

PUZOLANİK MİNERAL KATKILAR VE TARİHİ GEÇMİŞLERİ

Dr. Sinan T. ERDOĞAN

Teknas Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Austin, Teknas

Prof.Dr. Turhan Y. ERDOĞAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Ankara

ÖZET

Beton yapımında kullanılan mineral katkı maddelerinin hemen hemen hepsi, puzolanik özelliğindedir.

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilen özeliğı kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir. Volkanik kül, volkanik tüf, diatomlu toprak ve pişirilmiş kil, “doğal puzolanlar”dır. Uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu, silis dumani, ve pirinç kabuğı külü, “yapay puzolanlar” sınıfına aittir.

Doğal puzolanlar, binlerce yıldan bu yana, söndürülmüş kireçle birleştirilerek, su altında da sertleşebilen ve suya dayanıklı harç ve bir tür beton yapımında kullanılmıştır. Portland çimentosunun icadından sonra da, hem doğal puzolanlar hem de yapay puzolanlar, portland çimentolu beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Gerek betonun birçok teknik özeliğini olumlu yönde değiştirmeleri, gerekse portland çimentosundan daha ekonomik olmaları ve beton karışımının içerisinde çimento ağırlığının %50'sine varan miktarlarda kullanılmaları nedeniyle, puzolanik katkı maddelerinin beton endüstrisinde çok önemli yeri bulunmaktadır.

Bu Bildiri'de doğal puzolanlar ile, yapay puzolanlardan uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu, silis dumanı ve pirinç kabuğu külü hakkında kısa açıklamalar yapılarak, tarihi geçmişleri anlatılmaktadır.

GİRİŞ

Mineral katkı maddeleri, beton yapımında kullanılan çimentonun, suyun, agreganın ve fiber donatının dışında, beton karışımının içerisine karılma işleminden hemen önce veya karılma işlemi esnasında katılan ince taneli mineral katı parçacıklardır [1]. Volkanik kül, volkanik tuf, diatomlu toprak, pişirilmiş kil, uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü ve taşunu, beton yapımında kullanılan başlıca mineral katkılarıdır. Bunlardan taşunu dışındakilerin hepsi puzolanik özelliklidir.

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince taneli durumda, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde, hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özeliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemeler” olarak tanımlanmaktadır [2-10].

Puzolanik malzemenin yeterli bağlayıcılığı gösterebilmesi için aşağıdaki koşulları sağlamış olması gerekmektedir [3]:

- İçerdiği silika ve alümina miktarı yüksek olmalıdır. (Çimento ve beton endüstrisinde kullanılacak puzolanlardaki “ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ” miktarının en az %70 olması istenmektedir.)
- Amorf yapıya sahip olmalıdır.
- Doğal haliyle çok ince taneli durumda, veya öğütülerek en az çimento inceliği kadar ince taneli duruma getirilmiş olmalıdır.

Puzolanik katkı maddelerinin dışında kalan her türdeki katkı maddesinin beton karışımında kullanıldıkları miktarlar çok az olmakla birlikte, puzolanik katkı maddelerinin kullanıldıkları miktarlar, genel olarak, çimento miktarının %10 - %50'si kadardır [4, 5]. Bazı betonların yapımında, bu oran %50'nin çok üstünde de olabilmektedir.

Puzolanik katkı maddelerinin yer alacağı betonda, mineral katkı kullanılmadan yapılacak betondakine kıyasla, çimento miktarında bir parça azaltma yapılmakta ve beton karışımına, azaltılan çimento miktarı kadar puzolanik katkı maddesi eklenmektedir. Böylece betondaki bağlayıcı malzeme, “portland çimentosu + puzolanik katkı maddesi”nden oluşturulmaktadır. (Mineral katkı maddeleri, bazan, betondaki ince agreganın bir kısmını oluşturmak üzere de kullanılabilir.)

