

2. Gün
13 Nisan 2007 • Cuma

II. Oturum

Oturum Bařkanı:
Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

PUZOLANİK MİNERAL KATKILAR VE TARİHİ GEÇMİŞLERİ

Dr. Sinan T. ERDOĞAN

Teknas Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Austin, Teksas

Prof.Dr. Turhan Y. ERDOĞAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü
Ankara

ÖZET

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

Puzolanlar, kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan, fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özeliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemelerdir. Volkanik kül, volkanik tuf, diatomlu toprak ve pişirilmiş kil, “doğal puzolanlar”dır. Uçucu kül, granüle yüksek fırın curufu, silis dumani, ve pirinç kabuğu 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 katkılardır. Bunlardan taşunu dışındakilerin hepsi puzolanik özelliklidir.

Puzolanlar, “kendi başlarına bağlayıcılık değeri olmayan veya çok az bağlayıcılık değeri olan, fakat ince taneli durumdayken, sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştğinde, 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 çimentosunununkinden 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 ısının 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 çimentosunununkinden 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
• 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
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 kullanılandan daha yüksek miktarda hava sürükleyici katkı maddesi kullanımını gerektirebilir.

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

büyükölükteki silisli algerin kalıntılarını içeren diatomlu toprak, doğal puzolan sınıfına girmektedir. Bu malzemelerin dışında, 540 °C - 900 °C kadar pişirilme işlemine tabi tutulmuş olan bazı killler de doğal puzolanlar arasında yer almaktadır. (Kilin içerisinde yeterli miktarda silika ve alümina olduğu halde, bu malzeme, doğal haliyle puzolanik davranış gösterememektedir. 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 söndürölmüş 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 söndürölmüş 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 öğütölmüş tuğla veya kiremitin de puzolanik özellik gösterdiğinin bilincinde olmuşlardır [15]. Romalılar volkanik külü, volkanik küllü toprağı, veya pişirilmiş kili, söndürölmüş 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 öğütölmüş durumdayken söndürölmüş 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. Piring 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 görülmesi 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 küle değiştirilmiştir [22].

1960'lı yıllardan itibaren birçok barajın betonlarında uçucu kül kullanılmıştır. Çizelge 3'te, 30-40 yıl kadar önce betonları uçucu küle 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, kalktaşı 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 yapıli olmaktadır; 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 curufllu çimentonun ticari ürün olarak üretimi ise, Almanya'da 1892 yılında, ABD'de de 1896 yılında gerçekleşmiştir.

Granüle yüksek fırın curufunun öğütölme 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 öğütölme tabi tutularak beton katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Zira granüle yüksek fırın curufunun beton katkı maddesi olarak kullanılmasının, curufllu 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. Curufllu çimento üretebilmek için bu iki malzeme birlikte öğütölündüğünde, çimentonun içerisinde yer alan curuf tanecekleri klinker kadar ince olamamaktadır. Oysa curuf ne kadar ince taneli olur ise, puzolanik özeliğı o kadar artmaktadır. Ayrı öğütölerek 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. Öğütölmiş granüle yüksek fırın curufu, çimento gibi prehidratasyon göstermediğı için daha iyi depolanma özeliğine sahiptir.
- Öğütölmiş granüle yüksek fırın curufunun beton katkı maddesi olarak kullanılması, beton karışımlarına esneklik getirmektedir; yani, curufllu çimentonun içerisinde çimento üreticisi tarafından katılmış belirli miktarda curuf bulunurken, öğütölmiş granüle yüksek fırın curufunun mineral katkı maddesi olarak kullanılmasıyla, optimum incelikteki ve miktardaki curuflla 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., Carrette, 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 Carrette, 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.

KİMYASAL VE MİNERAL KATKILARIN KÜTLE BETONU TASARIMINDA YERİ VE ÖNEMİ

Aydın SAĞLIK

Kimya Yük. Müh.

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

Ergin TUNÇ

Şube Müdürü

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

M. Fatih KOCABEYLER

Daire Başkan Yrd.

DSİ-TAKK Dairesi Başkanlığı

Beton-Malzeme Lab. Şb. Md.

Ankara/Türkiye

ÖZET

Kütle betonu, çimentonun su ile reaksiyonu sırasında açığa çıkan hidratasyon ısı ve bunu takip eden hacim değişiklikleri neticesinde termal çatlak oluşumlarının en alt seviyeye çekilmesi maksadıyla tedbirler alınması gerekli olan büyük boyutlu betonlar için kullanılan bir ifadedir.

Kütle beton tasarımında termal etkiler, dayanıklılık ve ekonomi, ön planda olup dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik (ısı açığa çıkaran) olması ve betonun ısı iletim özelliğinin düşük olması nedeniyle açığa çıkan ısıнын transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeniyle bazen oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşabilmektedir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kaybı hızının da bu tip beton yapılarında oldukça düşük olması nedeniyle çevre sıcaklığına soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşılınca kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre

sıcaklığına ulaşılması ile birlikte önemli çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi, servis ömrünün kısalınamaması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatlice ele alınması zorunludur.

Bu makalede, yıllardan beri inşa edilmiş olan beton barajlardan elde edilmiş olan bilgi birikimleri ışığında kütle betonda kullanılan malzemeler ve karışım oranları tasarımı ile ilgili önemli görülen bazı bilgiler ele alınmaktadır.

