



TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ

TRASLAR ve TRASLI ÇİMENTOLAR

(Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve
Durum Değerlendirmesi Raporu)

TÇMB / AR-GE / Y 99.2

İnş. Y. Müh. Korhan ERDOĞDU

Prof. Dr. Mustafa TOKYAY

İnşaat Mühendisliği Bölümü, ODTÜ

Kimya Y. Müh. Pelin TÜRKER

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği

Nisan 2011, ANKARA

9. BASKI

ISBN 975-8136-13-5

TÇMB / AR-GE ENSTİTÜSÜ

Yerleşim Adresi:

Ankara Teknoloji Geliştirme Bölgesi 1605. Cadde Dilek Binası
06800 Bilkent-Çankaya/ANKARA

Yazışma Adresi:

P.K. 2 Bakanlıklar 06582 ANKARA

Tel: 444 50 57 • Faks: (0312) 265 09 06

www.tcma.org.tr • info@tcma.org.tr

Kaynak göstermek kaydıyla bu kitaptan alıntı yapılabilir.

ÖNSÖZ

Çimento veya betonda uygun puzolanların, uygun miktarlarda, bilinçli bir şekilde kullanılması bir çok çevresel, teknik ve ekonomik faydalar sağlamaktadır. Bilindiği gibi ülkemiz zengin doğal puzolan yataklarına sahiptir. Bu zenginlik ancak ehil ellerde bahsedilen kazançlara dönüşebilir. Buradan hareketle, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği doğal puzolanların çimentolu sistemlerde kullanılmasıyla ilgili ülkemizdeki mevcut bilgi birikimine katkıda bulunmak amacıyla bu yayının hazırlanmasına karar vermiştir.

Bu kitapçıkta doğal puzolanlar üzerine yapılan araştırmalar gözden geçirilmiş ve elde edilen bilgi konularına göre sınıflandırılarak okuyucuya sunulmuştur. Kitapçıkta verilen tüm yargılar o konuda yapılmış olan geçmişteki araştırmalara dayanmaktadır. Genel olarak kitapçık Prof. Franco Massazza'nın "Lea's Chemistry of Cement and Concrete" isimli kitabın 4. Baskısı (1998) için hazırlanmış olduğu literatür taraması temel alınarak hazırlanmıştır. Diğer yandan D.J. Cook'un Cement Replacement Materials isimli kitap için hazırlanmış olduğu çalışmadan da geniş bir şekilde yararlanılmıştır. Bunların dışında, son 20 yıl için "Cement and Concrete Research" ve "ACI Materials Journal" başta olmak üzere çeşitli süreli yayınlar ve önemli sempozyumların bildiri kitapları taranmıştır. Verilen bilgilerin yanı sıra, kitapçığın sonunda sunulmuş olan kaynak listesi de doğal puzolanlar konusunda daha ayrıntılı bilgi edinmek isteyen araştırmacılara faydalı olacaktır. Bu kitapçığın hazırlanmasında kullanılan kaynakların büyük bir kısmı Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nin tüm araştırmacılara açık olan kütüphanesinde bulunabilir.

Değerli görüşleriyle bizlere yardım eden Sn. Ercan Bahadır ve Sn. Burhan Evcil'e ve kitapçığın basımına hazırlanmasında emeği geçen Sn. Kezban Yakut'a teşekkürü bir borç biliriz.

Çimento ve beton sektöründeki ilgililere faydalı olması dileğiyle.

Yazarlar Adına
Korhan ERDOĞDU
12.05.1999 Ankara, TÇMB

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	7
2. DOĞAL PUZOLANLARIN SINIFLANDIRILMASI ve OLUŞUMU	9
2.1. Piroklastik Kayaçlar	9
2.1.1. Gevşek Yapılı Kayaçlar.....	9
2.1.2. Sıkı Yapılı Kayaçlar (Tüfler)	10
2.2. Klastik Kayaçlar (Tortul Kayaçlar)	10
2.3. Karışık Kökenli Kayaçlar (Hibrit Kayalar).....	11
3. DOĞAL PUZOLANLARIN PUZOLANİK AKTİVİTESİ	15
3.1. Puzolanik Aktivite Ölçümü İçin Önerilen Yöntemler.....	16
3.2. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesini Etkileyen Etmenler	18
4. PUZOLANİK REAKSIYONUN ÜRÜNLERİ	22
5. TRASLI ÇİMENTOLAR	24
5.1. Traslı Çimentoların Üretimi	24
5.2. Traslı Çimentoların Hidratasyonu.....	25
6. TRAS YA DA TRASLI ÇİMENTO İÇEREN HARÇLAR ve BETONLAR	28
6.1. Taze Harç ve Beton Özellikleri	28
6.1.1. Kıvam ve İşlenebilirlik.....	28
6.1.2. Priz Süreleri	30
6.1.3. Hava Miktarı	31
6.1.4. Terleme.....	31
6.2. Sertleşmiş Harç ve Beton Özellikleri.....	31
6.2.1. Dayanım	31
6.2.2. Gözeneklilik ve Geçirgenlik	36
6.2.3. Dayanıklılı	38
6.2.3.1. Sülfatlara Karşı Dayanıklılık	38

6.2.3.2. Klor Etkisine Dayanıklılık	40
6.2.3.3. Alkali Agregat Reaksiyonuna Dayanıklılık.....	40
6.2.3.4. Donma Çözünme Etkisine Dayanıklılık	43
6.2.4. Büzülme (Rötre)	44
6.2.5. Sünme	46
6.2.6. Hidratasyon Isısı	46
7. TRAS ve TRASLI ÇİMENTO STANDARTLARI.....	49
7.1. Tras Standartları	49
7.2. Traslı Çimento Standartları.....	51
8. KAYNAKLAR.....	55

1. GİRİŞ

Amerikan Standardı ASTM C 618-94 "Betonda Mineral Katkı Olarak Kullanılacak Uçucu Kül ve Kalsine Edilmiş ya da Edilmemiş Doğal Puzolanlar İçin Şartname"de tanımlandığı şekli ile puzolanlar kendi başına bağlayıcı özelliği olmayan fakat öğütüldüklerinde nemli ortamlarda kireç ile birleşerek bağlayıcı özellik arzeden silisli ya da silisli-alüminli yapay ya da doğal inorganik maddelerdir. Uygun puzolanın uygun miktarlarda kullanılması çimento ve beton endüstrisine ekonomik, teknik ve ekolojik faydalar getirmektedir. Bu sebeple, puzolanların bu sektörde kullanımı her geçen gün artmaktadır.

Puzolanların sınıflandırılmasına ilişkin çeşitli öneriler olmakla birlikte, günümüzde yaygın olarak kabul edileni, bu malzemelerin kökenine dayanmaktadır. Buna göre, puzolanlar yapay ve doğal olarak iki temel gruba ayrılırlar. En bilinen yapay puzolanlar çeşitli endüstrilerin atık malzemeleri olan uçucu kül, endüstriyel cürufklar ve silis dumanıdır. Ayrıca bazı doğal malzemelerin ısıtılma tabi tutulmasıyla elde edilen puzolanik malzemeler de bu grup altında sınıflandırılmaktadır.

Doğal puzolanların hemen hemen tamamı volkanik kökenli malzemelerdir ve jeolojik anlamda yakın zamanlarda volkanik aktivitelerin meydana geldiği bölgelerde bulunurlar. Bu doğal malzemelerin kireçle karıştırıldıklarında bağlayıcı özellik kazandığı binlerce yıldır bilinmektedir. Romalılar kireç-doğal puzolan karışımını yapılarında kapsamlı ve bilinçli bir şekilde kullanan ilk topluluktur.

Anadolu toprakları volkanik aktivitelere maruz kalmış olması nedeniyle doğal puzolanlar yönünden son derece zengindir ve bu zenginlik ülkemize çok yönlü kazanımlar sağlamaktadır. Bunların başında çimento üretiminde enerji tasarrufu sağlanması ve bu yolla çevre kirliliğinin azaltılması gelir. Ayrıca doğal puzolan kullanımı, özel beton uygulamaları için normal portland

2. DOĞAL PUZOLANLARIN SINIFLANDIRILMASI VE OLUŞUMU

Giriş Bölümü'nde de tanımlandığı şekli ile puzolanlar; belirli şartların yerine gelmesiyle kireç ile birleşerek bağlayıcı özellik kazanan malzemelerdir. Bu bilginin ışığında doğal puzolanlar; belirtilen özelliği gösteren doğal kayaçlar olarak tanımlanabilir.

Puzolanlar genel olarak farklı uzmanlarca farklı sınıflandırmalara tabi tutulmuşlardır. Bu kitapçıkta F. Massazza'nın yapmış olduğu puzolanların kökenini temel alan sınıflandırma sunulmaya çalışılacaktır (bkz. Şekil 1) [1].

Doğal puzolanlar genel olarak çeşitli ülkelerin standartlarında tanımlanmıştır. Bu standartlardan bazıları Türk Standardı TS 25 "Tras", Amerikan Standardı ASTM C 618-94 "Betonda Mineral Katkı Olarak Kullanılacak Uçucu Kül ve Kalsine Edilmiş ya da Edilmemiş Doğal Puzolanlar İçin Şartname" ve Avrupa Standardı ENV 197-1 "Çimento Kompozisyonu, Şartnameleri ve Uygunluk Kriterleri Bölüm 1: Genel Kullanım Amaçlı Çimentolar"dır.

2.1. Piroklastik Kayaçlar (Volkanik Kayaçlar)

Bu tür malzemeler volkanik patlamalar neticesinde atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Patlama sırasındaki ani basınç düşüşü sıvı magma içerisinde çözünmüş olan gazların açığa çıkmasına sebep olur. Açığa çıkan gazların geride boşluklar bırakması nedeniyle katılaştıran parçacıklarda mikroskopik ve makroskopik boşluklu yapı görülür. Katılaştıran parçacıkların ayrıca ani soğumaya maruz kalması bu türden malzemelerde camsı yapı oluşmasını sağlar. Bu kapsamdaki malzemeler Massazza tarafından iki alt grupta toplanmıştır.

2.1.1. Gevşek Yapılı Kayaçlar

Bu başlık altında incelenen doğal puzolanlar kimyasal kompozisyon açısından çok geniş bir yelpazede bulunurlar. Bu grup eski çağlardan beri

kullanım alanı bulunmuş tipik İtalyan trasları (Compania, Latium...) ve ABD’de, Hindistan’da ve Türkiye’de bulunan gevşek yapılı kayaçları ve riyoilit’leri içerir. Örnek kimyasal ve mineralojik kompozisyonlar Tablo 1’den görülebilir.

2.1.2. Sıkı Yapılı Kayaçlar (Tüfler)

Volkanik kökenli tras yatakları, genellikle sıkışmamış parçacıkların metamorfoz ya da diğer doğal işlemlerle, hava etkisine maruz kalma (weathering) ve taşlaşmasından oluşan sıkışık katmanlarla (tüfler) beraber. Bulunur. Hava etkisine maruz kalma trasın camsı yapısının zeolitlenmesine (zeolitisation) ya da killeşmesine (argillation) sebep olabilir. Zeolitlenme trastaki camsı yapının dış etkilerle zeolit grubu minerallere dönüşmesidir. Killeşmedeyse camsı yapı kil minerallerine dönüşür. Zeolitlenme, malzemenin puzolanik özelliklerinde iyileşmeye yol açarken, killeşme içinn tam tersi bir durum söz konusudur [2, 3]. Kısaca genel olarak puzolanik tüfler, volkanik kökenli kayaçların zeolitlenmesi sonucunda oluşurlar. Zeolitlenme hızı ve oluşan zeolit minerallerinin tipi esas olarak basınç ve sıcaklık gibi çevre şartlarıyla beraber diğer bir çok faktöre bağlıdır. Tüflerde silika ve silika+alümina içeriği diğer volkanik kökenli malzemelerle benzerlik gösterir. Genelde kızdırma kaybı yüksektir ve minör element içeriği çok değişkendir [4]. Diğer yandan tüflerde, orijinal piroklastik kayacın camsı fazının zeolitlenmesi sebebiyle mineralojik yapı çok daha karmaşıktır [5]. Örnek kimyasal ve mineralojik kompozisyonlar Tablo 2’den görülebilir.

2.2. Klasik Kayaçlar (Tortul Kayaçlar)

Killer ve diatomitler topraklar, tortullaşmayla (sedimentation) oluşan puzolanik malzemelerdir. Killer volkanik kayaların değişiminden oluşurken, diatomitli topraklar mikroorganizmaların silisli iskeletlerinin tatlı su ya da deniz suyunda katmanlaşmasıyla oluşur. Her iki malzeme de farklı kökenlerine rağmen suda birikir, dolayısıyla, bu malzemeler doğada bir arada karışık halde bulunurlar.

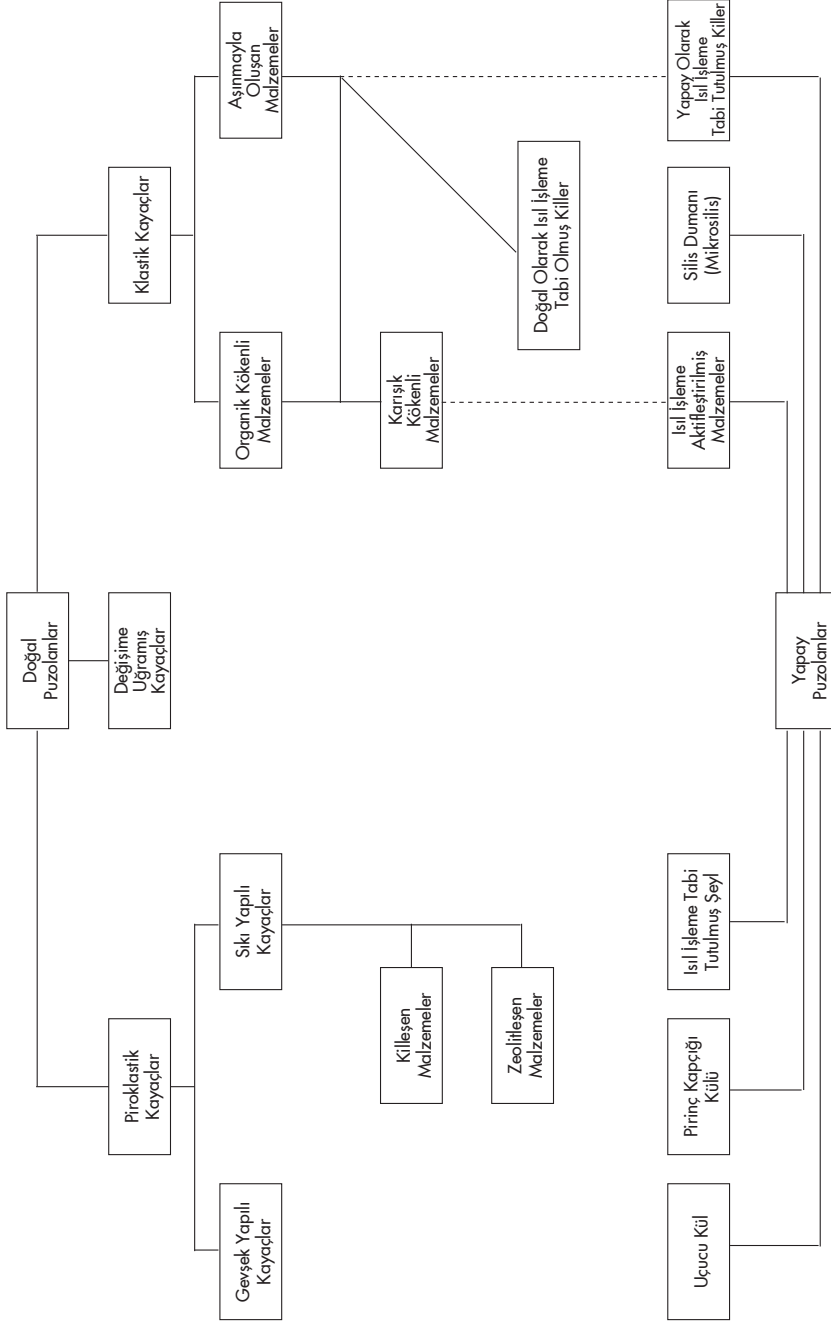
Genel olarak, kil mineralleri (özellikle montmorillonit grubuna dahil olanlar), kireçle tepkime vererek kalsiyum silikat ve alüminat hidratları oluştururlar [6, 7]. Fakat killerin puzolan olarak kullanımı; bunların, betonun su ihtiyacını artırarak dayanımını düşürmelerinden dolayı mümkün değildir.

