 7 günde şahidin gerisinde, 28 günde şahide eş değer ve özellikle 56 günde ise şahidin üzerindedir (Tablo 11). %36 oranında çimentoya ikame ZDP içeren ZDP3 ve ZDP4 kodlu numunelerin eğilme dayanımlarındaki gerileme, harçların kalıba standart yöntemle yeterince boşluksuz yerleştirilemeyecek kadar kuru kıvamlı olması ile ilişkilidir.

YD serisinde ZDP katkılı harçların basınç dayanımının 2 ve 7 günde şahidin gerisinde kaldığı görülmektedir. %12 katkı oranı ile 28 ve 56 günde şahide eşdeğer ve özellikle katkı oranı %18 ve %24 mertebesine çıktığında hem 28 ve hem de 56 günde şahidin üzerinde basınç dayanımı ölçülmüştür. %36 oranında ZDP katkılı harçların basınç dayanımı, düşük kıvam nedeniyle kalıba yeterince boşluksuz yerleştirilememiş olmalarına rağmen, 56 günde şahide kıyasla ZDP4 kodlu numunede %9 kadar, ZDP5 kodlu numunede ise %18 kadar daha yüksektir.

DD serisindeki harçların basınç dayanımı gelişimi de genel durum itibarıyla YD serisinden farklı değildir. ZDP numunelerinin üçüyle de, katkılı harçların basınç dayanımı 2 ve 7 günde

şahidin gerisindedir. Ancak, ZDP katkılı harçlar %12 katkı oranı ile 28 ve 56 günde şahide eş değer ve özellikle katkı oranı %24 ve %36 mertebesine çıktığında hem 28 ve hem de 56 günde şahidin üzerinde basınç dayanımı sergilemektedir. %36 oranında ZDP katkılı harçların basınç dayanımı şahidinkine kıyasla 28 günde %16-20 mertebesinde, 56 günde ise %17-23 mertebesinde daha yüksektir.

Öğütülmüş ZDP katkılı harçların 28 ve 56 günlük eğilme ve basınç dayanımları DD ve YD serilerinin şahit harçlarının dayanımıyla kıyaslamalı olarak Tablo 12 ve Tablo 13'te verilmiştir. Özellikle DD serisi harçlar, 28 ve 56 günde uygun kıvamın da yardımıyla oldukça tutarlı bir ZDP artışına bağlı basınç dayanımını gelişimi sergilemektedir. ZDP5 kodlu numune ve %36 ZDP katkısı ile 56 günde şahit harca kıyasla %23,3 mertebesine daha yüksek dayanım elde edilmiştir.

Sabit S/Ç oranı ile boşluksuz yerleştirme için gerekli kıvamın elde edilebildiği %12, %18 ve %24 ZDP katkılı YD serisi harçlarda da durum aynıdır. ZDP5 kodlu numune ve %36 ZDP katkısı ile 56 günde elde edilen dayanım, şahidinkinin %17,7 kadar üzerindedir.

Tablo 12. Yüksek dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre)

ZDP Kodu		CEM I 42.5R (%)	ZDP (%)	Rölatif Eğilme Dayanımı (MPa)		Rölatif Basınç Dayanımı (MPa)	
				28gün (%)	56gün (%)	28gün (%)	56gün (%)
-	YD-Şahit	100	-	100,0	100,0	100,0	100,0
ZDP3	YD-ZDP3-12	88	12	94,2	99,4	100,6	102,6
	YD-ZDP3-18	88	18	98,7	100,0	103,5	102,6
	YD-ZDP3-24	88	24	98,7	93,8	112,4	108,3
	YD-ZDP3-36	88	36	81,4	83,2	95,4	101,2
ZDP4	YD-ZDP4-12	88	12	95,5	98,8	99,2	100,0
	YD-ZDP4-18	88	18	88,5	92,5	104,1	101,7
	YD-ZDP4-24	88	24	94,9	98,1	113,5	108,8
	YD-ZDP4-36	88	36	87,8	86,3	105,0	108,9
ZDP5	YD-ZDP5-12	88	12	98,1	101,9	99,6	102,1
	YD-ZDP5-18	88	18	98,1	103,1	104,6	105,9
	YD-ZDP5-24	88	24	101,9	103,7	114,6	107,9
	YD-ZDP5-36	88	36	111,5	104,3	121,6	117,7

Tablo 13. Düşük dozlu harçların eğilme ve basınç dayanımı (TS EN 196-1'e göre)

				Rölatif Eğilme Dayanımı (MPa)		Rölatif Basınç Dayanımı (MPa)	
ZDP Kodu		CEM I 42.5R (%)	ZDP (%)	28 Gün (%)	56 Gün (%)	28 Gün (%)	56 Gün (%)
-	DD-Şahit	100	-	100,0	100,0	100,0	100,0
ZDP3	DD-ZDP3-12	88	12	100,8	105,2	101,2	101,6
	DD-ZDP3-24	88	24	100,0	105,9	106,3	109,7
	DD-ZDP3-36	88	36	97,7	100,0	116,2	119,6
ZDP4	DD-ZDP4-12	88	12	90,7	100,7	95,7	100,3
	DD-ZDP4-24	88	24	100,0	102,2	109,7	110,3
	DD-ZDP4-36	88	36	96,1	94,1	116,7	117,4
ZDP5	DD-ZDP5-12	88	12	96,9	100,0	99,9	105,9
	DD-ZDP5-24	88	24	101,6	107,4	106,0	114,5
	DD-ZDP5-36	88	36	110,1	107,4	119,6	123,5