GİRİŞ

Kütle betonu yapılarında termal gerilimler nedeniyle çatlak oluşumlarının engellenebilmesi oldukça önemlidir. Dolayısı ile tasarım çalışmaları bu tip çatlakların meydana gelme riskini en düşük seviyeye çekecek şekilde gerçekleştirilmeli ve tasarım aşamasında da inşaat aşamasında da belirlenen kriterlere titizlikle uyulmalıdır. Isıl çatlak oluşumları riskini etkileyen temel parametreler şöyle sıralanabilir:

- ✓ Kullanılan bağlayıcı malzemenin (çimento + uçucu kül) hidratasyon ısısı,
- ✓ Toplam bağlayıcı miktarı,
- ✓ Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı,
- ✓ Beton elemanın şekli ve büyüklüğü,
- ✓ Ard soğutma işlemi ile alınan ısı,
- ✓ Döküm anında ve sonrasında çevre sıcaklığı,
- ✓ Betonun ısı özellikleri (özellik ısı, ısı iletkenlik, ısı genleşme katsayısı, vb.)
- ✓ Betonun çekme dayanımı,
- ✓ Betonun elastisite modülü,

Isıl çatlak oluşumları beton yapıdaki en düşük ve en yüksek sıcaklık değerlerinin arasındaki fark (yukarıda verilen parametrelere bağlıdır), betonun ısı genleşme katsayısı, betonun çekme dayanımı ve elastisite modülü parametrelerine bağlı olarak meydana gelmektedir. Beton yapıdaki sıcaklık farkının düşük olması parametrelerinden biri/birkaçı veya tamamının bir arada etkin bir şekilde kullanılması suretiyle çatlak oluşum riskinin azaltılabilmesi/ortadan kaldırılması temin edilebilmektedir.

Literatürde ve kütle betonu ile ilgili otoritelerce kabul edildiği üzere sıcaklık farkı için aşılması gerekli olan sınır değer birçok kaynakta genellikle

20°C olarak verilmektedir. 20°C'lik fark emniyetli tarafta kalınması açısından önerilen sıcaklık farkıdır. Beton yapıdaki sıcaklık farkının belirlenen bu sınır değerinin altında tutulması önemlidir. Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığı bunu temin edebilmek için kullanılan faktörlerden bir tanesidir. Bu sıcaklığın belirlenmesine yönelik olarak kütle betonlarında bazı termal, fiziksel ve mekanik özelliklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Belirlenmesi gerekli özellikler genellikle zaman ve sıcaklığa bağlı faktörlerdir. Bu faktörler aşağıda özetlenmiştir;

- ✓ Adyabatik Sıcaklık Artışı (ΔT) : Örneğin şantiyede farklı bağlayıcı dozajlarında büyük ölçekli testlerin gerçekleştirilmesi ve adyabatik sıcaklıkların zamana bağlı tespit edilmesi. Adyabatik sıcaklık artışı şu şekilde hesaplanır; $\Delta T = T_p + \Delta T_a - T_{Amb} - T_{HL}$; Burada, T_p yerleştirme sıcaklığı, ΔT_a adyabatik sıcaklık artışı, T_{Amb} ortalama çevre sıcaklığı ve T_{HL} ısı kayıpları nedeniyle sıcaklık azalmasıdır. Adyabatik sistemlerde T_{HL} sıfır kabul edilebilir.
- ✓ Kısıtlanma faktörü, K_f veya K_r : Kısıtlanma faktörü 0 ilâ 1 arasında değişen bir katsayıdır. K_f betonun kendi içindeki kısıtlanma faktörü iken K_r temelden bağlanmadan dolayı oluşan kısıtlanma faktörüdür. Temel olarak kaya esas alınırsa $K_r=1,0$ alınabilir. Betonun büzülmeyle karşı herhangi bir kısıtlanması yok ise (serbest) $K_r=0,0$ dır.
- ✓ Betonun ve bileşenlerinin özgül ısıları (C) : Yaklaşık bir değer olarak 0,85 ile 1,17 kJ/kg °C değerleri arasında kullanılabilir, Bu değer büyük ölçüde agreganın özgül ısısına yakın bir değerdir.
- ✓ Termal diffüzivite (h^2) : özgül ısı, ısı iletim katsayısı ve yoğunluğa bağlı olarak hesaplanabilir, $h^2 = k/\rho C$, kütle betonunda yaklaşık 0,002 ilâ 0,007 m²/h değeri kullanılabilir.
- ✓ Isıl iletim katsayısı (k) : betonun ısı transfer etme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Bir çok beton için yaklaşık 1,5 ilâ 4,5 W/m °K arasında değişir.
- ✓ Termal genleşme katsayısı (α_c) : Sıcaklık değişimlerine karşı betonun genleşme oranıdır. Betonda ortalama $7,4 \times 10^{-6}$ ilâ 13×10^{-6} °C⁻¹ arasında değişir.

AMAÇ

Kütle betonu tasarımında mineral ve kimyasal katkı kullanılmasının önemli bir yeri vardır. Özellikle hidrasyon ısısının azaltılması ancak hidrasyon ısı düşük çimento ve bağlayıcılar ile mümkün olabilmektedir.

Düşük hidratasyon ısılı çimento bulunmadığı durumlarda ise puzolanik malzemelerden (mineral katkıları) faydalanmak kaçınılmazdır. Diğer bir husus ise kimyasal katkıların gerekli durumlarda kullanılması konusudur. Kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışını kontrol etmek amacıyla özellikle çimento hidratasyon hızını yavaşlatıcı kimyasalların kullanılması (priz geciktirici kimyasal katkıları) oldukça önemlidir. Ayrıca gerekli yerlerde hava sürükleyici katkıların kullanılması da betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerinin iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Bu makalemizde bu konularla ilgili özet bilgiler verilecektir.