Yüksek miktarda amorf silika içermesi ve yüksek özgül yüzeye sahip olmasından dolayı diatomitli topraklar kirece karşı ileri derecede reaktiftir. Fakat bu yapısına rağmen puzolanlı çimentolarda diatomit kullanımı sınırlıdır. Çünkü diatomitin son derece yüksek olan özgül yüzey alanı betonda su ihtiyacını artırır. Bununla beraber, küçük miktarlarda diatomit kullanımı, betonda plastikliğin daha uygun bir hale gelmesini ve terleme* miktarının azalmasını sağlar. Bazı diatomitli toprakların kimyasal tompozisyonları Tablo 3'ten görülebilir. Silis miktarı diatomitli topraktaki kil minerali miktarı azaldıkça artar. Alümina için ise tam tersi bir durum söz konusudur. Diatomitli topraklardaki opal miktarı % 25 - 100 arasında değişir. Opal dışındaki kısım kil minerallerinden ve kuvars, feldspat gibi başka minerallerden oluşur [8].

2.3. Karışık Kökenli Kayaçlar (Hibrit Kayalar)

Bu grupta aynı anda birden çok oluşmuş puzolanları bir arada bulunduran malzemeler vardır. Bu kapsama giren doğal puzolan yataklarında piroklastik, tortul ve organik kökenli yapılar katmanlar halinde bir arada olabilir.

* Terleme: Taze betonun kalıplara yerleştirilmesinden hemen sonra, betondaki karışım suyunun üst katmanlara doğru çıkması ve bu bölgelerde toplanması. Terleme neticesinde betonun su biriken katmanlarının su çimento oranı bölgesel olarak artar ve dayanımı düşer.



Şekil 1 : Puzonların sınıflandırılması (Massazza'ya göre) (1)

Tablo 1: Gevşek yapıllı kayaların kimyasal ve mineralojik kompozisyonu (1).

Puzolan	Ülke	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	KK	Aktif Fazlar	Aktif Olmayan Fazlar
Kula [29]	Türkiye	48.52	17.49	7.80	7.84	1.41	5.20	3.10	2.02	0.29	1.75	Camsı Faz	Augit, Abit, Hornblend
Barile	İtalya	44.07	19.18	9.81		6.66	1.64	1.12	0.97	Eser Miktarıda	4.42	Kısmi Bozunmuş Camsı Faz., Analsim	Piroksen, Olivin, Mika
Salone	İtalya	46.84	18.44	10.25	8.52	4.75	1.02	6.35	0.06	Eser Miktarıda	3.82	Camsı Faz, Analsim	Leucite, Piroksen, Alkali Feldspat, Mika
Vizzini	İtalya	50.48	16.77	11.59	4.86	5.24	0.87	0.17	0.08	0.15	9.68	Camsı Faz	Feldspat, Olivin, Kuvars, Kil Mineralleri
Valvic	Fransa	54.30	16.80	-	-	-	4.47	2.60	-	-	-	Camsı Faz	Andezin, Kuvars, Diopsit
Santorin toprağı [43]	Yunanistan	65.10	14.50	5.50	3.00	1.10	-	-	-	-	3.50	Camsı Faz	Kuvars, Anortit, Labradorit
Rhine Trası	Almanya	52.12		5.81	4.94	1.20	1.48	5.06	-	-		Camsı Faz	-
Bavaria Trası	Almanya	62.45		4.41	3.39	0.94	1.91	2.06	-	-	7.41	Camsı Faz, Chabasit, Analsim	Kuvars (%9), Feldpat (%15)
Riyolit Pümit	ABD	65.74	15.89	2.54	3.35	1.33	4.97	1.92	-	-	3.43	Camsı Faz	Kil (%5), Kalsit, Kuvars, Feldspat...
Higashi Matsuumae	Japonya	71.77	11.46	1.14	1.10	0.54	1.53	2.55	0.14	-	6.50	Camsı Faz	Kuvars (%1), Anortit (%1)

(1) Referans numarası olmayan veriler 1 numaralı kaynaktan alınmıştır.

(2) Al₂O₃ + TiO₂

Tablo 2: Bazı puzolanik tüflerin kimyasal ve mineralojik kompozisyonu (1).

Puzolan	Ülke	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	KK	Aktif Fazlar	Aktif Olmayan Fazlar
Bayburt [29]	Türkiye	57.74	12.14	3.84	4.84	0.55	0.64	2.50	0.73	0.30		Camsı Faz, Klinoptilolit	Kuvars, Sanidin, Illite
Rhenish Trası	Almanya	52.12	18.29	5.81	4.94	1.20	1.48	5.06	-	-		-	-
Sarı Tüf	İtalya	54.68	17.70	3.82	3.66	0.95	3.43	6.38	-	-	9.11	-	-
Zeolit (Klinoptilolit)	Japonya	71.65	11.77	0.81	0.88	0.52	1.80	3.44	-	0.34	9.04	Klinoptilolit	-
Tras K	Bulgaristan	71.63	10.03	4.01	1.93	1.22	2.35	-	-	3.05	-	-	-

(1) Referans numarası olmayan veriler 1 numaralı kaynaktan alınmıştır.

Tablo 3: Tortul kayaların kimyasal ve mineralojik kompozisyonu (1).

Puzolan	Ülke	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	SO ₃	KK	Aktif Fazlar	Aktif Olmayan Fazlar
Diatomit [84]	Türkiye	84.24	4.75	0.91	0.94	0.26	0.15	0.25	-	0.09	8.47	Amorf Faz	-
Ankara Diatomit [85]	Türkiye	88.32	3.47	0.48	0.42	0.26	0.17	0.28	0.18	-	5.84	Amorf Faz	-
Çankırı Diatomit [85]	Türkiye	82.75	7.24	1.21	0.98	0.47	0.20	0.34	0.40	-	5.71	Amorf Faz	-
Diatomit	ABD	60.04	16.30	5.80	0.92	2.29	-	-	-	-		Klinoptilolit	-
Moler	Danimarka	75.60	8.62	6.72	1.10	1.34	0.43	1.42	-	1.38	2.15	-	-

(1) Referans numarası olmayan veriler 1 numaralı kaynaktan alınmıştır.

3. DOĞAL PUZOLANLARIN PUZOLANİK AKTİVİTESİ

Puzolanik aktivite kavramı bir puzolanın bağlayabileceği en fazla Ca(OH)_2 miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir. Bahsedilen her iki değişken de puzolanın özelliklerine ve içerisinde bulunan aktif fazların kalite ve miktarına bağlıdır. Genel olarak, puzolanların heterojen bir yapıda olmaları ve hidrasyonun karmaşık yapısı nedeniyle puzolanik aktiviteyi açıklayıcı bir model geliştirilememektedir. Bununla beraber, bu hususta ancak genel eğilimler açıklanabilir. Bunların bir kısmı aşağıda özetlenmiştir [1];

1. Diğer özellikler aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarının fazla olması, bu puzolanda aktif olan madde miktarının da fazlalığına işarettir.
2. Bir puzolanın kısa dönemdeki aktivitesi esas olarak özgül yüzey alanına, buna mukabil uzun dönemdeki aktivitesi ise kimyasal ve mineralojik kompozisyonuna bağlıdır.
3. Bir puzolanın bağladığı Ca(OH)_2 miktarı, puzolanın aktif fazlarının içerisindeki SiO_2 miktarı ile ilişkilidir.
4. Belirli sınırlar dahilinde kireç-puzolan karışımlarında, kireç/puzolan oranının artması Ca(OH)_2 bağlanmasını artırır.
5. Zeolitik puzolanlar camsı puzolanlara göre genel olarak daha aktiftir.
6. Farklı puzolanlarda bulunan camsı fazlar farklı kireç bağlayabilme yeteneğine sahiptir.
7. Puzolan kireç karışımlarında ortamda su miktarının fazla olması bağlanan kireç miktarını artırır.

Isıtıldıklarında bir çok doğal puzolan, aktiviteyi etkileyen olumlu ve/veya olumsuz kimyasal ve yapısal değişikliklere uğrar. Olumlu etkiler genel olarak puzolanın camsı ya da zeolit fazındaki suyun kaybı ve killerin kristal yapısının

bozulmasıyla olur. Bununla beraber, ısıtılmayla hasil olan olumsuz etkiler ise özgül yüzey alanının azalması, camsı fazın bozunması (devitrification) ve kristalleşme neticesindedir. Bu iki tekinin bir araya gelmesiyle ısıl işlemin puzolanın aktivitesine ne yönde tesir edeceği puzolanın tabiatına, uyguhanan sıcaklığa ve ısıl işlemin süresine bağlıdır [9].

3.1. Puzolanik Aktivite Ölçümü İçin Önerilen Yöntemler

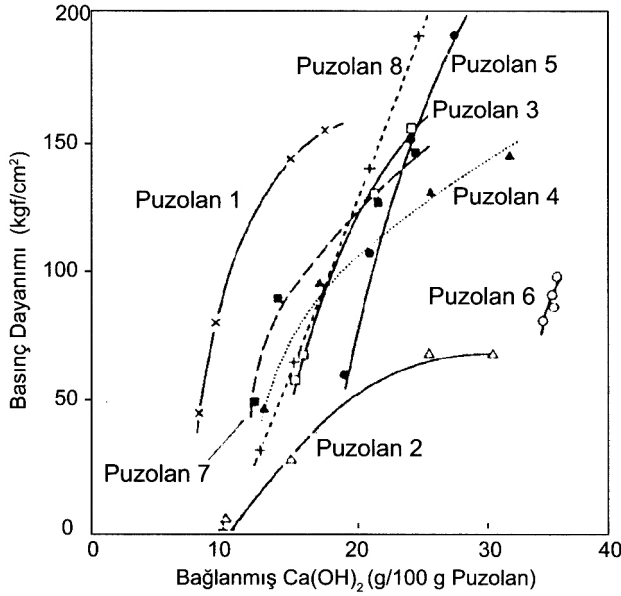
Herhangi bir puzolanın yetkinliğinin değerlendirilmesi için puzolanın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bağlayabilmesi ve reaksiyon hızı ile tanımlanan aktivitesinin belirlenmesi gerekir. Fakat her çeşit puzolana uygulanabilecek hız ve hassasiyet açısından kabul edilebilir bir test yöntemi henüz yoktur. Ayrıca farklı deney yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerini doğrular şekilde çıkmayabilir. Puzolanların aktivitesinin belirlenebilmesi için önerilen yöntemlere miyasal, fiziksel ve mekanik olarak üç ana grupta toplanmaktadır.

Kimyasal test yöntemlerinde puzolan doymuş kireç çözeltisine konduğunda ortamdaki belirli süreler içerisinde kalsiyum iyonları azalması tespit edilir. Böylelikle, herhangi bir puzolanın $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bağlayabilme kapasitesi ve hızı ölçülür.

XRD teknikleriyle de kireç-puzolan karışımlarında bağlanmış $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı tayin edilebilmektedir. Bu şekilde yapılan ölçümlere temel oluşturan bir araştırmada altı aylık ve bir yıllık numunelerde bağlanmış $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve dayanım arasında yüksek bir korelasyon bulunmuştur [10, 11].

Kireç-puzolan karışımında, puzolanik tepkimelerin sonucu olarak karışım sertleşir ve dayanım kazanır. Dayanım artışı puzolanın bağladığı kireç miktarı arttıkça artar (bkz. Şekil 2) [12, 13]. Fakat bu iki parametre arasında kolayca tanımlanabilecek bir ilişki yoktur. Aynı durum portland çimentosu-puzolan karışımlarının dayanımı ile kireç bağlanma miktarı arasındaki ilişki için de geçerlidir [14]. Bu sebepele, bağlanan kireç miktarının ölçülmesine dayanan test yöntemleriyle, çimentoda puzolan kullanımıyla elde edilecek

dayanımları tahmin etmek mümkün değildir. Dolayısıyla, puzolanların aktivitesinin değerlendirilmesi hususunda kireç-puzolan ya da portland çimento su-puzolan karışımlarının doğrudan dayanımını bulmak daha sağlıklı görünmektedir. Bu amaca yönelik olarak geliştirilmiş test yöntemlerinde puzolan, kireç ya da portland çimentosu ile belirli miktarlarda karıştırılır. Elde edilen bağlayıcı ile harç numuneleri hazırlanır ve bu numunelerin belirli sürelerdeki basınç dayanımı tespit edilir. Fakat bu türden mekaniksel test yöntemleri, kireç-puzolan ya da portland çimentosu-puzolan karışımlarında dayanım kazanımının zamanla çok yavaş olmasından dolayı, bazı olumsuzluklar içermektedirler [10].



Şekil 2. Bağlanmış Ca(OH)₂ ile basınç dayanımı arasındaki ilişki (numuneler 40 °C'lik suda 3, 7, 28 ve 90 günler için kürlenmiştir. (Puzolan/Ca(OH)₂: 100/40, su/portland çimentosu + puzolan: 0.6)

3.2. Doğal Puzolanların Puzolanik Aktivitesini Etkileyen Etmenler

Tüm puzolanların ve dolayısıyla doğal puzolanların aktivitesi açısından özgül yüzeyin, kimyasal kompozisyonun ve mineralojik yapının büyük rol oynadığı bilinmektedir. Fakat bunların birbirleriyle etkileşim içerisinde olmaları nedeniyle aktivite mekanizması oldukça karmaşıktır. Genel olarak, puzolan tarafından bağlanan kireç miktarının aşağıdaki etmenlere bağlı olduğu bir çok araştırma tarafından doğrulanmıştır [1, 10];

1. Aktif fazların yapısı
2. Puzolan içerisindeki aktif fazların miktarı
3. Aktif fazların SiO_2 içeriği
4. Karışımın kireç/puzolan oranı
5. Kütleme süresi

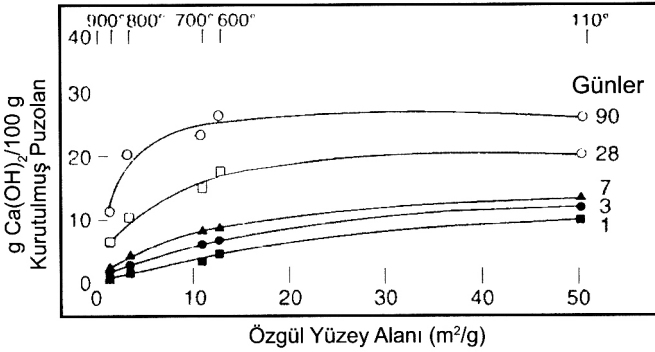
Bununla beraber kirecin bağlanma hızı;

1. Puzolanın özgül yüzey alanı
 2. Su/katı madde oranı
 3. Sıcaklık
- etkenlerine bağlıdır.

Doğal puzolan içeren sistemler için dayanım uzun dönemde doğal puzolanın $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ miktarına bağlıdır. Kısa dönemde ise doğal puzolanın özgül yüzey alanı dayanım açısından birinci derecede etkilidir [15]. $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SiO}_2$ içeriğinin artmasıyla uzun süreli dayanımın da artacağı yolundaki düşünce Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından yapılmış olan bir çalışmada da doğrulanmıştır [16]. Yine bu çalışmanın verilerine göre artan Fe_2O_3 konsantrasyonu, en azından yüksek konsantrasyonlarda (% 8'in üzerinde), doğal puzolanın aktivitesini azaltmaktadır.