“Portland çimentosu + puzolanik katkı maddesi”nin bağlayıcı malzeme olarak yer aldığı beton karışımlarda, bu malzemeler suyla temas eder etmez, önce, portland çimentosu hidratasyona başlamaktadır. Bilindiği gibi, portland çimentosundaki kalsiyum silikatlı anabileşenlerin hidratasyonu ile kalsiyum hidroksit ve çimentodaki asıl bağlayıcılık özeliğini yaratan kalsiyum-silika-hidrat ürünleri ortaya çıkmaktadır. İnce taneli puzolanik katkı malzemesi ise, portland çimentosunun hidratasyonu ile ortaya çıkan kalsiyum hidroksitle reaksiyona girerek hidrolik bağlayıcılık özellikli yeni kalsiyum-silika-hidrat ürünlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Puzolan katkılı beton karışımında çimento ağırlığında azaltma yapılarak azaltılan miktar kadar çok ince taneli puzolan kullanıldığından ve puzolanın özgül ağırlığı portland çimentosununkinden daha düşük olduğundan, daha büyük bağlayıcı hamur hacmi elde edilmektedir. Gerek bağlayıcı hamur hacminin artması ve gerekse çok ince taneli mineral katkı kullanılmış olması, taze betondaki ince agreganın mobilitesinin yüksek olmasını sağlamakta, işlenebilmeyi artırmaktadır.

Puzolan katkılı betonlarda çok ince taneli mineral katkılı tanelerinin yer alması, taze betonun içerisindeki suyu kendilerine daha iyi bağlamaktadır; böylece taze betondaki terlemenin daha az olmasına yol açmaktadır.

Puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda portland çimentosu kullanıldığı için, betonda yer alan trikalsiyum alüminat anabileşeni ve alkaliler de daha az olmaktadır. Bu durum, betonun sülfat dayanıklılığının artmasına ve betondaki alkali-agrega reaksiyonunun yaratacağı genleşme olasılığının azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca, çok ince taneli katkı maddeleri, betondaki boşlukların azalmasına, dolayısı ile betonun su geçirgenliğinin daha az olmasına yol açmaktadır.

Puzolan katkılı betonlarda daha az miktarda portland çimentosu kullanılması nedeniyle, betondaki hidratasyon ısı ve büzülme daha düşük olmaktadır. Hidratasyon ısısının açığa çıkma hızının düşük olması, baraj betonlarında ve diğer kütle betonlarda puzolan kullanımını ön plana çıkarmaktadır.

Puzolan katkılı betonun ilk zamanlardaki dayanımı, katkısız betonunkine kıyasla, genellikle daha düşük olmaktadır. Ancak, puzolanik reaksiyonların gelişmesiyle, nihai beton dayanımı oldukça yüksek olabilmektedir.

Puzolanik katkı maddelerinin kullanımı sadece teknik avantajlar sağlamamaktadır. Puzolanik malzemelerin maliyeti portland çimentosununkinden daha az olduğu için, istenilen kalitedeki betonun

puzolanik katkı ile de yapılmasıyla daha ekonomik beton elde edilebilmektedir.

Puzolanik katkı maddelerinin beton özelliklerine etkisi Çizelge 1'de özetlenmektedir.

Çizelge 1. İnce Taneli Puzolanik Katkı Maddelerinin Beton Özelliklerine Etkisi

Olumlu Etkileri
<ul style="list-style-type: none"> • İşlenebilmeyi artırmaktadır, • Terlemeyi ve segregasyonu azaltmaktadır, • Hidratasyon ısısının hızını ve miktarını azaltmaktadır, • Su geçirgenliği azaltmaktadır, • Alkali-agrega reaksiyonunu azaltmaktadır, • Sülfat hücumlarına karşı dayanıklılığı artırmaktadır, • Nihai basınç dayanımının yeterince yüksek olmasına yol açmaktadır, • Ekonomiklik sağlamaktadır.
Dikkat Edilmesi Gerekenler
<p>Puzolanik katkı malzemesi kullanımı, özellikle soğuk hava koşullarında, prizi geciktirir ve genellikle ilk günlerdeki dayanımın daha az olmasına yol açabilir. Puzolan katkılı betonların daha uzun süreli ve daha dikkatli kür edilmeleri gerekebilir. Ayrıca, betonda belirli miktarda sürüklenmiş havanın yer alabilmesi için, mineral katkısız betonda kullanılan daha yüksek miktarda hava sürükleyici katkı maddesi kullanımını gerektirebilir.</p>

Puzolanlar, genellikle, “doğal puzolanlar” ve “yapay puzolanlar” olarak iki sınıfta ele alınmaktadır. Aşağıda bu puzolan sınıfları hakkında kısa açıklamalar yapılmakta ve ilk kullanımları göz önüne alınarak tarihi geçmişlerine yer verilmektedir.