MALZEMELER VE KARIŞIM ORANLARI TASARIMI

Diğer betonlarda olduğu gibi kütle betonu da çimento, agrega, su ve sıklıkla puzolanlar ve beton katkı maddeleri kullanılarak tasarlanmaktadır. Kütle beton karışım elemanları miktarı tayininde amaç; işlenebilirlik, düşük sıcaklık artışı, boyutsal kararlılık, ekonomi, çatlak oluşumlarının engellenmesi, dayanıklılık, yeterli dayanım ve özellikle su yapılarında düşük su geçirgenlik kriterlerinin sağlanmasıdır. Bu kısımda geçmiş tecrübeler çerçevesinde kütle beton inşasında başarı ile kullanılmış olan malzemeler, malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı ile ilgili bilgiler aktarılmaktadır.

Çimento

Kütle betonunda aşağıda belirtilen çimento türlerinin kullanılması uygun görülmektedir:

- a) Düşük hidratasyon ısılı Portland çimentosu,
- b) Portland çimentosu+mineral katkı veya katkılı çimento.

Portland çimentosu, mineral katkı (puzolan) veya başka çimentolar ile birlikte kullanıldığında, malzemelerin karışımı beton santralinde ayrı-ayrı yapılmaktadır. Ekonomi ve düşük hidratasyon ısısı toplam çimento miktarının sınırlandırılması ile gerçekleştirilebilmektedir. Normal Portland çimentoları beton yapıların çoğunda kullanılabilir. Ancak, kütle betonunda yüksek hidratasyon ısısı ve dolayısı ile yüksek sıcaklık riski nedeni ile tek başına kullanılması önerilmez. Portland çimentosu ile birlikte mutlaka uygun bir puzolanik malzeme (mineral katkı) kullanılmalıdır.

Hidratasyon ısısı orta dereceli olan portland çimentolarında erken ısı gelişimi yüksek olan trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %8 ile sınırlandırılmaktadır. Buna ilave olarak bazı şartnamelerde trikalsiyum alüminat ve trikalsiyum silikat (C_3S) toplamının en fazla %58 olması yanı sıra hidratasyon ısısının 7 günde en fazla 70cal/g olması kriteri bulunmaktadır.

Söz konusu şartnamelerde belirtilen ek kriterlerin ($(C_3A + C_3S) \leq \%58$ ve/veya 7 günlük hidratasyon ısı $\leq 70 \text{ cal/g}$) dikkate alınması durumunda 28 günlük basınç dayanımı kriteri de daha düşük bir değere çekilebilmektedir.

Kütle betonlarında hidratasyon ısısının oldukça düşük olmasının gerekli olduğu durumlarda düşük hidratasyon ısıli portland çimentolar da kullanılabilir. Ancak, düşük hidratasyon ısıli çimentoların temininin zor olması ve hidratasyon ısısı gelişiminin başka bazı yöntemler kullanılarak kontrol altına alınmasının mümkün olmasından dolayı son yıllarda kullanılmamaktadır. Bu tür çimentolarda trikalsiyum alüminat (C_3A) bileşeni en fazla %7, trikalsiyum silikat (C_3S) bileşeni en fazla %35 ve dikalsiyum silikat (C_2S) bileşeni ise en az %40 ile sınırlandırılmaktadır.

Sülfata dayanıklı portland çimentosu hem düşük alkali ve hem de düşük hidratasyon ısıli olduğundan dolayı tercih edilebilmektedir.

Katkılı çimentoların da kütle betonlarında kullanılması oldukça yaygın bir uygulamadır. Portland çimentosunun ince puzolan ile karıştırılması veya portland çimentosunun puzolan ile birlikte öğütülmesi sureti ile erken dayanımı düşük çimento elde edilebilmektedir. Bu tip çimentolarla bazı şartnamelerde belirtildiği üzere hidratasyon ısısının 7 günde en fazla 60 cal/g ve 28 günde de en fazla 70 cal/g olması kriteri sağlanabilmektedir.

Puzolanlar ve Öğütülmüş Cüruf

Puzolan silisli veya silisli-ve-alüminli malzeme olup tek başına ya hiç ya da hiç denecek kadar az bağlayıcı özelliğe sahiptir. Ancak, inceliğinin yüksek olduğu ve rutubetin de mevcut olduğu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girer ve çimentonun su ile reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H bileşenini ortaya çıkararak bağlayıcı bir özellik kazanır. Puzolanlar ASTM C 618'de N tipi veya F tipi olarak sınıflandırılmaktadır. Bazı C tipi puzolanlar çimentodakine benzer bileşenler ihtiva etmektedir. Bundan dolayı C tipi puzolanlar çimento gibi bağlayıcı özelliği olup önemli derecede beton dayanımına katkı sağlamaktadır.

Puzolanlar portland çimentosunun hidratasyonu sırasında açığa çıkan hidrate kireç veya kalsiyum hidroksit ile kimyasal reaksiyona girerek bağlayıcı özelliği olan bileşenler oluşturmaktadır. Puzolanik aktivitesinin yüksek olması için puzolanlar cam veya opal gibi amorf bir yapıya haiz olmalıdır. Kuvars gibi kristal yapıya haiz silisli malzemeler yüksek inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmedikçe kireç ile normal sıcaklık koşullarında reaksiyon vermemektedir.

Doğal puzolanik malzemeler, obsidiyen, pumis(süngertaşı), volkanik kül, tuf, kil, şeyl ve diatomit olarak bulunmaktadır. Doğal puzolanlar genellikle öğütülerek kullanılabilir durumda bulunmaktadır. Ancak bazı volkanik malzemeler doğal durumu itibarı ile öğütülmeden kullanılabilir inceliğe haizdir. Kil ve şeyl ise öğütülmenin ötesinde 650–980°C’de kalsinasyon işlemine tabi tutulmak sureti ile aktif hale getirilmek zorundadır.