DD ve YD harç serilerinin ZDP5 kodlu numune ile sunduğu dayanım üstünlüğü ortalama %20 mertebesinde kabul edilecek olursa, saha şartlarında ZDP katkısı ile bir üst sınıf beton dayanımına ulaşılması mümkün görünmektedir.

4. SONUÇLAR ve YORUM

Çalışmada ulaşılan önemli sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Bu çalışmada harç bileşimine kıvamı düzenlemek amacıyla kimyasal katkı ekleyerek ilave bir parametre daha oluşturmaktan kaçınıldığı için, sabit S/Ç oranlı ZDP katkılı harçların yayılma değerleri şahit harca kıyasla gerileme göstermektedir. Bu olumsuzluk akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılarak dengelenebilir, ancak ilave maliyetlerle karşılaşılacağı dikkate alınmalıdır.

2. Endüstriyel uygulama şartları altında, ZDP katkılı harçların (özellikle yüksek oranda ZDP içerenler) düşük kıvamının akışkanlaştırıcı kimyasal katkılar kullanılarak ve S/Ç oranını artırmadan şahide eş değer kıvama yükseltilmesi durumunda (ki bu sayede prizmalarda daha yüksek kompasite elde edilebilecektir) daha yüksek eğilme ve basınç dayanımı değerlerine ulaşabileceği ve şahit bileşime kıyasla daha büyük fayda elde edilebileceği görülmektedir. %36 ZDP katkısıyla düşük dozlu seride üretilen harçların, şahide kıyasla yüksek dozlu seride üretilenlerden daha yukarıda dayanım sergilemiş olması bu tezi desteklemektedir.

3. Kimyasal katkı ilavesiyle ZDP katkılı bütün harç karışımlarının kıvamı şahit harç ile eş değer seviyeye getirilecek olursa, ZDP katkılı harç karışımlarının tamamında, puzolan ilave edilen karışımların genel mekanik davranışı olarak ortaya çıkan erken dayanım düşüşü de bir ölçüde telafi edilebilir. İlaveten, daha yüksek kimyasal katkı dozlarıyla S/Ç oranı şahidinkinin de aşısına çekilerek, ZDP katkılı karışımlar lehine bir durum elde edilebilir. Bu optimizasyon çalışmalarının tamamında uygulama koşulları ve fayda-maliyet dengesi gözetilmelidir.

4. Öğütülmüş ZDP katkılı harç ve beton bileşimleri sayesinde, birim hacim başına kullanılan klinker girdisindeki azalma yoluyla, atmosfere salınan CO₂ miktarında dikkate değer düşüş elde edilmesi mümkündür.

5. Doğal puzolanların beton durabilitesi üzerindeki olumlu etkileri bilinmektedir. ZDP katkılı betonlarda dayanım üstünlüğü dışında durabilite avantajı da elde edilebileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

6. Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar, incelenen numunelerin kaynağı, mineralojik bileşimi, inceliği, harç bileşimindeki ikame oranı ve harçların bileşimi ile sınırlıdır. Farklı koşulların farklı sonuçlara yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

Kaynaklar

1. Mehta, P. K., 1999, "Concrete Technology for Sustainable Development", Conc. Int., 21(11), 47-52
2. Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., Gartner, E. M., 2008, "Sustainable Development and Climate Change Initiatives", Cem. Concr. Res., 38(2), 115-127
3. T.C. Başbakanlık Devlet Planlama Teşkilatı, 2007, "Dokuzuncu Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu" Ankara, 202s.
4. United States Geological Survey web sitesi, www.usgs.gov, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/zeolites/mcs-2013-zeoli.pdf>
5. Maden İşleri Genel Müdürlüğü web sitesi, <http://www.migem.gov.tr/istatistikler>, erişim tarihi 9 Ocak 2017.
6. Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C., Lin, Z. S., 1999, "A Study on The Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes", Elsevier, Construction and building materials, 13, 427-432.
7. Hewlett, P. C., 2008, "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", 4th edition, Elsevier, 1057p.
8. Perraki, T., Kontori, E., Tsvilıs, S., Kakali, G., 2010, "The Effect of Zeolite on The Properties and Hydration of Blended Cements", Elsevier, Cement & concrete composites, 32, 128-133.
9. Ahmadi, B., Shekarchi, M., 2010, "Use of Natural Zeolite as Supplementary Cementitious Material", Cement & concrete composites, Elsevier, Vol. 32, 134-141.
10. Dığış, A., 2015, "Mineral Katkı Olarak Kullanılan Öğütölmüş Doğal Zeolitin Harç Özelliklerine Etkisi", Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 140s