DOĞAL PUZOLANLAR HAKKINDA KISA AÇIKLAMALAR VE TARİHİ GEÇMİŞLERİ

Doğal puzolanlar, yeryüzünde doğal olarak yer alan ve puzolanik özeliğe sahip olan malzemelerdir. “Giriş” bölümünde isimleri sayılan katkı maddelerinden volkanik kül, tuf, ve diatom olarak adlandırılan mikroskopik

büyüklerdeki silisli algerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak, doğal puzolan sınıfına girmektedir. Bu malzemelerin dışında, 540 °C - 900 °C kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killer de doğal puzolanlar arasında yer almaktadır. (Kilin içerisinde yeterli miktarda silika ve alümina olduğu halde, bu malzeme, doğal haliyle puzolanik davranış göstermemektedir. Bunun nedeni, kildeki minerallerin kristal yapıya sahip oluşudur. Ancak, kil, pişirilme işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapı bozulmakta ve amorf yapı elde edilmektedir. O nedenle, pişirilmiş kil puzolanik özellik gösterebilmektedir.)

Volkanik külün, volkanik küllü toprakların veya pişirilmiş kilin söndürülmüş kireçle ve kumla birleştirilerek suya dayanıklı harç yapımında kullanılması işlemi binlerce yıl öncesine dayanmaktadır:

Bilim adamlarının Konya-Çatalhöyük'teki Neolitik çağa ait evlerin harçları üzerinde yaptıkları araştırmalar, orada kullanılan harçların 8000 yıl eski olduğunu ortaya çıkarmıştır [6, 11, 12]. Sadece kil, kireç, veya alçıdan oluşturulan harçların suya dayanıklı olmadıkları hatırlanacak olursa, oradaki harçların büyük bir olasılıkla volkanik kül içeren topraklarla yapılmış olma gerçeği elde edilmektedir. Zira, Çatalhöyük, Erciyes ve Hasandağı gibi dağların çok uzağında bir yer değildir. Girit'te, Rodos'ta ve birçok yerde üç dört bin yıl önce yapılmış olan su yapıları ve mozaik işleri de bugün hala dayanıklılığını korumaktadır. Bu yapılarda da puzolan ve söndürülmüş kireçten oluşan bağlayıcılar kullanılmıştır [13, 14]. Ancak, puzolan tanımına giren malzemelere “puzolan” isminin verilmesi ve o tür malzemelerin harç ve beton yapımında yaygın olarak kullanımı, MÖ 300 yılı civarında Romalılar tarafından başlatılmıştır.

Puzolanik malzemelerin bağlayıcılık potansiyelinin Romalılar tarafından keşfedilmesi ve bu tür malzemelerin pozzolana (puzolan) olarak anılmaya başlanması, Romalı ünlü mimar Marcus Vitruvius Pollio'nun MÖ 30 - MÖ 20 yılları arasında tamamladığı *De Architectura Libri Decem* - Mimarlık Üzerine On Kitap [15] isimli eserinin ikinci kitabında bahsedilmektedir. Vitruvius'a göre, Romalılar, pişirilmiş kilin veya öğütülmüş tuğla veya kiremitin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır [15]. Romalılar volkanik küllü, volkanik küllü toprağı, veya pişirilmiş kili, söndürülmüş kireçle ve suyla birleştirerek, su altında da sertleşebilen bağlayıcı hamur elde etmişlerdir. Bu tür bağlayıcıların içerisine taş parçaları gömerek, bugünkü betona benzer betonlar yapmışlardır. Osmanlılar zamanında yaygın olarak kullanılan “Horasan harcı” da kilden yapılan ve pişirilen tuğla, kiremit, çömlek gibi malzemelerin öğütülmüş durumdayken söndürülmüş kireçle birleştirilmesi sonucunda elde edilmiştir.

Portland çimentosu ilk olarak 1824 yılında üretildiğine göre, yukarıda anlatılan ve puzolan içeren harçlardaki ve betonlardaki puzolanik malzeme, bu malzemenin “portland çimentolu betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılması” tanımına girmemektedir. Dolayısı ile, ince taneli durumdaki puzolanik malzemenin beton yapımında katkı maddesi olarak kullanımı 1900’lü yıllarda başlamıştır.