Uçucu kül, öğütülmüş veya toz kömürün yanması sırasında açığa çıkan baca tozudur. Karbon içeriği düşük olup portland çimentosu ile yaklaşık olarak aynı inceliğe sahipse ve çok ince cam kürecikleri gibi bir yapıya haiz ise mükemmel bir puzolan olabilmektedir. Şekli ve yapısı nedeni ile betonda kullanıldığında genellikle karma suyu ihtiyacı azalmaktadır. Bir çok durumda uçucu külün daha büyük inceliğe sahip olacak şekilde öğütülmesi, puzolanik aktivitesinin artmasını sağlamaktadır. Ancak, bu işlem küresel tane yapısına sahip olan uçucu külün öğütülme sonrası yapısının bozulması sonucu beton içerisindeki yağlama kabiliyetini azaltabilmekte ve dolayısı ile karma suyu ihtiyacının artmasına neden olabilmektedir. Yüksek silisli F tipi uçucu küllerin puzolanik aktivitesi genellikle mükemmeldir. Bununla birlikte, C tipi uçucu küller yüksek oranda CaO içerebilmekte ve iyi bağlayıcı özelliklere sahip olsa da betonun sülfata karşı dayanıklılığının artırılması veya alkali-silika reaksiyonunun (ASR) önlenmesi maksadıyla kullanılamamaktadır. Buna ilave olarak C tipi uçucu küllerin kütle betonda hidratasyon ısısının düşürülmesi maksadıyla kullanılması daha az uygun düşmektedir.

Puzolanlar kütle betonda portland çimentosu faktörünün düşürülerek ekonomi sağlanması, hidratasyon ısısının düşürülmesi, yüksek işlenebilirlik sağlanması, sülfat ve alkali-silika reaksiyonu sonucu ortaya çıkan hasar oluşumunun azaltılması maksadıyla kullanılabilir. Bununla birlikte, farklı puzolanların değişik özelliklere haiz olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bazı puzolanlar düşük erken dayanım, yüksek kuruma rötresi ve dolayısı ile düşük dayanıklılık gibi problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bir puzolan kullanılmadan önce projede kullanılacak olan çimento ve agrega ile birlikte deneye tabi tutularak beton ekonomisi ve kalitesine katkı sağlayıp sağlamayacağı belirlenmelidir. Portland çimentosuna kıyasla, katkılı çimentolarda puzolanik etkiden kaynaklanan dayanım gelişimi erken yaşlarda yavaş olmakta ancak ileriki yaşlarda daha hızlı seyretmektedir. İleriki yaşlarda aynı dayanıma sahip olması tasarlanan betonlarda, puzolanlı portland çimentosu kullanılan betonun erken yaşlardaki dayanımının portland çimentosu kullanılan beton dayanımına kıyasla daha düşük olması beklenmelidir. Kütle betonunun erken dayanımının yüksek olması gerekli olan bazı kısımlarında kütle beton karışımından farklı bir beton tasarımı kullanılabilir. Kütle betonunda puzolan kullanıldığı durumlarda puzolanın

düşük dozda kullanılması veya hiç kullanılmaması sureti ile erken dayanım hedefine ulaşılabilir. Ancak, alkali-agrega reaksiyon riski mevcutsa puzolan mutlak surette kullanılmalı, erken yaşlarda yüksek dayanım portland çimentosu kullanım dozajının artırılması sureti ile sağlanmalıdır.

Özellikle doğal puzolanların, reaktif agrega kullanılan betonda alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan genleşmenin azaltılması açısından oldukça etkili olduğu saptanmıştır [2]. Genleşmedeki azalma miktarı kullanılan puzolanın kimyasal yapısı, inceliği, ve kullanım dozajı ile değişmektedir. Bazı puzolanlarda, genleşmedeki azalma %90'ı aşabilmektedir. Puzolanlar genleşmeyi çimentodaki alkalileri agrega ile reaksiyona girmeden önce tüketmesi yolu ile azaltmaktadır [3]. Alkali-reaktif agrega kullanılmasının zorunlu olduğu durumlarda, düşük alkalili çimento ve genleşmeyi azaltıcı etkisi kanıtlanmış puzolan kullanımı en iyi yaklaşım olmaktadır.

Corps of Engineers tarafından yapılan deneysel çalışmalara göre kütle betonunun gerilmelerin daha düşük olduğu iç kısımlarında daha yüksek oranda puzolan kullanılması ekonomi sağlamak ve gerekli dayanım daha ileri yaşlarda sağlanabilmektedir. Laboratuvar sonuçlarına göre, 53 kg/m³ çimento dozajlı ve uçucu kül kullanılan ve eşdeğer çimento dozajı 112 kg/m³ olan hava sürüklenmiş kütle betonunda karma suyu 60 kg/m³ olmasına karşın oldukça işlenebilir bir karışım elde edilebilmiştir. Islak elenmiş betondan $\phi=150\text{mm}$, $h=300\text{mm}$ ebatlarında silindir şeklinde alınan beton numunelerin bir yıllık basınç dayanım değerlerinin ise 21 MPa mertebesinde olduğu tespit edilmiştir [2].

Agrega tane şekli ve bunun betonun işlenebilirliği üzerindeki olumsuz etkisi, puzolan kullanımının işlenebilirliği artırma etkisi ve hava sürükleyici ve/veya diğer katkı maddeleri ile rahatlıkla çözümlenebilecek bir noktaya gelmiştir [2].

İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu da portland çimentosuna ilave edilmek sureti ile kütle betonunda bağlayıcı olarak kullanılabilir. Portland çimentosu ile birlikte kullanıldığında hidrasyon ısısının 7 günde 60cal/g değerinin altına düşmesi için toplam bağlayıcının en az %70'i oranında kullanılması gerekebilmektedir. Yüksek fırın cürufu hidrasyon hızının düşük olması nedeni ile hidrasyon ısısını genellikle düşürmektedir. İnce öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılması betona bir çok avantajlar da sağlamaktadır. Bunlar düşük geçirgenlik, reaktif agrega kaynaklı genleşmenin kontrolü, işlenebilirliğin artırılması, sülfata karşı dayanıklılık olarak sıralanabilir. Ancak, bu avantajlardan yararlanabilmek için tras, uçucu kül vb. puzolanlardan çok daha yüksek oranlarda cüruf kullanılması gerekmektedir.