Özgül yüzey alanı ile harç basınç dayanımı olarak tespit edilmiş puzolanik aktivite arasında her puzolan için geçerli olan genel bir bağıntı yoktur. Yapılan deneylerde dayanımın incelikle arttığı ve bu artışın yüksek inceliklerde nispeten daha az olduğu tespit edilmiştir [17]. Aynı durum bir başka çalışmada bağlanmış kireç miktarı için de tespit edilmiştir

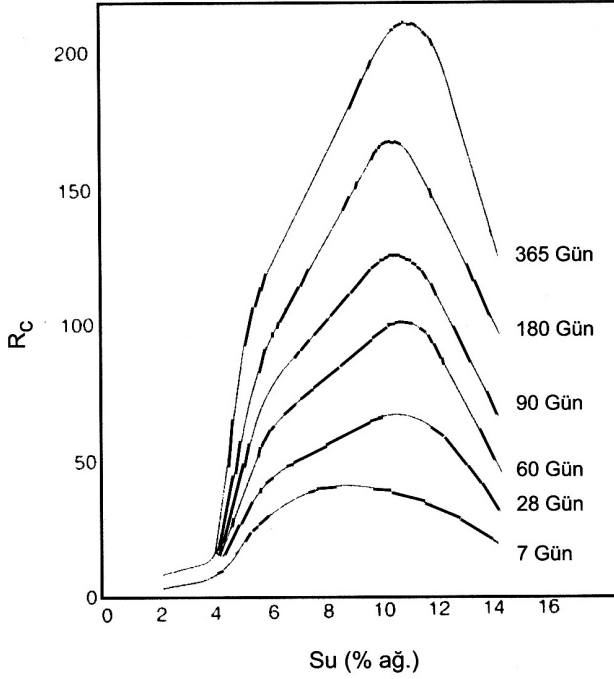
(bkz. Şekil 3) [9]. Bir başka araştırmada Alman trasları için kireç bağlayabilme ile puzolanın Blaine özgül yüzeyi arasında bir bağıntı verilmiştir. Fakat bu bağıntının başka puzolanlar için geçerliliği tespit edilememiştir [18]. Ayrıca kireç-doğal puzolan karışımıyla yapılan pastaların basınç dayanımı cinsinden ifade edilen aktivitesi ile doğal puzolanın inceliği arasındaki ilişkiyi hassas bir şekilde ifade eden bir başka çalışma daha vardır. Fakat elde edilen ilişki, çalışmada kullanılan Bolivya trası için geçerli olup bahsedilen önceki araştırmada da olduğu gibi bir genellemeye imkan sağlamamaktadır. Bu araştırmanın sonuçlarına göre trasın inceliği, erken yaşlardaki dayanım üzerinde, geç yaşlardakine göre daha etkilidir [19]. Sonuç olarak, puzolanın özgül yüzey alanı ile dayanım arasındaki ilişki her puzolanın kendine has bir özelliğidir ve dayanım arasındaki ilişki her puzolanın kendine has bir özelliğidir ve dayanım kazanımının bir çok değişkenin fonksiyonu olması nedeniyle bu konuda bir genelleme yapmak mümkün görünmemektedir.



Şekil 3. Isıl işleme tabi tutulmuş puzolanın özgül yüzey alanıyla bağlanmış kireç miktarı arasındaki ilişki (kireç/puzolan: 0.8, su/portland çimentosu + puzolan: 0.6, sıcaklık: 20 °C)

Karışım suyunun belirli bir noktaya kadar artışı, bağlanan kireç miktarını artırır [1, 10, 20]. Bu yargıyı doğrular şekilde harçların dayanımı ile karışımdaki su miktarı arasındaki ilişki Şekil 4'te sunulmuştur [21]. Harçlarda ya da pastada puzolanik tepkime, doymuş kireç çözeltisi içerisinde olduğundan daha yavaş seyredir.

Nitekim bu durum, puzolanın kireç bağlayabilme kapasitesinin ve hızının doymuş kireç çözeltisinde ölçüldüğü kimyasal test yöntemlerinin her zaman güvenilir sonuçlar vermemesine sebep olur.



Şekil 4. Su miktarının kireç-doğal puzolan harçlarının değişik yaşlardaki basınç dayanımına etkisi (kireç/puzolan: 0.2)

Kireç-doğal puzolan-su karışımına alçıtaşı ilavesi kireç bağlanma hızını artırır [22]. Fakat ortamda belirli bir miktardan fazla sülfat olması etringit oluşumuna sebebiyet verir ve bu oluşum aynen portland çimentolu betonlarda olduğu gibi ilerideki yaşlarda sertleşmiş betonda çatlaklara neden olur [1].

Puzolanik tepkimelerin hızı artan sıcaklıkla artar (bkz. Tablo 4) [23].

Tablo 4. Sıcaklığın kireç-doğal puzolan karışımlarının dayanım kazanma hızına etkisi [23].

	Farklı Sıcaklıklarda Kürleşmiş Numunelerin ⁽¹⁾ Çekme Dayanımı (kPa)							
	7 Gün				28 Gün			
	0 °C	12 °C	25 °C	35 °C	0 °C	12 °C	25 °C	35 °C
Santorin Toprağı	0	55	303	710	0	595	2185	2815
Kalsine Oil Şeyl	330	595	1040	1765	635	1660	2400	3140
Kalsine Kil	210	310	690	1310	345	1240	2240	3000

(1) 1/1/6; Kireç/doğal puzolan/kum oranlarında hazırlanmış harç numuneleri

4. PUZOLANİK REAKSİYONUN ÜRÜNLERİ

Kireç-puzolan tepkimesi, puzolanın tipinden bağımsız olarak, portland çimentosunun hidrate olmasıyla ortaya çıkan ürünlerle genel olarak aynı ürünleri verir. Olası farklılıklar küçüktür ve hidrasyon ürünlerinin yapısından çok miktarını etkiler [1, 10].

Kireç-doğal puzolan tepkimesi neticesinde literatürde aşağıda sıralanmış ürünlerin oluştuğu yönünde ortak bir görüş vardır [13, 24, 25];

1. C-S-H Formunda Kalsiyum Silikat Hidrat
2. C_4AH_x Formunda Kalsiyum Alüminat Hidrat ($9 \leq x \leq 13$)
3. Hidrate Gehlenit - C_2ASH_8
4. Kalsiyum Karboalüminat - $C_3A.CaCO_3.H_{12}$
5. Etringit - $C_3A.3CaSO_4.H_{32}$
6. Kalsiyum Alüminat Monosülfat - $C_3A.CaSO_4.H_{12}$

Bu ürünlerin varlığı esas olarak doğal puzolanın kimyasal içeriğine, ortamda kirecin varlığına ve çevre şartlarına bağlıdır. Bilindiği gibi doğal puzolanlar; silikanın baskın olduğundan, alüminyumun baskın olduğu kompozisyonlara kadar geniş bir yayılım göstermektedirler. Bu sebeple, her doğal puzolanın kireçle tepkimesi aynı ürünleri açığa çıkartmaz.

Yukarıda sıralanmış olan tüm ürünler bir arada bulunmaz. Örneğin, 6. ürün ortamda genellikle hidrasyonun ilk safhalarında bulunur ve zamanla etringite dönüşür. Muhtemelen karboalüminat, kalsiyum alüminat hidratin karbonatlaşmasıyla oluşur. Yüksek miktarda opal içeren doğal puzolanların kireçle tepkimesi yalnızca kalsiyum silikat hidrat verebilir [13].

Tablo 5'te farklı doğal puzolanlar için farklı şartlar altında oluşan ürünler sunulmuştur. Tablodan da görüleceği gibi, ortamda yüksek miktarda su bulunması halinde muhtemelen puzolanik tepkimenin daha hızla ilerlemesinin

bir neticesi olarak pastalarda ve kireç çözeltilerinde oluşan ürünler farklılık arz etmektedir [26]. Ayrıca pastalarda oluşan hidratasyon ürünleri, kireç çözeltilisinde oluşanlara göre daha küçük boyutlu ve daha düzensiz yapıdadır [27].

Tablo 5. Kireç-doğal puzolan karışımlarının hidratasyonu ile oluşan ürünler (1) Doymuş kireç çözeltilisinde (2) Pastada(1) [26]

		C-S-H	C ₂ ASH ₈	C ₄ AH ₁₃	C ₃ A.CaCO ₃ .H ₁₂	C ₃ AS ₃ -C ₃ AH ₆
Bacoli	1	+	+	-	-	-
Puzolanı	2	+	+	-	+	-
Segni	1	+	+	-	+	+
Puzolanı	2	+	+	-	+	-
Dehidrate	1	+	+	-	-	-
Kaolin	2	+	+	-	-	-
Napoli	1	+	+	+	-	-
Beyaz Tüfü	2	+	+	-	+	-
Rhine	1	+	+	+	-	-
Trası	2	+	+	+	-	-

(1) Pastalardaki su/katı madde: 0.40; pastalar 5 yıl kürlenmiştir.

Doğal puzolanın kireçle tepkimesiyle, puzolan içerisinde bulunan alkaliler zamanla gözenek çözeltilisine (pore solution) geçer. Bu şekilde açığa çıkan alkali miktarı tepkimenin gelişmesine, zamana, puzolanın inceliğine ve sıcaklığa bağlıdır. Doğal puzolanın yüksek miktarda alkali içermesi üretilen katkılı çimentonun alkali-agrega reaksiyonuna yatkın olmasını sağlayabilir. Fakat alkali agreg reaksiyonunun karmaşık yapısı nedeniyle bu yargı her zaman geçerli değildir.

5. TRASLI ÇİMENTOLAR

Tras kelimesi her ne kadar özel olarak bir tip doğal puzolanı tarif etmekteyse de ülkemizde tüm doğal puzolanlar tras ismiyle anılır. Ülkemizde aynı şekilde, TS26'ya göre % 19'dan fazla doğal puzolan içeren çimentolara da traslı çimento denilmektedir.

Tüm puzolanlar, giriş bölümünde de tanımlandığı gibi özel şartlar altında kireçle tepkime veren malzemelerdir. Kireç-doğal puzolan tepkimesi aynı şekilde portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da görülür. çünkü bilindiği gibi portland çimentosunda bulunan C_3S ve C_2S minerallerinin hidrasyonu ile $Ca(OH)_2$ açığa çıkar ve gözeneklerde çözelti halinde birikir. Portland çimentosu hidrasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$; suda çözünür ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak ortamı terk edebilir. Ayrıca $Ca(OH)_2$ betonda zararlı kimyasal etkilere en açık bileşiktir. Dolayısıyla, traslı çimentolarda portland çimentosu kısmının hidrasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ 'in puzolanlarla birleşerek dayanım kazanımını sağlayan CSH jelleri vermesi betonun dayanıklılığı açısından olumlu gelişmeler sağlar.

5.1. Traslı Çimentoların Üretimi

Traslı çimento üretimi için fabrikalarda çimentoya tras katılması işlemi iki yolla olabilir;

- i. Tras, portland çimentosu klinkeri ve priz süresini düzenlemek için bir miktar alçıtaşı beraber öğütülür.
- ii. Klinker alçıtaşı karışımı ayrı, tras ayrı öğütülür ve elde edilen öğütülmüş iki malzeme karıştırılır.

Beraber öğütme tekniğiyle daha homojen bir karışım elde edilebilmesine rağmen, üretilen çimentoda tane boyutu dağılımını kontrol etmek daha zor olabilir. Çünkü tras ve klinker farklı öğütülebilirliklerde malzemelerdir. Daha sert olan klinker, belirli bir incelikte çimento üretildiğinde trasa göre daha kaba kalır.

Diğer yandan, trasın ve klinkerin ayrı ayrı öğütülüp sonradan karıştırıldığı üretim tekniğinde çimentodaki klinker ve tras bileşenlerinin tane boyutu dağılımı daha iyi ayarlanabilmekle beraber, karışımın homojenleştirilmesi problemi vardır. Bu durum fabrikalarda uygun karıştırma sağlayan ekipmanlara ihtiyaç doğurmaktadır.

Türkiye’de genel olarak traslı çimentolar beraber öğütme tekniğiyle üretilmektedir.

Beraber öğütme tekniğiyle üretilen traslı çimentoların değirmende belirli bir inceliğe ulaşmaları için ton başına gereken enerji miktarını inceleyen bir araştırmada, aynı inceliğe ulaşmak için portland çimentosuna göre traslı çimentolar, çok daha az enerji tüketmiştir. Araştırmaya göre klinkerin trasla ikame oranı arttıkça bu durum daha da belirginleşmiştir. Aynı incelikteki portland çimentosu üretimi için gereken enerjinin yüzdesi olarak ifade edildiğinde, üretilen traslı çimentonun inceliği arttıkça, değirmende tüketilen enerji miktarı azalır. Başka bir deyişle yüksek incelikte traslı çimento üretimi, aynı incelikteki portland çimentosu üretimine göre daha yüksek oranlarda enerji tasarrufu sağlar [29].

5.2. Traslı Çimentoların Hidratasyonu

Esas olarak, kireç-doğal puzolan karışımlarında oluşan tepkimeleer portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da olur. Fakat portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında doğal puzolanın tepkime verebilmesi için gerekli kireç, karışımın suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda yoktur. Zamanla portland çimentosundaki C_3S ve C_2S minerallerinin hidratasyonu ile ortamda $Ca(OH)_2$ birikir ve tras puzolanik tepkimelerin neticesinde CSH jelleri vermeye başlar.

Çeşitli doğal puzolanlarla yapılan araştırmalara göre doğal puzolanlı çimentolarda bulunan portland çimentosu kısmının hidratasyonu trasın etkisiyle hızlanır. Bu durum genel olarak tüm ince öğütülmüş puzolanlar için

geçerlidir [10, 30]. Ayrıca opal ve allophane içeren doğal puzolanlar volkanik camsız faz içerenlere göre C_3S ile daha reaktiftir [31, 32]. Bir başka çalışmada ise yüksek aktifliğe sahip bir tuf kullanımıyla C_3S hidratasyonunun hızlandığı tespit edilmiştir [30]. Bu durum, doğal puzolan parçacıklarının, yüksek incelikleri nedeniyle, ortamda hidratasyon ürünü olan CSH jellerinin toplanabileceği bir yüzey arzetmesiyle açıklanmaktadır. Böylelikle doğal puzolan, ortamda CSH jellerinin toplandığı bir çekirdek görevi görmekte ve C_3S hidratasyonu ile açığa çıkan, göreceli olarak daha az geçirgen olan ve dolayısıyla, C_3S hidratasyonunu yavaşlatan CSH jellerinin C_3S üzerinde birikmesini önlemektedir [31]. Ayrıca ortamda doğal puzolanın varlığı C_3S hidratasyonunda hidratasyon ısı-zaman eğrisinde bazı değişikliklere yol açar. Eğride görülen durgun dönem (dormant period) kısalmır ve ikinci tepe nokta doğal puzolan olmayan duruma göre biraz daha yükselir [1, 10].

Ortamda doğal puzolan bulunması, C_3A hidratasyonunun hızını azaltır. Bu durum C_3A hidratasyon ısı-zaman grafiğinde ikinci tepe noktasının doğal puzolan bulunmayan duruma göre azalmasından kaynaklanır [32, 33]. İkinci tepe noktasının azalması puzolanın tipine ve buradan hareketle puzolanın inceliğine bağlı olabilir. Yapılan bir araştırma doğal puzolanın inceliğinin artmasının C_3A hidratasyon hızını yavaşlattığını göstermektedir. Fakat bu çalışmada tüm parametreler yeterince incelenmemiştir ve C_3A hidratasyon hızındaki yavaşlama esas olarak başka sebeplerden de kaynaklanabilir [34]. Aynı çalışmada doğal puzolanların hem laboratuvarda üretilen C_3A' 'nın hem de klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C_3A' 'nın hidratasyon hızını azalttığı tespit edilmiştir. Genel olarak bu yavaşlatıcı etki klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C_3A üzerinde daha etkilidir. 7 günlük kütleme neticesinde kullanılan puzolanın tipinden ve varlığından bağımsız olarak C_3A' 'nın hidratasyon dercesi % 90 civarında sabit olarak tespit edilmiştir [33].