ABD’de büyük miktarda (100,000 ton) ince taneli doğal puzolanın (öğütülmüş pomza’nın) beton katkı maddesi olarak kullanıldığı ilk proje, 1910-1912 yılları arasında yapılan Los Angeles Akedüğü’nün betonlarıdır [10]. Çizelge 2’de, betonlarında doğal puzolan kullanılan ve en az otuz yıl önce yapılan bazı barajlar belirtilmektedir [16].

Çizelge 2. Betonları İnce Taneli Doğal Puzolan Katkı Maddesiyle Yapılan Bazı Barajlar

Yıl	Baraj	Puzolan Cinsi	Miktarı
1949	Pieve di Cadore (İtalya)	Pomza	50 kg/m ³
1957	Monticello (ABD)	Pişirilmiş diatomlu toprak	42 kg/m ³
1962	Flaming Gorge (ABD)	Pişirilmiş şeyl	56 kg/m ³
1963	Glen Canyon (ABD)	Pomza	56 kg/m ³
1974	Ilha Solteira (Brezilya)	Pişirilmiş kil	27 kg/m ³

YAPAY PUZOLANLAR HAKKINDA KISA AÇIKLAMALAR VE TARİHİ GEÇMİŞLERİ

Yapay puzolanlar, endüstriyel bir üretim esnasında yan ürün olarak ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu ve silis dumanı en çok kullanılan yapay puzolanlardır. Piringç kabuğu külü de, özellikle Çin, Hindistan, Pakistan gibi bazı Asya ülkelerinde yaygın kullanımı olan bir başka yapay puzolandır.

UÇUCU KÜL

Uçucu kül, termik santrallarda elektrik enerjisi üretimi için yakıt olarak kullanılan pulverize kömürün yakılması sonucunda yan ürün olarak elde edilmektedir. Kalsiyum oksit, demir oksit, magnezyum oksit, karbon gibi maddelerin dışında çok yüksek miktarda silika ve alümina içeren ve amorf yapıya sahip olan bu kül parçacıklarının boyutları 1 µm - 150 µm arasında değişmektedir [3, 6, 7, 9, 17 -21].

Pulverize kömür küllerinin kompozisyonları ile ilgili araştırmalar 1900 yılı civarında başlamıştır. Bu küllerin kompozisyonları ile doğal puzolanların kompozisyonları arasında benzerlik görölmesi üzerine, pulverize kömür küllerinin puzolanik özellikleri araştırılmaya başlanmıştır. Ancak, ilk yıllarda denenen küllerle başarılı beton yapımı elde edilememiştir. Pulverize kömür küllerinin yeterli ölçüde puzolanik özellik gösterebilmeleri için kömürün yanma sıcaklığının yüksek olması ve küllerin nispeten hızlı olarak soğutulması gerektiği anlaşılmıştır. İstenilen kalitedeki uçucu küller ancak 1930'lu yılların başlarında ABD'de Cleveland Electric Illuminating Company ve Detroit Edison Company gibi elektrik üreten şirketler tarafından yan ürün olarak ortaya çıkarılan küller olmuştur. Dolayısı ile, uçucu küllerin beton yapımında mineral katkı olarak kullanımına dair ilk çalışmalar 1932 yılında başlamıştır [7].

1932 yılından itibaren ABD-Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinde R. E. Davis, R. W. Carlson, J. W. Kelley ve H. E. Davis tarafından ortak olarak yapılan ve sonuçları yayımlanan araştırmada, beton yapımında kullanılacak çimento miktarının %30 - %50'si kadarının yerine uçucu kül konulduğu takdirde istenilen özelliklerdeki betonun elde edilebileceği belirtilmiştir [22]. Böylece, 1937 yılından itibaren, uçucu kül, beton yapımında mineral katkı maddesi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yeterli puzolanik aktiviteyi gösteren uçucu küller her tür beton yapımında başarıyla kullanılabilir. Uçucu küllerle yapılan betonların hidrasyon ısısı düşük olduğu için, bu tür malzeme özellikle kütle beton yapımında önem taşımaktadır.