Kimyasal Katkı Maddeleri

Kütle betonu açısından önemli etkileri olan katkı maddeleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- a) Hava sürükleyici,
- b) Su azaltıcı,
- c) Priz geciktirici,
- d) Su azaltıcı ve priz geciktirici.

Priz hızlandırıcı katkı maddeleri, erken yaşlarda yüksek dayanımın gerekli olmaması ve hidrasyon hızını artırmasından dolayı kütle betonunda kullanılmamaktadır. Kimyasal katkı maddeleri henüz plastik durumda olan kütle betonuna önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; işlenebilirliği artırması ve/veya karma suyu ihtiyacını azaltması, priz başlangıcını geciktirmesi, terleme hızı ve kapasitesini geliştirmesi, ayrışmayı engellemesi, slump kayıp hızını azaltması olarak sıralanabilir.

Kimyasal katkı maddeleri sertleşmiş kütle betonuna da önemli faydalar sağlamaktadır. Bunlar; sertleşme sürecinde hidrasyon ısını kontrol etmesi, dayanımı artırması, çimento dozajını düşürmesi, dayanıklılığı artırması, geçirgenliği azaltması ve aşınma/kavitasyon dayanımını artırması olarak sıralanabilir.

Hava sürükleyici katkı maddeleri betona karışım esnasında küçük hava kabarcıkları sürüklemektedir. Bunun sonucunda işlenebilirlik artmakta, ayrışma azalmakta, terleme azalmakta, geçirgenlik düşmekte ve donma-çözölmeye karşı dayanıklılık artmaktadır. Hava sürüklenmesi çimento dozajı düşük olan beton karışımlarında işlenebilirliği büyük çapta arttırmakta ve tane şekli ve granölometrisi iyi olmayan agreganın kullanılmasını tolere edebilmektedir. Buna ilave olarak betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması işlemlerini de kolaylaştırmaktadır. Sürüklenmiş her %1 hava işlenebilirliği artırırken slump kaybı olmaksızın karma suyunu %2-4 mertebesinde azaltabilmektedir. Betonun donma-çözölme etkilerine karşı dayanıklılığı hava sürüklenmiş betonda oldukça üst düzeydedir. Ancak çimento matrisindeki hiç bir noktanın en yakın hava kabarcığına olan uzaklığı 0.2 mm'den fazla olmayacak şekilde hava kabarcıkları homojen bir dağılım arz etmelidir.

Sürüklenmiş hava doğal olarak çoğu betonun dayanımını düşürmektedir. Çimento dozajı sabit tutulduğu ve aynı slump değerinde hava sürüklenmesinin karma suyundaki azaltma etkisinden istifade edildiği takdirde düşük dozajlı kütle betonlarında dayanım üzerinde önemsenmeyecek düşüş veya hafif bir artış meydana gelmektedir. Hava sürükleyici katkı maddesi kullanım dozajı sabit tutularak gerçekleştirilen deneyler sürüklenmiş hava oranının agrega granölometrisi, agrega tane şekli, çimento dozajı, başka katkı maddelerinin

kullanılması, karıştırma süresi, slamp, ve beton sıcaklığına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir [2]. Sabit hava sürükleyici katkı dozajında, hava oranı 150mm'ye kadar artan slamp ile artmakta; ince madde miktarındaki artış, beton sıcaklığındaki artış ve karıştırma süresinin uzaması ile düşmektedir. Uçucu külün aktif karbon içermesi durumunda, daha yüksek dozajda hava sürükleyici katkı maddesinin kullanılması gerekmektedir. Çoğu şartname elek göz açıklığı 37,5mm olan elekten kütle betonu ıslak elendikten sonra elde edilen taze beton numunesinde yaklaşık olarak %5 hava olması gerektiğini belirtmektedir.

Su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri aşağıda belirtilen bileşenlerin bir ya da daha fazlasını içermektedir.

- a) Lignosülfonik asit
- b) Hidroksilli karboksilik asit
- c) Polimerik karbohidratlar,
- d) Naftalin ve melamin esaslı yüksek oranda su azaltıcılar.

Priz geciktirici katkı maddeleri kütle betonunun daha uzun süre plastik kıvamda kalmasını temin ederek üst tabaka yerleştirilinceye kadar geçen süre zarfında alttabakanın prize başlamasını geciktirmekte ve böylece üst tabakanın vibrasyonla sıkıştırılma işlemi esnasında alt tabaka ile daha iyi kaynaşmasını mümkün kılmaktadır. Su azaltıcı katkı maddeleri karma suyu ihtiyacını azaltmak, beton dayanımı arttırmak veya daha düşük çimento dozajında aynı dayanım değerini yakalamak amacıyla kullanılmaktadır. Yukarıdaki su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri türlerinden ilk üçü kullanıldığında %10 mertebesinde su azaltma oranı gerçekleşmekte olup priz başlangıcı en az bir saat gecikmekte (slamp kaybı olmaksızın) ve beton dayanımı kayda değer düzeyde artmaktadır. Geciktirici etkili bir katkı kullanıldığında 12 saat sonraki dayanım değeri katkı kullanılmayan şahit beton ile aşağı yukarı aynı seviyede olmaktadır. Çimento dozajı, çimentonun kompozisyonu, sıcaklık ve diğer etkenlere bağlı olarak su azaltıcı ve priz geciktirici katkı maddeleri kullanılması 1, 3 ve 28 gün ve daha sonraki yaşlarda beton dayanım değerlerini önemli seviyede arttırmaktadır. Dayanımdaki artış sadece su/çimento oranındaki azalma ile açıklanamamaktadır. Katkı maddeleri hidrasyon üzerinde çok olumlu etkileri de beraberinde getirmektedir. Karboksilik asit ailesinin terlemeyi arttırdığı dikkate alınmalıdır. Venezüella'da inşa edilen Guri barajının bazı kısımlarında kullanılmış olmakla birlikte, yüksek oranda su azaltıcı katkı maddeleri kütle beton yapımında doğruluğu kanıtlanmış bir kayda sahip bulunmamaktadır. Bununla birlikte, yüksek plastikleştirici etkisi ile, gerekli olduğu durumlarda işlenebilirliğin artırılması maksadı ile bazı özel kütle beton inşaatlarında kullanılması açısından umut verici yönünü korumaktadır.