Önemli klinker fazlarından sonra çimento bir bütün olarak ele alındığında ise portland çimentosunun yerine doğal puzolan ikame edildiği durumlar için şu yargılar söylenebilir (bkz. Şekil 11) [1, 13];

- i. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde görülen durgun dönem (dormant period) kısalır.
- ii. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde ikinci tepe noktası bir miktar yükselir.
- iii. Genel olarak, doğal puzolan katkılı çimentonun klinker kısmının hidratasyonu hızlanır.
- iv. Genel olarak, özgül yüzey alanı, kimyasal kompozisyon, yüzeyin fiziksel durumu ve alkalilerin çabuk ya da yavaş açığa verilmesi gibi puzolan özelliklerinin hepsinin klinker hidratasyonunun hızlanmasına etkisi olduğu söylenebilir.

6. TRAS YA DA TRASLI ÇİMENTO İÇEREN HARÇLAR ve BETONLAR

Puzolanlar, portland çimentosundaki klinker yerine ikame malzemesi olarak çimento üretiminde ya da öğütülmüş halde doğrudan betona katılarak kullanılabilir. Betona puzolan katılması halinde, eğer puzolan beton karışımındaki agregaların tane boyutu dağılımını (gradasyonunu) geliştirmek için bir kısım ince agrega yerine kullanılmışsa betonun kalitesini (dayanım ve dayanıklılık açısından) artırır. Fakat öğütülmüş puzolan betonda bir kısım portland çimentosu yerine kullanılmışsa bu durum beton kalitesinde aşağıdaki sebeplerden dolayı bazı düşüşlere yol açabilir [1, 10, 28];

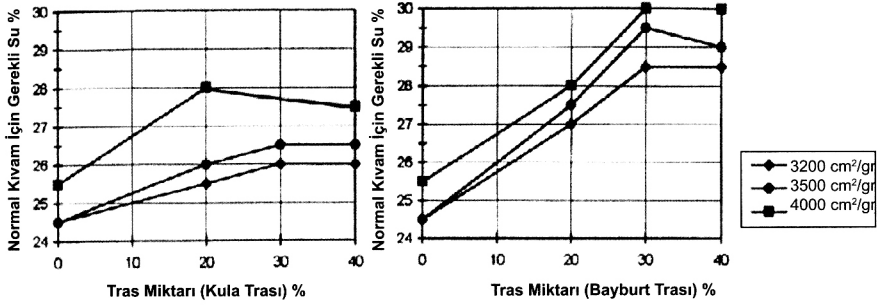
1. Genel olarak, çimento fabrikalarında elde edilen homojenlik, şantiyelerde sağlanamaz.
2. Betonda portland çimentosunun yerine yüksek miktarda puzolan kullanılması erken dayanımı kayda değer derecede düşürür.
3. Genellikle, şantiyelerde puzolan ve çimentonun kalite kontrolünün düzenli olarak yapılmasını sağlayacak personel ve ekipman yoktur.

6.1. Taze Harç ve Beton Özellikleri

6.1.1. Kıvam ve İşlenebilirlik

Portland çimentosu-doğal puzolan karışımının kullanıldığı betonlarda aynı kıvamı sağlamak için gerekli su bir miktar daha fazla olabilir [35, 36].

Beraber öğütme tekniğiyle üretilen ve portland çimentosu klinkeri yerine Türkiye'deki iki farklı trasın % 20, 30 ve 40 oranlarında kullanıldığı farklı inceliklerdeki çimentoların normal kıvamı üzerine yapılan bir çalışmada, Şekil 5'te sunulan sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre kullanılan doğal puzolanlar için çimentodaki ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gerekli su miktarı da artmaktadır. Ancak % 30 düzeyindeki tras miktarlarından sonra su ihtiyacı kayda değer derecede değişim göstermemektedir [29].



Şekil 5. Çimentodaki doğal puzolan miktarının normal kıvam için gerekli su miktarına etkisi (çimentolar, tras ve klinkerin beraber öğütülmesiyle üretilmiştir) [29].

Betondaki portland çimentosu ile aynı incelikte herhangi bir puzolan ikamesiyle betonun işlenebilirliği genel olarak fazla değişmez. Doğal puzolanlarlı harçlar üzerinde yapılan bir çalışmada, doğal puzolanların portland çimentosu yerine bir miktar kullanıldıklarında harçların işlenebilirliğini, düşük mertebelerde azalttığı tespit edilmiştir [37].

Betonda bir miktar portland çimentosu yerine doğal puzolan kullanılmasının çökme (slump) değerine etkisini inceleyen bir başka çalışmada çeşitli beton karışımlarında öğütülmüş skorya* (scoria) kullanılmış ve yüksek çimento dozaçılı betonlarda skorya ikamesinin çökmeyi azalttığı tespit edilmiştir. Bu azalma skoria ikame oranıyla doğru orantılıdır. Bununla beraber, 300 kg/m³ ya da daha az çimento dozaçılı betonlarda skoria kullanımı çökme üzerinde kayda değer etkiler yaratmamıştır [38].

Diatomitli topraklar aşırı derecedeki pürüzlü yüzeyleri ve dolayısıyla yüksek özgül yüzey alanları sebebiyle betonda işlenebilirliği zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla, bu malzemelerin kullanılması halinde betona akışkanlaştırıcı kimyasal maddeler katılmalıdır. Bununla beraber, diatomitli toprakların düşük miktarlarda kullanılması betonda terlemeyi önler ve plastikliğin artmasını sağlar [1].

* Scoria: Bir tür doğal puzolan.

6.1.2. Priz Süreleri

Portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarının kullanıldığı betonlarda priz başlangıcı ve sonu süreleri puzolanın portland çimentosu yerine ikame miktarına, inceliğine ve reaktifliğine bağlıdır. Farklı iki çalışmada % 20 ve % 25 mertebesinde doğal puzolan içeren çimentolarda, portland çimentosu içeren kontrol numuneleriyle yaklaşık aynı priz süreleri gözlenmiştir [35, 39]. Bununla beraber, yüksek miktarlarda doğal puzolan kullanımının (% 30-70 arası) priz sürelerini önemli miktarlarda geciktirdiği tespit edilmiştir [10].

Türkiye’de bulunan iki doğal puzolanla (Bayburt ve Kula Trasları) yapılan bir çalışmada; klinker ve doğal puzolanın % 4 alçıtışı ilavesiyle beraber öğütülmesi neticesinde üretilen farklı inceliklerdeki çimentolarda priz süresi üzerine incelemeler yapılmıştır. Bu çalışmada her iki tras da kullanılarak üretilen çimentoların priz alması için aynı klinkerden üretilen portland çimentolarına göre bir miktar daha uzun süreler gerektiği gözlenmiştir (bkz. Tablo 6) [29].

Tablo 6. Traslı çimentolarda farklı incelik ve tras ikame oranlarında priz başlangıcı ve priz sonu süreleri [29].

	İkame Oranı	İncelik (Blaine)					
		3200 cm ² /gr		3500 cm ² /gr		4000 cm ² /gr	
		Priz Baş. (dk)	Priz Sonu (dk)	Priz Baş. (dk)	Priz Sonu (dk)	Priz Baş. (dk)	Priz Sonu (dk)
Kula Trası Katkılı Çimentolar	% 20	165	240	135	225	120	180
	% 30	165	225	150	225	(1)	(1)
	% 40	180	240	150	225	150	210
Bayburt Trası Katkılı Çimentolar	% 20	165	240	135	225	150	240
	% 30	195	390	150	255	120	240
	% 40	195	390	180	375	165	340
Kontrol Numunesi PÇ		150	210	90	165	90	165

(1) Veri alınamamıştır.

6.1.3. Hava Miktarı

Betonda bulunan hava iki şekilde olabilir. Bunlardan birincisi tamamen tesadüfi olarak betonun karışması ve yerleştirilmesi sırasında kendiliğinden beton içerisine hapsolmuş havadır. İkincisi ise betonun donma-çözünme dayanımını arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanmak suretiyle betona bilinçli olarak sürüklenen havadır.

Tablo 8'den de görüleceği gibi düşük çimento dozajlı betonlarda betona belirli bir miktarda hava sürüklemek için gerekli hava sürükleyici katkı miktarı, betonda kullanılan pümisit ve diatomit miktarı arttıkça artmaktadır. Aynı durum betonda ısıtılma tabii tutulmuş doğal puzolanların kullanımı için de geçerlidir [40].

6.1.4. Terleme

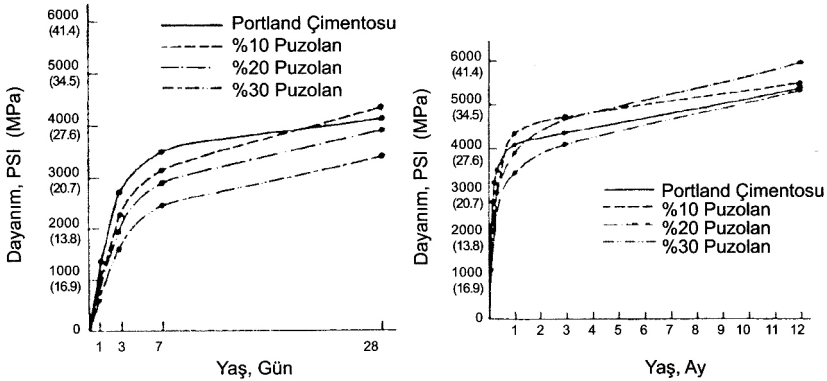
Betonda ya da çimentoda bir miktar portland çimentosu yerine doğal puzolan kullanılması terleme miktarını kayda değer mertebelerde azaltır (bkz. Tablo 8). Aynı şekilde kalsine edilmiş şeyl ve kaolinin de taze betonda terlemeyi azalttığı tespit edilmiştir [41, 42].

6.2. Sertleşmiş Harç ve Beton Özellikleri

6.2.1. Dayanım

Puzolan içeren betonlardaki dayanım gelişmesi, puzolanlı harçlar ve pastalarda hasil olan durumla benzerlik göstermektedir. Puzolanlar, betonda, klinkerin hidrasyonundan oluşan Ca(OH)_2 ile tepkime verirler ve bu sebeple betona karım suyu ilavesinden itibaren bir süre ortamda Ca(OH)_2 birikene kadar portland çimentosunu seyreltici bir etki yaparlar. Fakat zamanla ortamda Ca(OH)_2 birikmesi puzolanların da sistemin dayanımını arttıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlar. Bu sebeple, puzolan kullanımıyla erken dayanımlarda bir düşüş olması beklenir. Sonuç olarak, portland çimentosu-puzolan karışımı içeren betonlar aynı inçelikteki portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süreli küremeye ihtiyaç duyarlar.

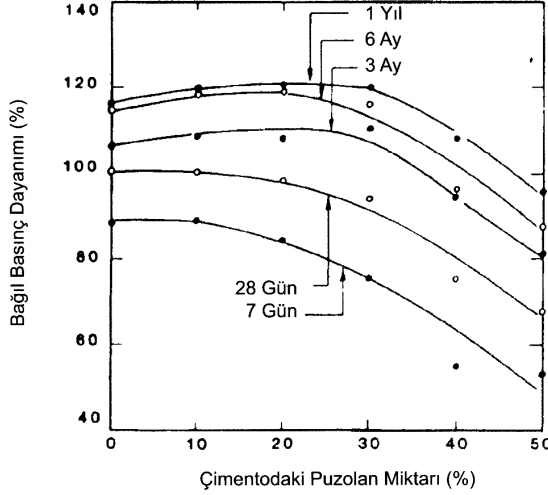
Doğal puzolanlı çimento içeren harçların dayanım gelişmesini inceleyen bir araştırmanın sonuçları Şekil 6'da sunulmaktadır [43]. Bu çalışmada, harçlarda portland çimentosu, doğal puzolan ile % 10, 20 ve 30 oranlarında ikame edilerek, 0.5 su/portland çimentosu + doğal puzolan oranında hazırlanan harçların dayanımları bulunmuştur. Harçlarda hasil olan puzolanik tepkimelerin 7 güne kadar dayanımda gelişme yapmadığı şekilden görülebilir. Buna karşılık 7-28 günlük süreçte % 10 tras içeren çimentolu harçlar kontrol numunesinin dayanımını geçmiştir. 28-90 günlük süreçte ise; % 20 tras içeren çimentolu harçların dayanımının kontrol numunesinden yüksekliğiyle anlaşılacağı gibi puzolanik aktivite daha da belirgindir. Birinci yılın sonunda ise % 30 tras içeren çimento, kontrol numunesiyle yaklaşık aynı dayanımdadır. Bu çalışmada öğütülmüş doğal puzolan ikamesinin harçlarda portland çimentosu yerine yapıldığı unutulmamalıdır.



Şekil 6. Portland çimentosunun doğal puzolanlarla ikame edildiği harçlarda dayanım [43].

İtalyan doğal puzolanları ile hazırlanan portland çimentosu-doğal puzolan harçları için Massazza tarafından bulunmuş dayanım değerleri ise Şekil 7'de görülebilir [25]. Bu çalışma da bir öncekinde olduğu gibi harçlarda portland çimentosu yerine öğütülmüş doğal puzolan ikamesinin etkileri incelenmektedir. Sonuçlar, Şekil 6'da sunulanları doğrular niteliktedir. Bu bilgilerin ışığında öğütülmüş doğal puzolan ikamesi yapılmış harçların erken

dayanımlarının düştüğü fakat % 30 gibi yüksek doğal puzolan ikamesi oranlarında bile 1 yılda puzolanlı harçların kontrol numunelerinin değerlerini yakaladığı ve hatta geçtiği görülmektedir.

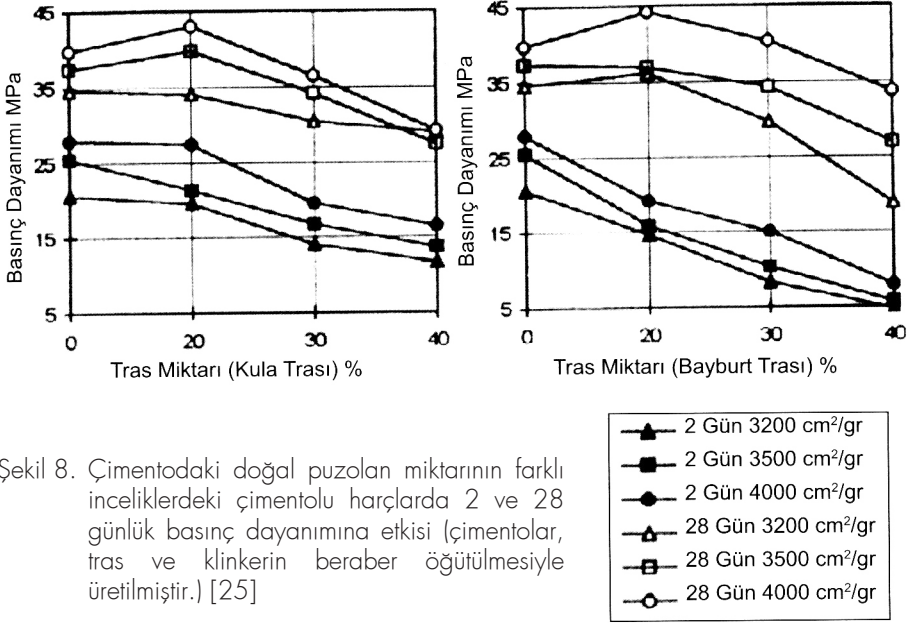


Şekil 7. Doğal puzolanlı harçların dayanımı - dayanım değerleri portland çimentolu harçların 28 günlük dayanımının yüzdesi olarak ifade edilmiştir [25].