Uçucu küllü betonun kullanıldığı ilk büyük proje, yapımına 1948 yılında başlanılan ABD-Montana'daki Hungry Horse Barajı'dır. Bu barajın betonlarında kullanılan portland çimentosu miktarı, ağırlıkça, %32.4 kadar uçucu külle değiştirilmiştir [22].

1960'lı yıllardan itibaren birçok barajın betonlarında uçucu kül kullanılmıştır. Çizelge 3'te, 30-40 yıl kadar önce betonları uçucu külle yapılmış olan bazı baraj isimleri belirtilmektedir [16].

Çizelge 3. Beton Katkı Maddesi Olarak Uçucu Kül Kullanılan Bazı Barajlar

Yıl	Baraj	Miktar, kg/m ³
1965	Yellowtail (ABD)	50
1972	Dworshak (ABD)	42
1972	Libby (ABD)	29
1979	Peace Site 1 (Kanada)	63

GRANÜLE YÜKSEK FIRIN CURUFU

Bilindiği gibi, demir cevheri, doğada demir oksit olarak bulunmaktadır; içerisinde bir miktar silika, alümina, kükürt gibi yabancı maddeler de yer almaktadır. Demir elde edebilmek için, demir oksitteki oksijenin dışarı çıkartılması ve ayrıca, cevherin, içerisindeki yabancı maddelerden arındırılması gerekmektedir. Bu amaçla, yüksek fırın olarak adlandırılan bir fırının içerisine kademeler halinde kok kömürü, kalkertaşı ve cevher yerleştirilmekte, kok kömürünün yakılmasıyla da, yaklaşık 1600 °C sıcaklık uygulanmaktadır. Kok kömürünün karbonu ile demir oksitteki oksijen birleşerek karbon monoksit veya karbon dioksit gazları halinde ortamı terk ettikten sonra, geride, eriyik durumda demir ve yine eriyik durumda yabancı maddeler topluluğu (curuf) bırakmaktadır. Yan ürün olarak elde edilen curufun içerisinde büyük miktarlarda silika, alümina ve kalsiyum oksit yer almaktadır.

Yüksek fırından eriyik durumda dışarıya çıkartılan curuf, havada yavaş soğuma işlemine tabi tutulduğu takdirde, kristal yapılmaktadır; ancak, suya dökülerek veya başka bir işlemle çok hızlı soğumaya tabi tutulacak olursa, iri kum taneleri büyüklüğünde granüle duruma gelmekte ve amorf yapıya sahip olmaktadır.

Yüksek fırın curufunun granüle duruma getirilmesiyle ilgili ilk çalışmalar 1862 yılında Alman Emil Langen tarafından başlatılmıştır [23]. Daha sonraki yıllarda, Michaels, Prussing, Tetmayer, Prost ve Green, granülasyon konusuyla ilgilenen ve curufun yapısını inceleyen araştırmacılar olmuşlardır [23].

Granüle yüksek fırın curufu amorf yapıda olduğundan ve yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden, öğütülerek ince taneli duruma getirildiği takdirde puzolanik özellik gösterebilmektedir. Bu özellikten yararlanılarak, 1865 yılında Almanya'daki bir fabrika "öğütülmüş granüle yüksek fırın curufu + söndürülmüş kireç" karışımından oluşan bir tür çimento üretmeye başlamıştır. 1889 yılında Fransa'da Paris metrosunun yapımında kullanılan

harçlarda da öğütülmüş granüle yüksek fırın curufu ve söndürülmüş kireç karışımı kullanılmıştır [23].

Portland çimentosu klinkeri ve granüle yüksek curufunun birlikte öğütülmesiyle elde edilen curuf lu çimentonun ticari ürün olarak üretimi ise, Almanya'da 1892 yılında, ABD'de de 1896 yılında gerçekleşmiştir.

Granüle yüksek fırın curufunun öğütülme işlemine tabi tutulduktan sonra beton katkı maddesi olarak kullanılması 1950 yılından sonra başlatılmıştır. Bu uygulamanın başlamasında Güney Afrikalı N. Stutterheim tarafından 1948 - 1952 yıllarında yapılan araştırmalarda elde edilen olumlu sonuçların büyük rolü olmuştur [6, 24, 25].

ABD'de, Kanada'da, Japonya'da ve birçok ülkede üretilen granüle yüksek fırın curufunun tamamına yakını artık ayrı öğütülmeye tabi tutularak beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Zira granüle yüksek fırın curufunun beton katkı maddesi olarak kullanılmasının, curuf lu çimento üretiminde kullanılmasına kıyasla, birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [6, 9, 25, 26].