Kütle betonu uygulamalarında agrega en büyük tane büyüklüğünün 100 mm'den daha fazla olmasından dolayı ve hidrasyon ısısının düşürülmesi amacıyla mümkün mertebe genellikle düşük çimento dozajı kullanılmaktadır. Bu nedenle kütle betonlarında süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılar pek tercih edilmez, çünkü su azaltma oranı normal akışkanlaştırıcı kadar elde edilir. Süperakışkanlaştırıcı türü katkılar çimento dozajının yüksek olduğu ve slump değerinin de en az 13-15 cm olan betonlarda daha etkili olduğu söylenebilir. Baraj kütle betonlarında betonun dozajı ve slumpı oldukça düşük olduğundan çok süperakışkanlaştırıcı katkılar genellikle tercih edilmez. Çünkü teknik ve ekonomik avantaj sağlamaz.

Agrega

İnce agrega elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekten tamamı geçen tane sınıfıdır. Doğal şekillenmiş tanecikler veya daha büyük boyutlu agrega/ kayaların kırılması yoluyla elde edilen tanecikler veya her ikisinin karışımından oluşabilmektedir. İnce agrega, sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. İnce agrega zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-1'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Hidrolik yapılarda su dalgalanmasına maruz kalan beton yüzeylerinde bu değerler %50 mertebesinde düşürülebilir. Kütle betonunun iç kısımlarında ve sürekli olarak suya gömülü olan kısımlarda ise bu sınır değerler %50 daha arttırılabilir.

Çizelge-1 İnce Agregada İzin Verilen Zararlı Madde Yüzdeleri, En Fazla (kütlece)

Kil Topakları ve Eriyebilir Parçacıklar	3,0
#200 (75µm) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	
Aşınmaya Maruz Betonlar İçin	3,0*
Diğer Betonlar İçin	5,0*
Kömür ve Linyit	
Betonun Yüzey Görünümünün Önemli Olduğu Yerlerde	0,5
Diğer Betonlar İçin	1,0

*Kırma taş ince agrega için elek göz açıklığı #200 olan elekten geçen miktar kil, silt vb. zararlı madde değil de kırma agrega parçacıklarından oluşuyorsa bu sınır değer aşınmaya maruz yapılarda %5'e diğer yapılarda ise %7'ye kadar arttırılabilir.

İnce agreganın granülometrisi betonun işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan ince agreganın için iyi bir granülometri Çizelge-2'de belirtilen alt ve üst limitler arasındaki bant içerisinde olmalıdır. Laboratuvarlarda yapılan çalışmalar daha farklı bant kullanımı ile de başarılı sonuçlar alınabileceğini göstermektedir. Bu da ince agreganın için oldukça geniş bir bant kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

Granülometri kriterleri oldukça esnek olmakla birlikte, ince agreganın granülometrisi bir kez ayarlandıktan sonra, beton işlenebilirliği üzerindeki etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla granülometrinin aşağı yukarı sabit tutulması oldukça önemlidir.

Çizelge-2 Kütle Betonunda Kullanılacak İnce Agregada Granülometri Alt ve Üst Sınırları

Elek Göz Açıklığı	Elekte Kalan, % (kütlece)
3/8" (9,5mm)	0
#4 (4,75mm)	0-5
#8 (2,36mm)	5-15
#16 (1,18mm)	10-25
#30 (600µm)	10-30
#50 (300µm)	15-35
#100 (150µm)	12-20
Pan	3-7

*U.S. Bureau of Reclamation

Büyük yapılar için iri agreganın çakıl, kırma taş çakıl veya kırma taş kaya ya da bunların bir veya bir kaçının karışımından oluşmakta olup, elek göz açıklığı #4 (4,75mm) olan elekte kalan ve elek göz açıklığı 6" (150mm) olan elekten geçen agreganın için kullanılan bir ifadedir. Santral binası, veya diğer yoğun demir donatı kullanılan ve kütle betonu kategorisinde yer alan yapılarda 3" (75mm) ve hatta 1 1/2" (37,5mm) gibi daha küçük en büyük tane boyutlu iri agreganın başarı ile kullanılabilmektedir.

Agreganın en büyük tane boyutu genellikle demir donatı aralığına bağlı olarak belirlenmekle birlikte yakın civarda bulunan en büyük tane boyutlu agregaya bağlı olarak da belirlenebilmektedir. Agreganın en büyük tane boyutu küçüldükçe karışımda kullanılan çimento miktarı ve buna bağlı olarak hidrasyon ısı ve termal çatlak oluşum riski artmaktadır. Bunu ortadan kaldırmak için ise çimento dozajı ve beton yerleştirme sıcaklığının düşürülmesi gibi ciddi tedbirlerin alınması zorunlu olmaktadır. Bundan dolayı, betonarme yapım

kurallarına bağlı kalmak kaydı ile en büyük agrega tane boyunun kullanılması en uygun yaklaşımdır.