Sonuç olarak, ortalama incelikteki ($3000-4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ incelik) bir puzolan ikamesiyle betonda ya da harçlarda hasıl olan dayanım kaybının belirli bir süre zarfında yok olacağı söylenebilir. Bu süre puzolanın tipine ve ikame miktarına bağlıdır [44]. Örneğin rhyolitic glass'ın % 15 mertebesinde kullanılmasıyla portland çimentosu içeren harç numunelerinin dayanımını 7 günde yakalamak mümkün olmuştur [45]. Bununla beraber, bir çok doğal puzolan için bu durum 28 günden önce olmaz [1].

Genel olarak, geç yaşlardaki dayanım göz önüne alındığında, doğal puzolan ikamesi, düşük dozajlı betonlarda (bağlayıcı miktarı $200 \text{ kg}/\text{m}^3$ 'ten az) yüksek dozajlı betonlara göre daha yüksek oranlarda dayanım kazanımı sağlar (kontrol numunesinin dayanımının oranı olarak ifade edildiğinde) [46].

Türkiye'deki genel durum trasların harç ya da betonlara doğrudan katılması yerine bu malzemelerin çimento üretiminde kullanılmasıdır. Dolayısıyla Şekil 6 ve 7'deki eğilimler Türkiye'de üretilen doğal puzolanlı çimentolarla üretilen harçlardaki ve betonlardaki durumu tam olarak yansıtmayabilir. Ülkemizde traslı çimentolarda hasıl olan erken dayanım kayıpları bu tip çimentoların portland çimentolarına göre daha ince öğütülmesiyle bertaraf edilmektedir. Türkiye'deki Kula ve Bayburt trasları üzerinde klinkerle beraber öğütme tekniğiyle üretilen traslı çimentolar için yapılan bir araştırmadan elde edilen sonuçlar ise Şekil 8'de sunulmaktadır. Buna göre Kula ve Bayburt trasları katkılı çimentolar aynı incelikteki portland çimentosu ile karşılaştırıldıklarında Şekil 6 ve 7'de sunulanlara benzer olarak erken dayanım düşüşleri göstermişlerdir. Fakat traslı çimentonun bir miktar daha ince öğütülmesi erken dayanım kaybının yok edilmesini sağlamıştır. Örneğin 2 günde 3500 cm²/gr incelikteki portland çimentosunun dayanımı şekilden de görüleceği gibi 25 MPa civarındadır. % 20 Kula trası katkılı çimentonun dayanımı bu değeri 4000 cm²/gr incelikte aşmıştır. Diğer yandan, her iki tras için de 28 günde % 20 katkılı çimentolar kontrol numunelerinin dayanımlarına ulaşmışlar ve hatta yüksek incelikteki çimentolar aynı incelikteki kontrol dayanımını bir miktar aşmışlardır [29].



Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nde yapılan, traslı çimentolarda kullanılan klinkerin özelliklerinin etkisini inceleyen bir araştırmada aynı tras (Nevşehir Himmetdede Trası) Türkiye'de üretilen farklı klinkerlere katkı malzemesi olarak kullanılmış ve üretilen traslı çimentoların dayanımları karşılaştırılmıştır. Burada değişik yaşlardaki dayanım sonuçları çeşitli parametrelerin (traslı çimentoda kullanılan klinker için; C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF yüzdeleri ve C_3S/C_2S oranı, traslı çimento için; 45 mm'den ince kısmının yüzdesi ve çimentodaki tras miktarı) fonksiyonu olarak ifade edilmeye çalışılmıştır. Araştırmada parametreleri kullanarak dayanımı tahmin etmekte kullanılan denklemler 0.944 ile 0.994 arasında oldukça yüksek korelasyon katsayılarına sahiptir. Buna göre yukarıda parantez içerisinde verilmiş olan parametreler kullanılarak traslı çimento dayanımları başarıyla tahmin edilebilir [47].

Bir miktar portland çimentosunun doğal puzolan ya da herhangi bir puzolanla ikame edildiği harçlarda erken dayanımın sabit su/çimento oranında düşeceği fakat zamanla bu farklılığın kaybolacağı daha önce gösterilmiştir.

Bu bilgilerin ışığında, her iki numune için de aynı erken dayanımı elde etmek amacıyla olduğumuzda, öğütölmüş puzolan katılmış harcın ya da betonun su-çimento oranını azaltmak ve dolayısıyla erken dayanımı artırmak gerekecektir. Bu ise sistemde akışkanlaştırıcı katkı kullanılması ya da puzolanlı çimento dozajının artırılması gerekliliğini ortaya çıkarır. Bu uygulamalardan birisinin yapılması halinde erken dayanımlar aynı olacak, fakat ileriki yaşlarda puzolanlı harçların dayanımı yalnızca portland çimentosu içerenlere göre daha fazla olacaktır.

Harçlara katılmak yerine puzolanların doğrudan çimento üretiminde klinker yerine kullanılması halinde ise yine erken dayanım düşüşleri ortaya çıkabilir. Önceden de belirtildiği gibi Türkiye’de genel olarak puzolanlı çimento üreten fabrikalar çimentolarını bir miktar daha ince öğütmek yoluyla erken dayanım kayıplarını azaltmaktadırlar.

6.2.2. Gözeneklilik ve Geçirgenlik

Bir kısım portland çimentosunun belirli bir miktarda puzolan ile ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik portland çimentosu içeren kontrol numunelerinden daha fazladır [48, 49, 50, 51, 52, 53]. Bu durumun hem uçucu kül hem de doğal puzolan içeren pastalar için geçerli olduğu tespit edilmiştir [54]. Puzolanın tipi ne olursa olsun toplam gözeneklilik zamanla azalır fakat yine de portland çimentosu içeren pastanınkinden yüksektir [51, 52].

% 30 katkı içeren çimento pastalarının cıva porozimetresi ile ölçölmüş toplam gözenekliliğine dair yapılan bir araştırmada Tablo 7’de sunulan veriler elde edilmiştir [54]. Tablodan çeşitli trasların, çimento pastalarında gözenekliliği kontrol numunesine göre ne merketebe arttırdığı görölebilir.

Tablo 7.% 30 Katkılı çimento pastalarının cıva porozimetreyle ölçülmüş yüzde olarak toplam gözenekliliği (su/çimento: 0.32) [54].

	28 Günlük		7 Aylık	
	Hızlı ⁽¹⁾	Yavaş ⁽²⁾	Hızlı ⁽¹⁾	Yavaş ⁽²⁾
Kontrol Numunesi %100 PÇ	17.00	14.70	13.10	10.60
Filler	17.80	21.40	15.30	13.80
Vizzini Puzolanı	18.70	21.60	14.30	12.90
Qualiano Puzolanı	20.00	18.80	11.30	10.70
Casteggio Puzolanı	17.80	16.30	13.60	11.60
Barile Puzolanı	17.70	17.90	13.50	12.70
Segni Puzolanı	17.50	19.30	13.40	34.20
Bacoli Puzolanı	17.80	18.70	13.30	11.40

(1) 70 °C'de, 16 saatte ve 5mbar'lık vacum altında kurutulmuştur.

(2) 20 °C'de ve 4 basamakta kurutulmuştur (bağıl nemler % 55, 33, 10, 0.01)

Betonun geçirgenliği, yalnızca beton gözenekliliğinin bir fonksiyonu olmayıp, gözeneklerin boyutlarına, dağılımına ve şekillerine bağlıdır. Genel olarak, Mehta'nın sonuçları göz önüne alındığında, 500 A'den büyük boyutlu gözeneklerin betonun geçirgenliği, dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde etkili olduğu kabul edilmektedir [10, 43]. Sonuç olarak, betonda gözenekliliğin artması kesin olarak geçirgenliğin de artması anlamına gelmez. Esas olarak doğal puzolan kullanımıyla gözenekliliğin bir miktar arttığı fakat bu gözeneklerin puzolanik tepkimeler neticesinde zamanla birbirinden kopması nedeniyle geçirgenliğin azalabileceği söylenebilir. Bu olumlu etkinin elde edilebilmesi tabii ki uygun kalitede puzolanın uygun miktarlarda kullanımıyla mümkündür.

Doğal puzolan kullanımı, geçirgenliğin azaltılmasında düşük çimento dozajlı betonlarda yüksek dozajlı betonlara göre daha etkilidir [35, 41]. Geçirgenlik portland çimentosu içeren betonlarda olduğu gibi doğal puzolan içeren betonlarda da kürelemeyle azaltılabilir. Hatta uzun süreli küreleme doğal puzolanlı betonlarda yalnızca portland çimentosu içeren betonlara oranla etkili bir şekilde geçirgenliği azaltır.

Çeşitli miktarlarda pümisit ve diatomit katkılı düşük portland çimentosu dozajlı betonlardaki geçirgenlik değerleri Tablo 8'den görülebilir [41]. Görüleceği gibi bu tablodaki iki farklı doğal puzolan geçirgenlik açısından son derece farklı davranışlar sergilemişlerdir. Diatomit % 52 gibi yüksek ikame oranlarında bile kontrol numunesine yakın geçirgenlik değeri vermiştir.

6.2.3. Dayanıklılık

6.2.3.1. Sülfatlara Karşı Dayanıklılık

Uygun tipte puzolanın çimentonun bir kısmının yerine kullanılmasının sülfat dayanıklılığına etkisi üç yolla olur. Birinci olarak, puzolan kullanılması ortamdaki Ca(OH)_2 miktarını azaltacaktır. Böylece sülfatların betona zararlı ürünler oluşturabilmesi için gerekli Ca(OH)_2 ortamdan çekilmiş olacaktır. İkinci olarak, bir kısım çimentonun puzolan ile yer değiştirmesi ortamdaki C_3A miktarını göreceli olarak azaltacaktır. Bu durum yine sülfatların C_3A ile yaptıkları zararlı tepkimelerin azalmasını doğurur. Üçüncü olarak ise, puzolanlar uygun miktarlarda kullanıldığında betonun geçirimsizliğini artırdıklarından betona sülfat girişini önlerler. Fakat sonuç olarak, her puzolanın sülfat direncini artıracağı gibi bir yargıya varılmamalıdır. Kullanılacak olan puzolan düşük oranlarda CaO içermelidir [18]. Ayrıca ASTM'ye göre C Sınıfı olarak tanımlanan uçucu küller genel olarak betonun sülfat direncini azaltır [55].

Santorin toprağıyla yapılan araştırmadan elde edilen sonuçlar Tablo 9'da sunulmaktadır. Tablodan görüleceği gibi, artan doğal puzolan miktarı betonun sülfat etkisine karşı direncini olumlu yönde etkilenmektedir [43].

Tablo 8. Doğal puzolan içeren düşük portland çimentosu dozağılı betonların bazı özellikleri[41].

No	Çimento Dozağılı kg/m ³	Doğal Puzolan Miktarı kg/m ³	Su-Çimento Oranı	Hava Sürükleyici Katkı Miktarı ml/m ³	Çökme (mm)	Hava Miktarı %	Terleme %	Geçirgenlik Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak	Dayanım MPa		Hidrasyon Isısı J/gr		
									3 Günlük	90 Günlük			
Pümsit	1	55.0	44.5	0.86	395	50.0	6.7	1.1	26.75	3.3	14.8	108	238
	2	55.0	71.0	0.65	890	44.5	6.2	0.8	15.15	3.3	16.0	134	217
	3	55.0	101.0	0.57	2543	44.5	6.3	0.7	13.70	3.2	17.0	108	184
	4	55.0	130.5	0.52	5467	50.0	6.0	0.5	17.00	2.7	16.9	125	192
Diatomit	1	55.0	35.5	0.92	317	44.5	6.8	1.1	1.45	3.1	12.5	205	317
	2	55.0	47.5	0.80	362	37.5	6.6	0.4	3.50	3.9	13.5	175	280
	3	55.0	59.5	0.76	735	44.5	6.2	0.2	1.20	3.7	15.0	180	272
Kontrol		112.0	-	0.77	263	44.5	6.6	7.5	1.00	7.0	14.7	255	380

Tablo 9. Sabit PH'lı sülfat çözeltisinde bekletilen çimento pastalarının basınç dayanımı kaybı [43].

Çimento Tipi	Önceki Dayanım MPa	Sülfat Çözeltisinde 28 Gün Kaldıktan Sonraki Dayanım MPa	Dayanım Kaybı %
Kontrol-PÇ	18.0	6.1	66
% 10 Santorin Topraklı Çimento	18.5	9.5	49
% 20 Santorin Topraklı Çimento	16.1	12.9	20
% 30 Santorin Topraklı Çimento	15.2	12.8	16

6.2.3.2. Klor Etkisine Dayanıklılık

Klor etkisi; betonu doğrudan etkilemek yerine, betonun içerisindeki donatıların korozyonuna sebep olması nedeniyle betonun maruz kaldığı diğer olumsuz şartlardan farklılık gösterir. Esas olarak klor etkisi altında betonun bozunması, yalnızca donatının korozyona uğramasıyla hacminin genişlemesine bağlı olarak, donatıyı çevreleyen betonda çatlaklar oluşmasıdır. Korozyon, donatının etrafında çimento hidrasyonunun başlamasından hemen sonra kendiliğinden oluşan ve korozyonu önleyen pasif katmanın, betona giren klorün etkisi altında parçalanmasıyla başlamaktadır.

Betona dışarıdan klor nüfuz etmesi halinde doğal puzolan kullanımı betona klor girişini azaltır [56]. Aynı şartlar altında portland çimentolu harcın, traşlı çimentolu harca göre 5 kat daha fazla klor giriş derinliğine sahip olduğu görülmüştür [57]. Diğer yandan, betona klor girişi ile ilgili olarak genel düşünce, betonun su/çimento oranının ve dolayısıyla sıklığının kullanılan puzolandan çok daha önemli olduğudur [58].

6.2.3.3. Alkali Agrega Reaksiyonuna Dayanıklılık

Betonda kullanılan agregalardaki bazı bileşenler, özel şartlar altında, betona çoğu durumda çimentodan geçen alkalilerle tepkime verirler. Bu

tepkimelerin ürünleri sertleşmiş betonda genişleme yaratmakta ve hasara sebep olmaktadır. Puzolanlar genel olarak alkali-agrega reaksiyonuyla oluşan bu genişlemeyi kontrol etmek için de kullanılırlar.

Çimentodaki alkaliler ve agrega arasındaki reaksiyonlar başlıca iki tiptedir:

- i) Alkali-Karbonat Reaksiyonu
- ii) Alkali-Silika Reaksiyonu

Alkali-karbonat reaksiyonunda alkaliler reaksiyon sonunda tüketilmez ve yeni reaksiyonlar vermek üzere tekrar ortaya çıkarlar. Muhtemelen bu sebepten dolayı, puzolan kullanımı (mikrosilis dahil olmak üzere) alkali karbonat reaksiyonunu önlemede etkisizdir [59]. Bununla beraber, yüksek fırın cürufu kullanımının etkili olduğu görülmüştür [59].