- Granüle yüksek fırın curufu, portland çimentosu klinkerinden daha sert bir malzemedir. Curuf lu çimento üretebilmek için bu iki malzeme birlikte öğütüldüğünde, çimentonun içerisinde yer alan curuf tanecikleri klinker kadar ince olamamaktadır. Oysa curuf ne kadar ince taneli olur ise, puzolanik özeliği o kadar artmaktadır. Ayrı öğütülerek istenilen inceliğe getirilen curufun beton katkı maddesi olarak kullanılmasından daha büyük verim sağlanmaktadır.
- Normal olarak her tür çimento, depoda kaldığı süre içerisinde havadan bir miktar nem alarak prehidratasyon (önhidratasyon) göstermektedir. Böyle bir durum, çimentonun bağlayıcılık gücünü azaltmaktadır. Öğütülmüş granüle yüksek fırın curufu, çimento gibi prehidratasyon göstermediği için daha iyi depolanma özeliğine sahiptir.
- Öğütülmüş granüle yüksek fırın curufunun beton katkı maddesi olarak kullanılması, beton karışımlarına esneklik getirmektedir; yani, curuf lu çimentonun içerisinde çimento üreticisi tarafından katılmış belirli miktarda curuf bulunurken, öğütülmüş granüle yüksek fırın curufunun mineral katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, optimum incelikteki ve miktardaki curuf la istenilen özellikteki beton elde edilebilmektedir.
- Katkı maddesi olarak kullanılan çok ince taneli curuf, betonun işlenebilmesini artırmaktadır.

SİLİS DUMANI

Silikon metali veya silikon metalli alaşımlar, yüksek saflıktaki kuvarsın yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta indirgenmesiyle elde edilmektedir. Bu işlem esnasında çok büyük kısmı SiO'dan oluşan gazlar çıkmaktadır. Gaz halindeki SiO'nun fırının nispeten soğuk bölgesinde havayla temas ederek çok çabuk yoğunlaşmasıyla, gazın içerisindeki SiO, amorf yapıya sahip SiO₂ durumuna dönüşmektedir. Böylece, tanecikleri 0.1 µm - 0.2 µm olan atık malzeme elde edilmiş olmaktadır. %85 - %98 kadar silika içeren ve amorf yapıya sahip olan bu atık malzemeye "yoğunlaştırılmış silis dumanı" veya kısaca "silis dumanı" denilmektedir. Bu malzeme, "mikrosilika" veya "silika tozu", veya "silika fûme" gibi isimlerle de anılmaktadır [27 - 29].

Çok büyük miktarda silika içeren, amorf yapıya sahip olan, ve çimento tanelerinin inceliğinin yaklaşık yüzde biri kadar ince taneli olan silis dumanı, aktivitesi çok yüksek olan mükemmel bir puzolandır. Bu malzeme çimento üretiminde de kullanılmakla beraber, daha çok, beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Beton yapımı için kullanılacak çimento miktarı yaklaşık %10 kadar azaltılmakta ve yerine silis dumanı eklenmektedir. Silis dumanının puzolanik aktivitesi çok yüksek olduğundan, bu malzemeyle yüksek dayanımlı betonlar elde edilebilmektedir [6, 28 - 30].

Silis dumanının beton katkı maddesi olarak kullanılabilirliği, ilk olarak 1950 yılında Norveç Teknoloji Enstitüsünde araştırılmıştır. Araştırmanın olumlu sonuçlarına dayanılarak, bu malzeme, Oslo'daki Blindtarmen Tüneli'nin betonlarının yapımında kullanılmıştır. O projenin betonlarına %15 civarında silis dumanı katılmıştır [30].

Kuzey Amerika'da silis dumanı ile ilgili ilk araştırmalar 1971 yılında Kanada'daki Sherbrooke Üniversitesinde P. C. Aitcin ve 1980 yılında ABD-Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinde P. K. Mehta tarafından başlatılmıştır [30].

PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ

Pirinç, çeltik bitkisinden elde edilen kapçıklı tane ürünün çeltik fabrikalarında işlenerek, pirinç tanelerinin, üzerindeki kabuklardan ve çeltik saplarından ayrılması sonucunda elde edilmektedir. Pirinç tanelerinin üzerinde iki kabuk yer almaktadır. Kepek denen sarımsı renkte ince zar gibi olan birinci kabuk pirinç tanelerinin etrafını sarmaktadır. Besleyici özellikteki bu kabuk bazan pirinç tanelerinin üzerinde bırakılsa da, genellikle hayvan yemi olarak kullanılmaktadır. Kapçık veya kavuz denen ikinci kabuk, pirinç tanelerinin en dışındaki kabuktur. Çeşitli organik ve inorganik bileşenlerden

oluşan bu kabuk, yüksek miktarda (%92 - %93) silika içermektedir. Bir ton pirinç üretiminde yaklaşık olarak 200 kg (%20) kadar pirinç kabuğu ortaya çıkmaktadır [31]. Başta Çin, Hindistan, Bangladeş ve Tayland olmak üzere, dünyadaki yıllık pirinç üretimi 500 milyon ton civarındadır [32]. Bu demektir ki, pirinç üretimi esnasında elde edilen yıllık pirinç kabuğu miktarı 100 milyon ton kadardır.

Pirinç kabukları birçok ülkede yakıt olarak kullanılmaktadır. Pirinç kabuklarının yakılmasıyla ortaya çıkan kül miktarı, kabuk miktarının ağırlıkça %20'si kadardır. Bir başka deyişle, yılda 500 milyon ton pirinç üretiminde elde edilen 100 milyon ton pirinç kabuğunun yakılması sonucunda, 20 milyon ton civarında kül ortaya çıkmaktadır [32].

Pirinç kabuğu külünün içerisinde yer alan ağırlıkça %92 - %93 kadar silikanın yanı sıra çok küçük yüzdelerde alümina, demir oksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit ve alkaliler de bulunmaktadır. Yakılma işlemi 400 °C - 600 °C arasındaki sıcaklıklarda kontrollü olarak yapıldığında ve külün soğutulma işlemi hızlı olduğunda, küldeki silika amorf yapıya sahip olmaktadır. Çok yüksek miktarda amorf silika içeren kül, puzolanik özellikli bir malzemedir.

Kerpiç blokların ve tuğlaların yapımında pirinç kabuğu külünden yararlanılmasına çok eski yıllarda başlamıştır. Hatta 1924 yılında, pirinç kabuğu külünün betonda kullanımına dair Almanya'da iki patent alınmıştır [31]. 1950 - 1960 yılları arasında da Pakistan'lı Ahsanullah ve arkadaşları çimento/kül oranı 5:1 - 1:20 arasında değişen karışımlarla portland çimentolu bloklar yapmışlardır [31]. Ancak, pirinç kabuğu küllerinin puzolanik özellik gösterebilmesi ve puzolanik özellikli küllerin çimento ve beton yapımında kullanılmalarına dair araştırmalar, 1970'li yılların sonlarına kadar yapılmamıştır. ABD-Berkeley'deki Kaliforniya Üniversitesinin öğretim üyelerinden P. K. Mehta, puzolanik özellikli pirinç kabuğu elde edilebilmesi için kontrollü yakma fırınının tasarlanmasında ve pirinç kabuğu katkı maddesi olarak kullanılabilmesinde öncü isim olmuştur [31].

KAYNAKLAR

- 1) ACI Committee 116, 116R-90, "Cement and Concrete Terminology," *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, 1994, pp.116R-1 to 116R-68.
- 2) ASTM C 618, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete," *Annual Book of ASTM Standards*, 1994