İri agrega sert, özgül kütlesi yüksek, dayanıklı olmalı ve üzeri zararlı maddelerle kaplı olmamalıdır. Eriyebilen; işlem, taşıma veya depolama sırasında aşınmaya maruz kalan kayanın kullanılmasından kaçınılmalıdır. Donma-çözölmeye maruz kalan kütle beton yapılarında özgül kütlesi 2,5'tan küçük ve su emme oranı %3'ten büyük olan kayanın kullanılması genellikle uygun görülmemektedir. Kimyasal analiz sonucuna göre iri agregada SO_3 olarak hesaplanan sülfat miktarı %0,5'i aşmamalıdır. İri agrega zararlı miktarda kil, silt, toz, mika, organik madde içermemeli ve sınır değerlerinin üzerinde diğer zararlı maddeleri de ihtiva etmemelidir. Bu zararlı maddeler karışım oranları tasarımında hedeflenen beton özelliklerinin sağlanamamasına neden olabilmektedirler. Zararlı maddelerin kütlece oranının Çizelge-3'de verilen sınır değerlerin altında olması gereklidir. Zararlı maddelerden arındırmak maksadıyla iri agrega yeniden yıkamaya tabi tutulmak sureti ile temizlenebilmektedir.

Çizelge-3 İri Agregada İzin Verilen Zararlı Madde Yüzdeleri, En Fazla (kütlece)

Kil Topakları ve Eriyebilir Parçacıklar	0,5
#200 (75µm) Elekten Geçen İnce Madde Miktarı	0,5
Hafif Madde	2,0
Diğer Zararlı Maddeler	1,0

Teorik olarak, agrega en büyük tane boyutu arttıkça hedeflenen kalitede beton tasarımı için karışımdaki çimento miktarı azalmaktadır. Bu teori granülometrisi iyi ayarlanmış agregalar için agrega en büyük tane boyutu arttıkça agrega tanecikleri arasındaki boşluk miktarının azalmasına dayanmaktadır. Bununla birlikte, çimento ve agrega tipi aynı olmak kaydı ile en büyük çimento verimliliğine ulaşmak için her basınç dayanımı için optimum en büyük tane boyutu olduğu Higginson, Wallace ve Ore tarafından 1963 yılında ortaya konulmuştur. Agrega en büyük tane boyutu kalıp ve betonarme çelik donatı yerleşim planı ile sınırlı olarak belirlendiğinden dolayı, çelik donatı kullanılmayan bir çok beton yapıda en büyük tane boyutu neredeyse sınırsız bir şekilde belirlenebilmektedir. Elde edilebilirliğine ilave olarak, ekonomik agrega en büyük tane boyutu bu yüzden tasarım dayanımı, işleme, karıştırma, taşıma, yerleştirme ve sıkıştırma sırasında karşılaşılan sorunlara bağlı olarak belirlenmektedir. Düzensiz şekle sahip iri agrega taneleri farklı hacim değişikliklerine bağlı olarak daha iri tanecikler etrafından çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Buna ilave olarak düzensiz

şekilli agrega taneleri alt kısımlarında terleme sonucu su ve sıkıştırma esnasında hava birikimi olması nedeni ile boşluk oluşumlarına da sebep olmaktadır. Daha büyük boyutlar kullanılabilmeyle birlikte, 6" (150mm) kullanılabilecek en büyük tane boyutu olarak benimsenmektedir.

Agrega tane şeklinin işlenebilirlik ve sonuç olarak karma suyu ihtiyacı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Akarsu yatağından elde edilen doğal şekillenmiş (yuvarlak şekilli) tanecikler bu açıdan en iyi işlenebilirlik sağlanmasını temin etmektedir. Bununla birlikte, kırmataş ocaklarında kullanılan çağdaş kırıcı ve öğütücüler hem ince hem de iri agrega tane sınıfında uygun tane şekilli agrega üretimini sağlayabilmektedir. Böylece, doğal şekillenmiş agreganın karma suyu ihtiyacı biraz daha az olsa da, uzak bir kaynaktan getirilmesi yakın civardan uygun şekilde kırmataş agrega elde edilmesine kıyasla nadiren daha ekonomik olmaktadır. Ancak, kırıcı ve öğütücü ekipmanın tane şekli açısından uygun özelliklerde agrega üretimine imkan verip vermeyeceğinin saptanması gereklidir. Tane şeklinin uygun olup olmadığının kontrolünde kullanılan yöntemlerden birisi yassı ve uzun taneciklerin her tane sınıfında %20'den fazla olmamasıdır. Yassı tane, genişliğinin kalınlığına oranı 3'ten büyük olan taneler için kullanılırken; uzun tane uzunluğunun genişliğine oranı 3'ten büyük olan taneleri ifade etmektedir.

Beton karışımındaki agrega oranlarının belirlenmesi betonun işlenebilirliğini doğrudan etkilemektedir. Uygun agrega granülometrisinin sağlanmasını kolaylaştırmak amacıyla agreganın farklı tane sınıflarına ayrılması gereklidir. A.B.D.'de geleneksel olarak Çizelge-4'te verilen iri agrega tane sınıfları kullanılmaktadır. Çizelge 5'te ise bu tane sınıflarının kullanım oranları verilmektedir.

Tecrübeler her tane sınıfında oldukça geniş bir granülometri bandının kullanılabileceğini göstermektedir. Doğal şekillenmiş çakıl kullanıldığında, teorik granülometrinin dışında ocaktaki mevcut agrega granülometrisinin kullanılması ekonomik bir yaklaşım olmaktadır. Bir tane sınıfında gereğinden çok fazla veya az miktarda malzeme olması durumunda, bir kısım malzemenin kullanılmaması, işlenebilirliği oldukça düşük beton üretimi yerine tercih edilmelidir. Kırmataş agrega üretimi sırasında yapılan ayarlamalar yardımı ile kullanılmayan malzeme oranı en düşük seviyeye çekilebilmektedir. İki veya üç aşamalı çağdaş kırıcı kullanılması sureti ile, işlenebilir bir agrega karışım oranı elde edilebilmesi mümkün olmaktadır.