Alkali silika reaksiyonunu önlemede ise puzolanların etkinliği kesin olarak kanıtlanmıştır [1, 10, 28]. Alkali-silika reaksiyonunun oluşabilmesi ve zararlı etkiler yaratabilmesi için gerekli şartlar şunlardır [1];

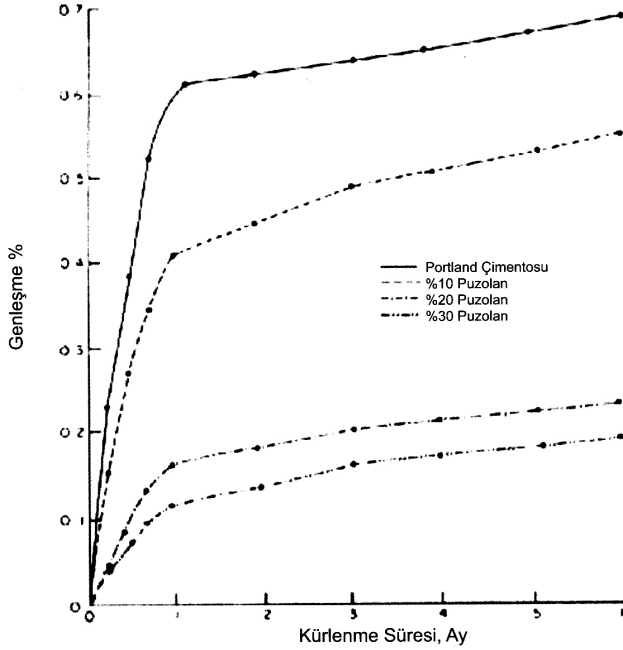
1. Yeterli nem
2. Yeterli miktarda alkali hidroksit (alkali)
3. Agregada kritik miktarda reaktif silika
4. Ortamda Ca(OH)_2 bulunması

Genellikle alkali-silika reaksiyonu için gerekli alkali çimentodan gelmektedir [1]. Dolayısıyla, bir kısım çimentonun puzolanlarla ikamesi, ortama katılan alkali miktarının seyreltilmesine sebep olacaktır. Bununla beraber, bazı özel şartlar altında ortama alkalilerin dış kaynaklardan girmesi (deniz suyu, buz çözücü tuzlar vb.) halinde ortamdaki alkali miktratını azaltmak amacıyla puzolan kullanımını anlamsızlaştırır.

Genel olarak puzolan kullanımının alkali-silika reaksiyonuna olumlu etkisi birden fazla yolla olmaktadır;

1. Puzolanlardaki reaktif silika; ortamdaki alkalilerle, reaktif agregadan daha hızlı bir şekilde reaksiyona girer ve dolayısıyla puzolan kullanımı alkali-silika reaksiyonu için ortamda yeterince alkali bulunmasını önler [60].
2. Çimentonun puzolanlar ile ikamesi ortama çimento tarafından sokulan alkali miktarının azalmasını sağlar. Bu durum genellikle böyle olmakla birlikte puzolan kullanımıyla ortama fazladan alkali girişi de mümkündür [61].
3. Puzolan kullanımıyla Ca(OH)_2 tüketiminden dolayı ortamın pH'ı düşer. Bu durum alkali agrega reaktivitesini azaltır [62].

Genel olarak puzolan etkisinin mekanizmasından sonra, özelde doğal puzolanların alkali silika reaksiyonuna etkisini incelersek aynı yargıları belirtebiliriz kesin olarak. Aynı araştırmacılar tarafından yapılan iki araştırmada çimento doğal puzolanlarla ve volkanik tüflerle ikame edilmiş ve bunların alkali-silika genişmesini azalttığı tespit edilmiştir. [63, 64]. Santorin toprağı üzerine yapılan bir başka araştırmada ise kullanım miktarı ile alkali-silika genişmesini azalması arasındaki ilişki incelenmiştir (Şekil 9) [43]. Bir başka çalışmada İtalyan doğal puzolanlarının hem orijinal halde, hem de ısı işleminden sonra %1.8 gibi yüksek alkali (sodyum eşdeğeri) içeren portland çimentosu kullanıldığı durumda bile alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan genişmeyi azalttığı tespit edilmiştir [65]. Sonuç olarak, beton ya da çimentoda doğal puzolan bulunması, alkali-silika reaksiyonunun etkilerini önlemede uygun bir yol olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 9. Farklı miktarlarda doğal puzolan içeren harçlarda alkali-agrega reaksiyonundan kaynaklanan genleşme [43]

Diğer yandan nadir bazı doğal puzolanların alkali-silika genleşmesini artırdığı rapor edilmiştir [66]. Genel olarak, puzolan kullanımı ile genleşmenin artması, puzolanın ortama suda çözünabilir alkali vermesinden kaynaklanabilir.

6.2.3.4. Donma Çözünme Etkisine Dayanıklılık

Puzolanlı çimentoların hidratasyon hızının aynı incelikteki portland çimentolarına göre daha yavaş olduğu belirtilmişti. Bu sebeple, puzolanlı çimento içeren betonlar donma-çözünme döngülerine karşı yeterli dayanıklılığı aynı incelikteki portland çimentolu betonlara göre biraz daha geç kazanırlar. Dolayısıyla, betonun donma-çözünme dayanıklılığını ölçen bir çok standard test metodunda yetersiz kürlenme nedeniyle puzolanlı çimentolar olumsuz sonuçlar verir. Esasında yeteri kadar uzun kürlemeden sonra puzolan içeren çimentolar donma çözünme döngülerine portland

çimentolarıyla benzer ya da bunlardan daha iyi performans gösterirler [1, 28]. Diğer yandan, literatürdeki verilerin ışığında puzolan içeren çimentonun portland çimentosuyla aynı erken dayanımı verecek kadar ince olması halinde, portland çimentosu ve puzolanlı çimentonun donma çözünme dayanıklılıkları açısından aralarında bir farklılık olmaması beklenir.

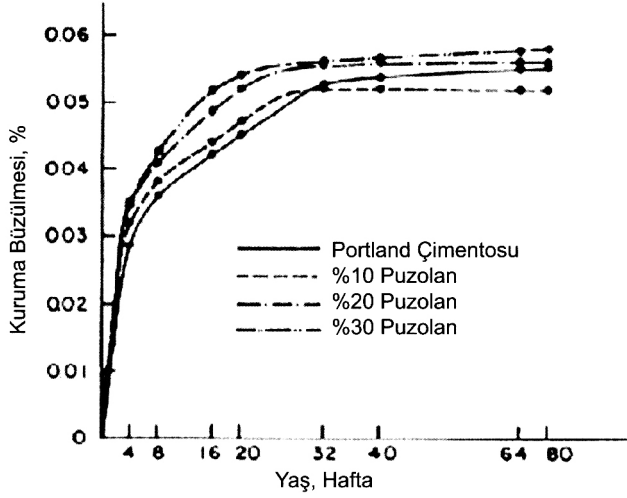
Genelde, donma-çözünme döngülerine karşı betonda dayanıklılık sağlamak için betona hava sürüklenmesi en kabul görmüş uygulamadır. Betona hava sürüklenmesi halinde betonların dayanımları aynı olmak kaydıyla, betonda doğal puzolan, uçucu kül ya da mikrosilika kullanımının portland çimentosu kullanımıyla karşılaştırıldığında donma-çözünme dayanıklılığı açısından olumsuz etkileri olmadığı belirtilmiştir [1].

Doğal puzolan kullanılmasıyla betonda belirli bir miktarda hava sürüklenmesini sağlamak için gerekli katkı miktarı artar. Tablo 8'den doğal puzolan kullanılmasıyla betonda %6-7 hava içeriği sağlanması için ne miktarlarda katkı kullanılmış olduğu görülebilir [41]. Bu sonuçlara göre, betonda artan doğal puzolan miktarı betonun hava sürükleyici katkı ihtiyacını da artırmaktadır. Fakat bu durum her zaman böyle olmayabilir. Dolayısıyla, her zaman olduğu gibi doğal puzolan kullanıldığında da belirli bir miktarda hava sürüklenmesi için gerekli hava sürükleyici katkı dozajı deneysel çalışmalarla belirlenmelidir.

6.2.4. Büzülme (Rötre)

Genel olarak, çimentoya alışlageldik doajlarda puzolan ilavesiyle harçlardaki kuruma büzülmesinin küçük bir miktar arttığı söylenebilir [1].

Santorin toprağıyla yapılan bir araştırmada %30 katkı oranına kadar bu malzemenin kuruma büzülmesine etkisi incelenmiştir. Şekil 10'dan da görüleceği gibi bu malzemenin kullanılışı kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında önemsiz mertebelerde artan kuruma büzülmesine yol açmıştır [43].



Şekil 10. Çimentodaki doğal puzolan miktarının farklı yaşlardaki kuruma büzülmesine etkisi [43]

Davis ve arkadaşlarının çalışmaları yukarıda sunulan verileri doğrular nitelikte doğal puzolan kullanımıyla betonun hacim değişmesinin artacağını göstermiştir [67]. Yine aynı araştırmacılar bu durumu doğal puzolan kullanımının betonda su ihtiyacını artırmasıyla açıklamışlardır [67]. Bilindiği gibi betondaki karışım suyu miktarının artması büzümü artırır [68]. Dolayısıyla, doğal puzolanların büzülmeye etkisini betonun su ihtiyacına olan etkisi ile ilişkilendirmek daha doğru bir yaklaşım olur.

Konuya bir başka yaklaşım ise şu şekilde olabilir; portland çimentosu kullanılan bir betonla, doğal puzolanlı çimento kullanılan bir betonun aynı erken dayanıma sahip olmalarını sağlamak için, doğal puzolanlı çimento içeren betonun çimento dozağı diğerine göre biraz daha fazla olmalıdır ya da puzolanlı çimento bir miktar daha ince olmalıdır (bkz. Bölüm 6.2.1). Çimento dozağının veya inceliğinin artması ise betonda büzümü genellikle artırır [69].

6.2.5. Sünme

Sünme sabit yük altında betonun zamanla artan deformasyon göstermesi olarak tanımlanabilir. Sünme betonda yalnızca çimento pastasında oluşur ve agragalar sünmeyi kısıtlayıcı yönde olumlu bir etki yaparlar. Bu nedenle, sünme; betonda çimento pastasının hacimce miktarının bir fonksiyonudur [28].

Sünme miktarı yükün uygulandığı andaki beton dayanımı ile sıkı bir ilişki içerisinde. Dolayısıyla, diğer tüm şartlar aynı tutulduğunda bu miktar; çimento dayanımına, su çimento oranına ve kürlenme şartlarına bağlıdır [1].

Sonuç olarak, betonda kullanılan çimento tipi beton dayanımını etkilediği ölçüde betonun sünme davranışını etkiler [28]. Buradan hareketle, bir kısım portland çimentosunun herhangi bir puzolanla ikame edildiği betonlara erken yaşlarda yükleme yapılması halinde sünme miktarı daha fazla olur [70]. Fakar aradaki farklılık betonun geç yaşlarda yüklenmesi halinde önemsiz bir hal arzeder. Bu durum geç yaşlarda puzolan katkılı çimentolu betonların portland çimentolu beton dayanımına ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla, herhangi bir puzolan içeren betonlarda görülen sünme miktarı, yükleme anındaki beton dayanımına bağlı olarak puzolansız betonlarınkinden fazla ya da az olabilir. Yapılan bir çalışmada uzun süre kürlenmiş uçucu küllü betonların portland çimentosu içeren betonlardan daha az sünme gösterebileceği ispatlanmıştır [71].

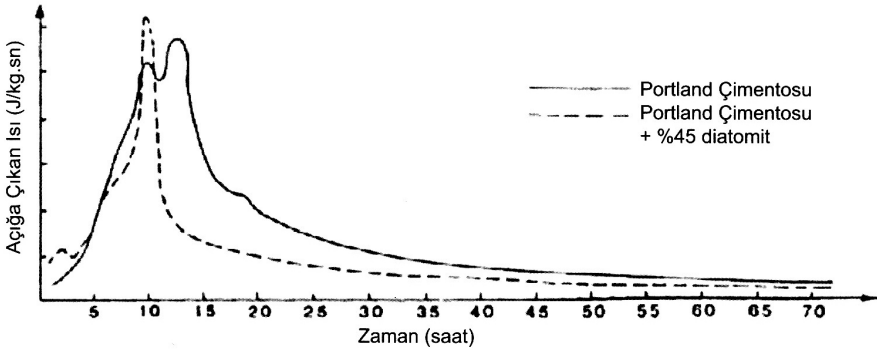
Puzolanlı betonun erken yaşlarda yüklenmesi halinde daha fazla sünmeye maruz kalması, masif yapılar için beton fazla katılaşmadan yapının oturmasına sebep olması nedeniyle olumlu bir gelişme olarak değerlendirilebilir [72].

6.2.6. Hidratasyon Isısı

Portland çimentosunun toplam hidratasyon ısısı portland çimentosu-doğal puzolan karışımından genellikle daha fazladır. Bununla beraber, puzolanik tepkimelerin de ısı açığa çıkarttığı unutulmamalıdır. Çimentoya puzolan

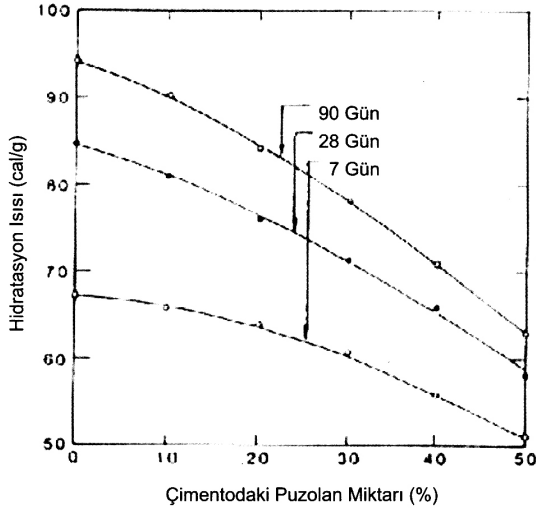
katılması hidrasyon ısı hızı-zaman diagramının daha dikleşmesine, pasif dönemin (dormant period) kısılmasına ve maksimum değere daha erken ulaşılmasına sebebiyet verir. Bu durum Şekil 11 'de görülebilir [73]. Bu doğal puzolanların alit (C_3S) hidrasyonunu hızlandırdığı yolundaki düşüncüyü desteklemektedir. Alit hidrasyonunun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılmasının sebebi henüz tam olarak açıklanamamıştır.

30



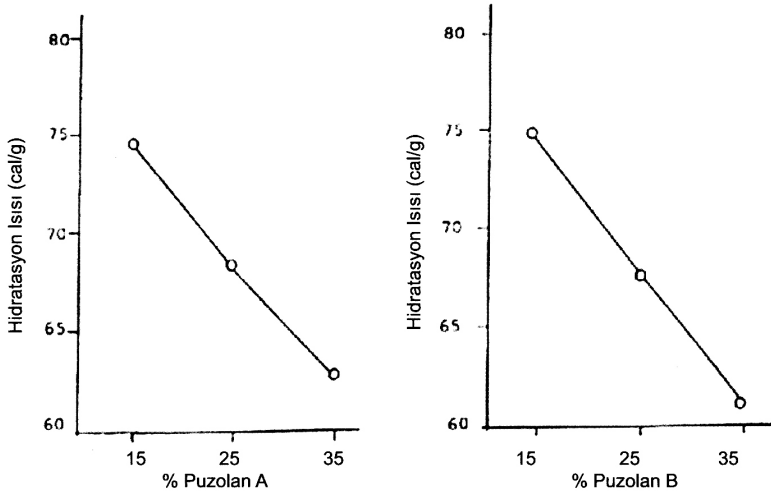
Şekil 11. Portland çimentosu ve portland-doğal puzolan çimentolarının hidrasyonun erken safhalarındaki hidrasyon ısıları [73]

Tablo 8 ve Şekil 12 ise puzolan katkısıyla hidrasyon ısısında değişik yaşlarda meydana gelen düşüşleri göstermektedir [25, 41]. Davis'e göre bir miktar portland çimentosunun yerine puzolan ikamesiyle elde edilen hidrasyon ısı düşüşü oranı ikame yüzdesinin yarısı olarak öngörülebilir.



Şekil 12. Çimentodaki pozzolan miktarının farklı yaşlardaki hidrasyon ısısına etkileri [10]

Doğal pozzolan ikamesinin hidrasyon ısısına etkisinin incelendiği bir başka araştırmanın sonuçları ise Şekil 13'te sunulmaktadır [74].



Şekil 13. Doğal pozzolanların çimentonun 7 günlük hidrasyon ısısına etkisi [74].