- 3) Erdoğan, T. Y., *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri*, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul, 2004.
- 4) Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., *Sorular ve Yanıtlarıyla Beton*, Türkiye Hazır Beton Birliği, 2006.
- 5) Ramachandran, V. S., *Concrete Admixtures Handbook*, Second Edition, Noyes Publication, New Jersey, U.S.A., 1995.
- 6) Erdoğan, T. Y., *Admixtures for Concrete*, Middle East Technical University Press, Ankara, 1997.
- 7) Price, W. H., "Pozzolans - A Review," *Journal of the American Concrete Institute*, May 1975, pp.225-234.
- 8) Gutt, W. and Nixon, P. J., "Use of Waste Materials in the Construction Industry," *Materials and Structures*, No.70, July-August 1979, pp.255-306.
- 9) Mielenz, R. C., "Mineral Admixtures - History and Background," *Concrete International*, ACI, Aug. 1983, pp. 34-42.
- 10) Cook, D. J., "Natural Pozzolanas," *Concrete Technology and Design, Vol. 3, Cement Replacement Materials*, Surrey University Press, 1986, p.2.
- 11) Davidovits, J., "Ancient and Modern Concretes: What is the Real Difference?" *Concrete International*, Dec. 1987, pp. 23-29.
- 12) Erdoğan, S. T. ve Erdoğan, T. Y., "Puzolanların Bağlayıcılık Potansiyelinin Romalılar Tarafından Keşfi ve Romalılardan Önce Puzolan Kullanımı," *Hazır Beton*, Temmuz-Ağustos 2005, s. 50-52.
- 13) Malinowski, R., "Concretes and Mortars in Ancient Aqueducts," *Concrete International*, Jan. 1979, pp.66-76.
- 14) Malinowski, R., "Prehistory of Concrete," *Concrete International*, March 1991, pp.23-29.
- 15) Vitruvius, P., *Ten Books on Architecture*, Translated by Ingrid D. Rowland, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- 16) ACI Committee 207, "Mass Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, 1994, pp.207. IR-1 to 207. IR-44.
- 17) Lane, R. O. and Best, J. F., "Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete," *Concrete International*, ACI, July 1982, pp.81-92.
- 18) Cook, J. E., "Fly Ash in Concrete – Technical Considerations," *Concrete International*, ACI, Sept. 1983, pp.51-59.
- 19) Erdoğan, T. Y., "Strength Properties of Low-Lime and High-Lime Fly Ash Concretes," *Proceedings, Ninth International Ash Use Symposium*, Vol.1, Jan. 1991, pp.16-1 to 16-12.

- 20) Erdoğan, T. Y., "High-Lime Fly Ash Concretes," *Proceedings*, Cairo First International Conference on Concrete Structures, Vol.1, Jan. 1996, pp. 4-1 to 4-9.
- 21) Berry, E. E. and Malhotra, V. M., "Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review," *Journal of the American Concrete Institute*, March - April 1980, pp. 59-73.
- 22) Davis, R. E., Carlson, R. W., Kelly, J. W. and Davis, H. E., "Properties of Cements and Concretes Containing Fly Ash," *ACI Journal*, Proceedings, V.33, No.5, May-June 1937, pp.577-612.
- 23) ACI Committee 226, "Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Constituent in Concrete," *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, 1994, pp.226. IR-1 to 226 IR-15.
- 24) Stutterheim, N., "Portland Blast-Furnace Cement - A Case for Separate Grinding of Slag," *Proceedings*, Fifth International Symposium on Chemistry of Cement, Cement Association of Japan, Part IV, Tokyo 1969, pp.270-274.
- 25) Spellman, L. U., "Granulated Blast-Furnace Slag as a Mineral Admixture," *Concrete International*, ACI, July 1982, pp.66-71.
- 26) Erdoğan, T. Y., "Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Curufu ve Kullanımı," Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu (29-30 Kasım 1995, Ankara), TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, *Bildiriler Kitabı*, s.1-13.
- 27) Erdoğan, T. Y., "*Beton*, Middle East Technical University Press, Ankara, 2003.
- 28) Malhotra, V. M., Carette, G. G. and Sivasundaram, V., "Role of Silica Fume in Concrete: A Review," *Advances in Concrete Technology*, CANMET-Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada, 1992, pp.925-991.
- 29) Malhotra, V. M. and Carette, G. G. "Silica Fume Concrete - Properties, Applications, and Limitations," *Concrete International*, ACI, May 1983, pp.40-46.
- 30) Mehta, P. K., "Condensed Silica Fume," *Cement Replacing Materials*, Vol.3, Surrey University Press, 1986, pp.136, 137.
- 31) Cook, D. J., "Rice Husk Ash," *Concrete Technology and Design*, Vol.3, *Cement Replacement Materials*, Surrey University Press, 1986, pp. 171-196.
- 32) Malhotra, V. M., "Fly Ash, Slag, Silica Fume and Rice Husk Ash in Concrete: A Review," *Concrete International*, April 1993, pp. 23-28.