7. TRAS ve TRASLI ÇİMENTO STANDARLARI

7.1. Tras Standardları

Bir çok ülkede çimento ve betonda kullanılacak doğal puzolanlar için şartnameler vardır. Ülkemizde bu konuda TS 25; "Tras" standardı bulunmaktadır. Bu standarda göre tras şu şekilde tanımlanmıştır; tras, silisli ve alümino-silisli volkanik bir tüf olup yalnız başına bulunduğu zaman hidrolik özellik göstermediği halde çok ince öğütüldüğünde sulu ortamda ve kalsiyum hidroksitle birlikte normal sıcaklıkta kimyasal reaksiyona girerek hidrolik özellik gösteren doğal puzolanik bir maddedir [75]. Bu tanım esas olarak ASTM C 618'de verilen tanım ile aynıdır. TS 25'e göre traslarda bulunması gereken özellikler Tablo 11'de sunulmaktadır.

TS 25'te belirtilen trasın aktivite değeri yine bu standardda tanımlanan puzolanik aktivite deneyiyle bulunur. Bu deneye göre, aktivitesi bulunacak olan tras sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulur. Ardından elek açıklığı 200 ve 90 mm olan eleklerde sırasıyla en fazla %0.6 ve %8 kalıntı verecek ve özgül yüzey alanı en az 3000 cm²/gr olacak şekilde öğütülür. Elde edilen öğütülmüş tras 44 mm elek açıklığında en fazla %5 kalıntı bırakan, içerisindeki magnezyum oksit miktarı en çok %5 olan ve en az %95 kalsiyum oksit içeren sönmüş kireçle Tablo 10'da sunulan oranlarda TS 24'e göre karıştırılır ve kalıplara yerleştirilir. Hazırlanan kireç-doğal puzolan harçlarında TS 819'a uygun standard kum kullanılır. Kalıpta 24 saat 23±2°C'de bekletilen numuneler daha sonra kalıptan çıkartılmadan 55±2°C'de 6 gün daha bekletilir. Sonuçta 7. gün numuneler TS 24'e göre eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneylerine tabi tutulurlar. TS 25'e göre traslarla hazırlanan aktivite numunelerinin 7 günlük eğilmede çekme dayanımları 10 kgf/cm²'den, basınç dayanımları ise 40 kgf/cm²'den az olmamalıdır.

Tablo 10. TS 25'e göre trasların puzolanik aktivitesinin tayini için hazırlanan harçlarda kullanılan karışım oranları [75]

Kullanılan Malzeme Cinsi	Numune Miktarı (gr)
Sönmüş Kireç-Ca(OH) ₂	150
Tras	$T = 300 \times \frac{\text{Trasın Özgül Ağırlığı}}{\text{Sönmüş Kirecin Özgül Ağırlığı}}$
Standart Kum (TS 819'a Uygun)	1350 (Bir Torba)
Su	$0.5 \times (150 + T)$

Amerikan Standardı ASTM C 618 "Betonda Kullanılacak Uçucu Kül ve Kalsine Edilmiş ya da Edilmemiş Doğal Puzolanlar İçin Şartname" betonda kullanılacak doğal puzolanlar için bazı şartlar öngörmektedir [76]. Diğer yandan ASTM C 593 "Kireçle Kullanılacak Uçucu Küller ve Diğer Puzolanlar için Şartname" ise kireçle beraber kullanılacak puzolanlarda bulunması gereken özellikleri belirtmektedir [77]. Bu bilgiler Tablo 11'de sunulmaktadır. Avrupa Standardı ENV 197-1 "Çimento Kompozisyon Şartnameler ve Uygunluk Kriterleri" standardında ise çimentoda kullanılacak traslar için yalnızca reaktif SiO₂ miktarının %25'ten az olmaması gerektiği belirtilmektedir [78].

Tablo 11. TS 25, ASTM C 593 ve ASTM C 618’de belirtilen doğal puzolan özellikleri [75, 76, 77]

Özelik	TS 25	ASTM C 593	ASTM C 618
Standardın Konusu	Tras	Kireçle Kullanılacak Puzolan	Betonda Kullanılacak Puzolan
Suda Çözünür Kısım - En Fazla %	—	10.0	—
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ - En Az %	70.0	—	70.0
MgO - En Fazla %	5.0	—	—
SO ₃ - En Fazla %	3.0	—	4.0
Na ₂ O Eşdeğeri Alkali Miktarı - En Fazla %	—	—	1.5
Kızdırma Kaybı - En Fazla %	—	—	10.0
Nem oranı - En Fazla %	10.0	—	3.0
600 µm Elek Bakiyesi - En Fazla %	—	2.0	—
75 µm Elek Bakiyesi - En Fazla %	—	30.0	—
Kireç-Puzolan Karışımının Su İhtiyacı (Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak) - En Fazla %	—	—	115
Kireç-Puzolan Karışımının 7 Günlük Dayanımı - En Az MPa	4.0	4.1	75 (Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak)
Kireç-Puzolan Karışımının 28 Günlük Dayanımı - En Az MPa	—	4.1	75 (Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak)
Kuruma Büzülmesinde Artış (Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak) - En Fazla %	—	—	0.03
Alkali silika Reaksiyonu Genleşmesi (Kontrol Numunesinin Yüzdesi Olarak) En Fazla %	—	—	100
Yoğunluk Değişimi (Ortalamadan Farkın Yüzdesi Olarak) En Fazla %	—	—	5
45 µm Elek Bakiyesi Değişimi (Ortalamadan Farkın Yüzdesi Olarak) En Fazla %	—	—	5

7.2. Traslı Çimento Standardları

Ülkemizde doğal puzolan içeren çimentolarla ilgili olarak yakın zamana kadar yalnızca iki standard bulunmaktaydı; TS 26-Traslı Çimentolar [79] ve TS 10156-Katkılı Çimentolar [80]. Türkiye’nin Avrupa Birliği ile olan anlaşmaları çerçevesinde ortak standardizasyona gidilmesi amacıyla 1998 yılında bu standartların dışında yeni bazı standartlar daha yürürlüğe girmiştir [81, 82, 83]. Burada konuyla ilgili tüm standartlar bir arada sunulacaktır. Şu anda Türkiye’de yürürlükte olan standartlarda istenen kimyasal özellikler

“TS 689 - Çimento-Kimyasal Analiz Metodları” standardına göre fiziksel ve mekanik özellikler ise “TS 24 - Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deney Metodları” standardına göre tespit edilmektedir. Ülkemizdeki doğal puzolan katkılı çimentolarda ilgili standartlara göre istenen tüm özellikler ve standartların yayın tarihleri Tablo 12 ve 13’te sunulmaktadır. Eski ve yeni standartların aynı tabloda bir arada sunulması ayrıca bu konuda bir mukayese yapılmasına da olanak tanıyacaktır. Esas olarak yeni yayınlanmış olan standartlar Avrupa Standartlarıyla aynıdır. Dolayısıyla, burada ENV 197-1 standardına dair bilgiler ayrıca sunulmayacaktır.

Tablo 12. Türkiye’deki doğal puzolan içeren çimento standartları [79, 80, 81, 82, 83]

Özellik	TS 26 [79]	TS 10156 [80]	TS 12142 [81]		TS 12143 [82]		TS 12144 [83]	
Standard İsmi	Traslı Çimento	Katkılı Çimento	Kompoze Çimento		Portland Kompoze Çimento		Puzolanik Çimento	
Standardın Son Halinin Yayın Tarihi	Nisan 1992	Nisan 1992	Mart 1997	Mart 1997	Mart 1997	Mart 1997	Mart 1997	Mart 1997
Çimentonun İşareti	TÇ	KÇ	KZÇ/A	KZÇ/B	PKÇ/A	PKÇ/B	PZÇ/A	PZÇ/B
Dayanım Sınıfları	32.5	32.5	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Katkı Miktarı %	19-40	0-19	18-30 (2)	31-50 (2)	6-20 (3)	21-35 (3)	11-35 (4)	36-55 (4)
Minör İlave Bileşen %	—	—	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
SO ₃ - En Fazla %	3.5	3.5	3.5 4.0(5)	3.5 4.0(5)	3.5 4.0(5)	3.5 4.0(5)	3.5 4.0(5)	3.5 4.0(5)
MgO - En Fazla %	5	5	—	—	—	—	—	—
Kızdırma Kaybı %	5	5	—	—	—	—	—	—
Klorür %	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

- (1) Yeni çimento standartlarının dayanım sınıfları ve ilgili şartlar Tablo 13’te sunulmaktadır.
- (2) Bu çimentoda katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan ve silisli uçucu kül kullanılabilir.
- (3) Bu çimentoda katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan, silisli uçucu kül, kireçli uçucu kül, kalker, silis dumanı ya da granüle yüksek fırın cürufu kullanılabilir.
- (4) Bu çimentoda katkı olarak doğal puzolan, endüstriyel puzolan, silisli uçucu kül, silis dumanı ya da granüle yüksek fırın cürufu kullanılabilir.
- (5) Sınır değer 32.5, 32.5R ve 42.5 dayanım sınıflarında %3.5-42.5R, 52.5 ve 52.5R dayanım sınıflarında ise %4.0’dır.

Tablo 13. Türkiye’deki doğal puzolan içeren yeni çimento standartlarında bulunan dayanım sınıfları ve bu sınıflara ait bazı şartlar [79, 80, 81, 82, 83]

Dayanım Sınıfı	Dayanım (Nmm ²)			İlk Priz	Hacim Genleş.	SO ₃	Cl
	2 Gün	7 Gün	28 Gün	dakika	mm	%	%
32.5	—	16	32.5-52.5	≥60	≤10	≤3.5	≤0.1
32.5R	≥10	—	32.5-52.5	≥60	≤10	≤3.5	≤0.1
42.5	≥10	—	42.5-62.5	≥60	≤10	≤3.5	≤0.1
42.5R	≥20	—	42.5-62.5	≥60	≤10	≤4.0	≤0.1
52.5	≥20	—	≥52.5	≥45	≤10	≤4.0	≤0.1
52.5R	≥30	—	≥52.5	≥45	≤10	≤4.0	≤0.1

* Bu tablodaki değerler yalnızca Kompoze Çimento, Portland Kompoze Çimento ve Puzolanik için geçerlidir.

Çeşitli ülkelerin şu anda yürürlükte olan doğal puzolan katkılı çimento standartları ise Tablo 14’te sunulmaktadır.

Tablo 14. Türkiye’deki traslı çimento ve katkılı çimento standartlarındaki fiziksel ve mekanik özelliklere dair sınırlar

	Traslı Çimento TÇ 32,5	Katkılı Çimento TÇ 32,5
İncelik-En Az cm ² /gr	2000	2800
2 Günlük Dayanımı En Az N/mm ²	10	10
7 Günlük Dayanımı En Az N/mm ²	21	21
28 Günlük Dayanımı En Az N/mm ²	32.5	32.5
Priz Başlangıcı En Az dakika	60	60
Priz Sonu En Çok saat	10	10
Hacim Genleşmesi-En Çok mm	10	10

Tablo 15. Çeşitli ülkelerdeki doğal puzolanlı çimento standartları [10]

	ABD	Hindistan	Japonya	Almanya	İtalya	Hollanda	Rusya
Çimentodaki Doğal Puzolan Miktarı - %	15 - 40	10 - 25	5 - 30	20 - 40	(1)	20 - 40	5 - 40
3 Günlük Dayanım En Az - N/mm ²	12.4	—	6.9	—	—	—	—
7 Günlük Dayanım En Az - N/mm ²	19.3	21.6	14.7	—	—	—	—
28 Günlük Dayanım En Az - N/mm ²	24.1	30.4	29.4	(2)	(2)	(2)	(2)
Blaine İnceliği En Az - cm ² /gr	—	2250	3000	2200		2000	
Priz Başlangıcı En Az - dakika	45	30	60	60	45	60	45
Priz Sonu En Fazla - saat	7	10	10	12	12	10	10
7 Günlük Hidratasyon Isısı En Fazla - kJ/kg	293	—	—	—	—	—	—
28 Günlük Hidratasyon Isısı En Fazla - kJ/kg	335	—	—	—	—	—	—

(1) Dayanım gerekleri yerine getirildiği sürece çimentodaki katkı miktarına bir sınırlama getirilmemiştir.

(2) Çeşitli dayanım sınıfları mevcuttur.

8. KAYNAKLAR

1. Editör P.C. HEWLETT, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, John Wiley and Sons Inc., Fourth Edition, New York, 1998
2. Sersale R., "Genesi e Costituzione delle Tufo Giallo Napoletano", *Rediconti dell' Academia della Scienze Fisiche e Matematiche della Societa Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti, Napoli*, 1958, 25 (4), pp 181-207, 1. Kaynaktan alınmıştır.
3. Malquori G., "Portland-Pozzolana Cement", *Proceedings of the 4th International Symposium on the Chemistry of Cement*, Washington, 1960. National Bureau of Standards, 1962, 1. Kaynaktan alınmıştır.
4. Tavasci B., "Struttura della Pozzolana di Segni", *Il Cemento*, 1946, 42 (1), 1. Kaynaktan alınmıştır.
5. Sersale R., "Ricerche Sperimentali sulla Costituzione, sulla Genesi e sul Comportamento Chimico dei Tufi Vulcanici", *Rediconti della Societa mineralogica Italiana*, 1961, 17, pp 499-536, 1. Kaynaktan alınmıştır.
6. Cussino L., Dallatorre R., "Ricerche su Materiali Naturali a Comportamento Pozzolano", *Il Cemento*, 1958, 55 (12), pp 17-21, 1. Kaynaktan alınmıştır
7. Amicarelli V. ve diğerleri, "Pozzolonica dei Prodotti Piroclastici Argillificati" *Rediconti dell'Academia delle Scienze Fisiche e Matematiche della Societa Nazionale di Scienze, Lettere ed Arti, Napoli*, 1966, 33 (4), pp 257-82, 1. Kaynaktan alınmıştır.
8. Mielenz R.C. ve diğerleri, "Effect of Colcination on Natural Pozzolans", *Symposium on Use of Pozzolanic Materials in Mortars and Concretes*, ASTM Technical Publication No: 99, 1950, pp 43-92, 1. Kaynaktan alınmıştır.
9. Costa U., Massazza F., "Influenza del Trattamento Termico sulla Reattivita' con la Calce di Alcune Pozzolane Naturali", *Il Cemento*, 1977, No:3, pp 105-122, 1. Kaynaktan alınmıştır.
10. Editör Swamy R.N., "Cement Replacement Materials", Blackie & Son Ltd., 1986, Londra
11. Mortureux B. ve diğerleri, "Comparison of the Reactivity of the Different Pozzolans", *Proceeding of 7th International Congress on Chemistry of Cements*, Paris, 1980, Vol 4, pp 110-115, 10. Kaynaktan alınmıştır.
12. Massazza M., Costa U., "Factors Determining the Development of Mechanical Strength in Lime-Pozzolana Pastes", *Proceedings of the 22. Conference on Silicate Industry and Silicate Science*, Budapest, 1977, Vol. 1, pp 537-552, 1. Kaynaktan alınmıştır.
13. Takemeto K. ve diğerleri, "Hydration of Pozzolanic Cements", *Proceeding of 7th International Congress on Chemistry of Cements*, Paris, 1980, Vol 1, 1. Kaynaktan alınmıştır.
14. Costa J, Massazza F., "Natural Pozzolans and Fly Ashes: Analogies and Differences", *Proceedings of Symposium on Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete*, Boston, 1981, Materials Research Society, 1. Kaynaktan alınmıştır.
15. Costa U. Massazza F., "Factors Affecting the Reaction with Lime of Italian Pozzolanas", *Il Cemento*, 71, pp 131 - 139
16. Leckebush R., "Türkiye'deki Doğal Puzolanların Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanımı Üzerine İncelemeler", *Teknik Rapor, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Yayını*, Ankara, 1984

17. Chatterjee M.K., Lahiri D., "Puzzolanic Activity in Relation to Specific Surface of Some Artificial Pozzolanas". Trans. Indian Ceramic Soc., 26, pp 65-74, 10. Kaynaktan alınmıştır.
18. Ludwig U., Schwiete H.E., "Kalk Bindung und Neubildungen bei den Trass-Kalk Reaktinoen, Zement Kalk Gips, 16, pp 421-431, 1. Kaynaktan alınmıştır.
19. Day R.L., Shi C., "Influence of the Fineness of Pozzolan on the Strength of Lime-Natural Pozzolan Cement Paste", Cement and Concrete Research, 1994, 24, pp 1485 - 1491
20. Massazza Yayınlanmamış Veriler.
21. Fournier M., Geoffray J.M., "Le Liant Pouzzolanes-Chaux", Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1978, no: 93, pp 70-78, 1. Kaynaktan alınmıştır.
22. Chapelle J., "Attaque Sulfo-Calcique des Laitiers et des Pouzzolanes", Revue des Matériaux de Construction et des Travaux publics, 1958, 1. Kaynaktan alınmıştır.
23. Lea F.M., "Investigations on Pozzolanas", Building Research Technical Paper No: 27, HMSO, Londra, 10. Kaynaktan alınmıştır.
24. Sersale R., "Structure and Characterisation of Pozzolanas and of Fly Ashes", Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, 1980, Sub-Theme, 10. Kaynaktan alınmıştır.
25. Massazza F., "Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements", Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cements, Moscow, 1974, 10. Kaynaktan alınmıştır.
26. Sersale R., Rebuffat P., "Microscopic Investigations of Hardened Lime-Pozzolana Pastes". Zement Kalk Gips, 1970, pp 182-184, 1. Kaynaktan alınmıştır.
27. Jambor J., "Hydration Products of Lime Pozzolan Pastes", Zement Kalk Gips, 1963, No: 5, pp 177-186, 1. Kaynaktan alınmıştır.
28. Neville A.M., "Properties of Concrete". Fourth Edition, Longman Group Ltd., İngiltere
29. Erdoğan K., "Effects of Pozzolanic Additions on Grindability and Some Mechanical Properties of Pozzolanic Cements of Different Fineness Values", Yüksek Lisans Tezi, 1996, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
30. Massazza F., Daimon M., "Chemistry of Hydration of Cements and Cementitious Systems". Proceedings of 9th International Congress on the Chemistry of Cements, 1992, Tokyo
31. Ogawa K. ve diğerleri, "The Mechanism of the Hydration in the System C₃S-Pozzolana". Cement and Concrete Research, 10, pp 683-689
32. Uchikawa H., Uchida S., "Influence of Pozzolana on the Hydration of C₃A" Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, 1980, Vol.4, pp 24-29, 10. kaynaktan alınmıştır.
33. Collepardi M. ve diğerleri, "The Effect of Pozzolanas on the C₃S Hydration". Cement and Concrete Research, 1978, 8, pp 741 - 752
34. Plowman C., "The Influence of Pulverised Fuel Ash on the Hydration Reactions of Calcium Aluminates", Proceedings of Symposium on the Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Boston, 1981, Materials Research Society, 10. Kaynaktan alınmıştır.
35. Davis R.E. ve diğerleri, "Properties of Mortars and Concretes Containing Portland-Pozzolan Cements", ACI, 32, PP80-114, 10. Kaynaktan alınmıştır.
36. Tuthill L.H., Cordon W.A., "Properties and Uses of Initially Retarded Concrete", ACI, 52, pp273-286, 10. Kaynaktan alınmıştır.

37. Stuart K.D., Anderson D.A., Cady P.D., "Cady P.D., "Compressive Strength Studies on Portland Cement Mortars Containing Fly Ash and Superplasticizer", Cement and Concrete Research, 1980, 10, pp823-832
38. Soroka I., "Using Powdered Scoria in Concrete Mixes", Building Research and Practice 4, pp296-303, 10. Kaynaktan alınmıştır.
39. Efes Y., "Investigations on two Special Cements", Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, 1980, Sub Theme V, pp 15-20, 10. Kaynaktan alınmıştır.
40. Hanna K.M., Afify A., "Evaluation of the Activity of Pozzolanic Materials", Journal of Appl. Chem. and Biotech., 24, pp751-757, 10. Kaynaktan alınmıştır.
41. Mather B., "Use of Concrete with Low PC Content in Combinations with Pozzolans and Other Admixtures in Construction of Concrete Dams", ACI 71, pp589-599, 10. Kaynaktan alınmıştır.
42. Saad M.N.A., Andrade W.P., Paulon V.A., "Properties of Mass Concrete Containing an Active Pozzolan Made from Clay". Concrete International, pp 59-65, 10. Kaynaktan alınmıştır.
43. Mehta P.K., "Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth". Cement and Concrete Research, 1981, No. 4, pp 507-518
44. Berry E.E. ve diğerleri, "Hydration in High Volume Fly Ash Concrete Binders", ACI 90(4), 1994, pp 382-389
45. Asgeirsson H., Gudmundsson G., "Pozzolanic Activity of Silica Dust", Cement and Concrete Research, 1979, pp 249-252
46. Swamy R.N., Mahmud H.B., "Mix Proportions and Strength Characteristics of Concrete Containing 50 % Low-Calcium Fly Ash", Proceedings of the 2nd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, 1986, ACI Special Publication 91, Vol.1, pp 413-432, 1. Kaynaktan alınmıştır.
47. Yılmaz A., "Klinker Özelliklerinin Traslı Çimentolarda Performansa Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, 1996, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara
48. Berry E.E. ve diğerleri, "Beneficiated Fly Ash: Hydration, Microstructure and Strength Development in Portland Cement Systems", Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, 1989, ACI Special Publication 114, Vol. 1, pp 241-273, 1. Kaynaktan alınmıştır.
49. Hooton R.D., "Permeability and Pore Structure of Cement Pastes Containing Fly Ash, Slag and Silica Fume", Blended Cements, Denver 1984, ASTM Special Technical Publication 897, 1986, pp 128-143, 1. Kaynaktan alınmıştır.
50. Cook D.J., Cao H.T., "An Investigation of the Pore Structure in Fly Ash / OPC Blends", Proceedings of the 1st International RILEM Congress on Pore Structure and Material Properties, Versailles, 1987, Vol. 1, pp 69-76, 1. Kaynaktan alınmıştır.
51. Massazza F., Costa U., "Permeabilità' di Paste di Cemento Portland a Pozzolanico: relazione con la Tessitura Porosa", Convegno AITEC: La durabilità delle Opere in Calcestruzzo, Padova, 1987, pp63-67, 1. Kaynaktan alınmıştır.
52. Manmohan D., Mehta P.K., "Influence of Pozzolanic Materials, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes", Cement and Concrete Aggregates, 1981, pp 65-73, 1. Kaynaktan alınmıştır.

53. Feldman R.F., "Pore Structure Formation During Hydration of Fly Ash and Slag Cement Blends", Materials Research Society Annual Meeting, Boston, 1981, 1. Kaynaktan alınmıştır.
54. Massazza F., "Microstructure of Hydrated Pozzolanitic Cements", 1st International Workshop on Hydration and Setting, Dijon, 1991, London E & F.N. Spon 1992, 1. Kaynaktan alınmıştır.
55. P.J. Tikalsky, R.L. Carrasquillo, "Influence of Fly Ash on the Sulfate Resistance of Concrete", ACI Materials Journal, 89, No. 1, 1992.
56. Collephardi M. ve diğerleri, "La Cinetica di Penetrazione degli Ioni Cloruro nel Calcestruzzo", Il. Cemento, 1970, No.4, pp 157-164, 1. Kaynaktan alınmıştır.
57. Gjorv O.E., Vennesland O., "Diffusion of Chloride Ions from Seawater into Concrete", Cement and Concrete research, 1979, 9, pp 229-238
58. Parrott L.J., Magazine of Concrete research dergisinde 1991 yılında, 43. sayıda 171. sayfada yayınlanmış olan makaleyle ilgili yorumlar, Magazine of Concrete Research, 1992, 44, pp 141-142, 1. Kaynaktan alınmıştır.
59. Chen H. ve diğerleri, "CANMET Investigations of Supplementary Cementing Materials for Reducing Alkali-Aggregate Reactions", International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, CANMET Ottawa, 1990, 28. Kaynaktan alınmıştır.
60. Diamond S., "Alkali Reactions in Concrete - Pore Solution Effects", Proceedings of the 6th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, Kopenhag, Danimarka, 1983, 1. Kaynaktan alınmıştır.
61. Barlow D.F., Jackson P.J., "The Release of Alkalis from Pulverised Fuel Ash and Ground Granulated Blastfurnace Slags in the Presence of Portland Cements", Cement and Concrete Research, 1988, 18 (2), pp 235-248
62. Tangh M.S. ve diğerleri, "The Preventive Effect of Mineral Admixtures on Alkali Silica Reaction and Its Mechanism", Cement and Concrete Research, 1983, 13, pp171 - 176
63. Gudmundsson G., "Investigation on Icelandic Pozzolans", Proceedings of the Symposium on Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures, Reykjavik, 1975, pp 65-76, 1. Kaynaktan alınmıştır.
64. Kordina K., Schwick W., "Investigation on Additives to Concrete for the Prevention of Alkali-Aggregate Reaction", Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1981, 66 pp 328-331, 1. Kaynaktan alınmıştır.
65. Sersale R., Frigione G., "Portland Zeolite Cement for Minimizing Alkali-Aggregate Expansion", Cement and Concrete Research, 1987, 17, pp 404-410
66. Sprung S., Einfluss von Zement und Zusätzen auf die Alkali-reaktion", Schriftenreihe der Zementindustrie, 1973, 40, pp 69-78, 1. Kaynaktan alınmıştır.
67. Davis R.E., "A Review of Pozzolanitic Materials and Their Use on Concretes", Symposium on Pozzolanitic Materials in Mortars and Concretes, STP 99, ASTM, 1950, 10. Kaynaktan alınmıştır.
68. Shacklock B.W., Keene P.W., "The Effect of Mix Proportions and Testing Conditions on Drying Shrinkage and Moisture Movement of Concrete", Cement and Concrete Association Tech. Rep. TRA/266, Londra, 1957, 28. Kaynaktan alınmıştır.
69. Shoya M., "Drying Shrinkage and Moisture Loss of Superplasticizer Admixed Concrete of Low Water Cement Ratio", Transactions of the Japan Concrete Institute, 11-5, pp 103-110, 28. Kaynaktan alınmıştır.

70. Sri R.R., Tam C.T., "Properties of Concrete Containing Low Calcium Fly Ash under Hot and Humid Climate", Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, 1989, ACI Special Publication 114 Vol. 1, pp 139-155, 1. Kaynaktan alınmıştır.
71. Swamy R.N., Mahmud H.B., "Shrinkage and Creep Behavior of High Fly Ash Content Concrete", Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, 1989, ACI Special Publication 114 Vol. 1, pp 453-475, 1. Kaynaktan alınmıştır.
72. Troxell G.E. ve diğerleri, "Long Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete", Proceedings of the ASTM Congress, 1958, 58, pp 1101-1120, 1. Kaynaktan alınmıştır.
73. Grzymek J. ve diğerleri, "Hydration of Cements with Pozzolan Additions", Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, 1980, IV, pp 66-71, 10. Kaynaktan alınmıştır.
74. Shannag M.J., Yeğinobalı A., "Properties of Pastes, Mortars and Concretes Containing Natural Pozzolan", Cement and Concrete Research, 1995, 25
75. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 25 - Tras", 1975, Ankara
76. Amerikan Standardı, "ASTM C 618 - Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete - Betonda Kullanılacak Uçucu Kül ve Kalsine Edilmiş ya da Edilmemiş Doğal Puzolanlar İçin Şartname", American Society for Testing Materials, 1996
77. Amerikan Standardı, "ASTM C 593 - Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans For Use With Lime - Kireçle Kullanılacak Uçucu Küller ve Diğer Puzolanlar için Standard Şartname", Amerikan Society for Testing Materials, 1995
78. Avrupa Standardı, "ENV 197-1 - Cement Composition, Specifications and Conformity Criteria Part 1: Common Cements" - Çimento Kompozisyonu, Şartnameleri ve Uygunluk Kriterleri 1. Bölüm: Genel Kullanım Amaçlı Çimentolar", CEN, 1994
79. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 26 - Traslı Çimentolar", 1975, Ankara
80. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 10156 - Katkılı Çimento", 1975, Ankara
81. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 12142 - Çimento-Kompoze", 1997, Ankara
82. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 12143 - Çimento-Portland Kompoze", 1997, Ankara
83. Türk Standardları Enstitüsü, "TS 12144 - Çimento-Puzolanik", 1997, Ankara
84. Tonak T., "Diatomit Atıklarının Çimento Endüstrisinde Kullanılabilirliği ve Sağladığı Tasarruflar", Çimento Bülteni, TÇMB Yayını, Cilt 28, Sayı 291
85. Aruntaş H.Y., "Katkılı Çimento Üretiminde Diatomitin Puzolanik Malzeme Olarak Kullanılabilirliği", Çimento ve Beton Dünyası, TÇMB Yayını, Yıl 1, Sayı 4

**TÜRKİYE ÇİMENTO MÜSTAHSİLLERİ BİRLİĞİ
AR-GE ENSTİTÜSÜ'NÜN YAYINLARI**

1. TÇMB/AR-GE/Y96.1 Türkiye Çimento-Beton Araştırmacı Envanteri (1996)
2. TÇMB/AR-GE/Y96.2 Türkiye Çimento-Beton Ekipman Envanteri (1996)
3. TÇMB/AR-GE/Y97.1 Türkiye Çimentoları, prEN 197 Çimentoları ve Avrupa Ülkelerinde İç Satış İstatistikleri
4. TÇMB/AR-GE/Y97.2 Cürüflar ve Cürüflu Çimentolar Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Raporu
5. TÇMB/AR-GE/Y97.3 Çimento ve Beton Tez Özetleri (1995, 1996)
6. TÇMB/AR-GE/Y98.1 Avrupa Çimento Standartları ve Testleri
7. TÇMB/AR-GE/Y98.2 Türkiye Çimento Endüstri Enerji ve Emisyon Düşünceleri
8. TÇMB/AR-GE/Y98.3 Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu
9. TÇMB/AR-GE/Y98.4 Cumhuriyetimizin 75. Yılında Türk Çimento Sektörü
10. Proceedings of 1st International Symposium on Admixtures in Cement (1. Uluslararası Çimentoda Mineral Katkılar Sempozyumu Bildiriler Kitabı)
11. TÇMB/AR-GE/Y99.1 TÇMB Çimento ve Beton Araştırma Geliştirme Enstitüsü
12. TÇMB/AR-GE/Y99.2 Traslar ve Traslı Çimentolar
13. Proceedings of 2nd International Symposium on "Cement and Concrete Technology in the 2000's" (2. Uluslararası Sempozyum "2000'lerde Çimento ve Beton Teknolojisi" Bildiriler Kitabı)
14. TÇMB/AR-GE/Y01.01 Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı
15. TÇMB/AR-GE/Y02.01 Beton Yollar
16. TÇMB/AR-GE/Y03.01 Uluslararası Beton Yollar Kongresi-Konuşma Metinleri
17. TÇMB/AR-GE/Y03.02 Çimento/Yeni Bir Çağın Malzemesi
18. TÇMB/AR-GE/Y03.03 Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri
19. TÇMB/AR-GE/Y04.01 Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar
20. TÇMB/AR-GE/Y04.02 Türkiye'de Çimento ve Beton Konularında Araştırmacılar ve Laboratuvarlar

YAYIN TALEP FORMU

Aşağıda yayın numarası sunulmuş olan yayınlarınızın adresime gönderilmesini arz ederim.

Adı :

Soyadı :

Mesleği :

Çalıştığı Kurum :

Adres :

İstenecek Yayınlar

Yayın talepleriniz için bu formu 0.312.265 09 06 numaralı faksa gönderebilir veya info@tcma.org.tr adresine mail atabilirsiniz.