Dünyada bazı projelerde kütle betonunda kesikli granülometri kullanılabilmektedir. Bu granülometride bir ya da daha fazla elekte kalan

malzeme miktarının %0 olması anlamına gelmektedir. A.B.D.'de yaygın olarak kullanılmakta olan sürekli granülometri yaklaşımıdır. Kesikli granülometri malzemenin doğal hali ile kesikli granülometriye sahip olması durumunda ekonomik olmaktadır. Bununla birlikte, deneysel çalışmalar sürekli granülometri yerine kesikli granülometrinin özellikle tercih edilmesinin bir avantaj yaratmadığını ortaya koymaktadır. Sürekli granülometri daha düşük slump değerinde, daha düşük çimento dozajında ve daha az karma suyu ile daha işlenebilir bir beton üretimini mümkün kılmaktadır. Kırmataş agregası kullanılması durumunda, sürekli granülometriye haiz agregada elde edilmesinde bir zorlukla karşılaşılması, doğal şekillenmiş agregada ocaklarının da mevcut durumu ile genellikle sürekli granülometri kullanılması olanak sağlaması da bu yüzden oldukça avantajlıdır.

Çizelge-4 Kütle Betonunda Kullanılacak İri Agregada Granülometri Alt ve Üst Sınırları

Elek Göz Açıklığı	Elekten Geçen, % (kütlece)			
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-37,5) mm	1 1/2"-3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm
7" (175mm)	100			
6" (150mm)	90-100			
4" (100mm)	20-45	100		
3" (75mm)	0-15	90-100		
2" (50mm)	0-5	20-55	100	
1 1/2" (37,5mm)		0-10	90-100	
1" (25mm)		0-5	20-45	100
3/4" (19mm)			1-10	90-100
3/8" (9,5mm)			0-5	30-55
#4 (4,75mm)				0-5

Çizelge-5 İşlenebilir Kütle Betonuna İçin İri Agregada Tane Sınıfları Alt ve Üst Kullanım Sınırları

Agrega En Büyük Tane Boyutu	İri Agregada Tane Sınıfları Kullanım Miktarı, %				
	6"-3" (150-75) mm	3"-1 1/2" (75-37,5) mm	1 1/2"- 3/4" (37,5-19) mm	3/4"-#4 (19-4,75) mm	
				3/4"-3/8"	3/8"-#4
6" (150mm)	20-30	20-32	20-30	12-20	8-15
3" (75mm)		20-40	20-40	15-25	10-15
1 1/2" (37,5mm)			40-55	30-35	15-25
3/4" (19mm)				30-70	20-45

Karma Suyu

Beton karışımında kullanılan su, çimentonun hidrasyon reaksiyonu olumsuz etkileyebilecek maddeleri içermemelidir. İçilebilir özelliklere haiz olan su genellikle beton karma suyu olarak da kullanılabilir. İçme suyu analizleri klorür miktarı açısından beton için kabul edilemez değerleri dikkate almadığından dolayı, şayet beton içerisinde metal aksam ve çelik donatı kullanılması söz konusu ise klorür analizleri yapılmalı ve suyun karma suyu olarak kullanılıp kullanılamayacağı yapı tipine bağlı olarak belirlenmelidir.

Su içerisindeki maddelerin çimentonun dayanım gelişimi üzerinde önemli ölçüde etki yapıp yapmadığının saptanması istendiğinde, mukayeseli dayanım deneylerinin yapılabilmesi için distile su (şahit) ve kuşkulu su ile harç numuneleri hazırlanmalıdır. Kuşkulu su ile hazırlanan numunelerin ortalama dayanımı distile su ile hazırlanan numunelerin ortalamasının %90'ı veya daha altında olması durumunda su karma suyu olarak kullanılmamalıdır. 5000 ppm veya daha fazla miktarda yabancı madde içeren suyun dayanıklılık yönünden zararlı olup olmadığı, dayanım ve boyutsal kararlılık deneyleri yapılmak sureti ile belirlenmelidir. Birkaç ppm hidroklorik asit ve sülfürik asit vb. mineral asitler içeren su dayanım gelişimi yönünden hoş görülebilir. Az miktarda şeker veya şeker türevi maddeler içeren su ise priz süresi üzerindeki etkisi tahmin edilemeyeceği için kullanılmamalıdır.

Karışım Oranların Belirlenmesi

Kütle beton tasarımında temel hedef uygun dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerine haiz olan sertleşmiş beton yapımı için bağlayıcı (çimento, puzolan, öğütülmüş cüruf), agrega, su ve katkı maddesi/katkı maddelerinin karışım oranların yeterli işlenebilirlikte ve yerleştirme sonrası en düşük sıcaklık artışı sağlamasına yönelik olarak en uygun şekilde belirlenmesidir. Bu maksatla deneme karışımları yapılarak optimum karışım oranları belirlenmelidir.

Su/çimento veya su/bağlayıcı oranı dayanım, dayanıklılık ve geçirgenlik özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Bunun yanı sıra yerleştirmeyi kolaylaştırmak için yeterli miktarda ince madde de bulunmalıdır. Tecrübeler en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş agrega kullanılması durumunda en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan kırmataş agrega kullanılmış karışıma kıyasla aynı işlenebilirliğin elde edilebilmesi için %10 daha az çimento inceliğinde malzeme kullanılmasının yeterli olduğunu göstermektedir. Hedeflenen su/bağlayıcı oranında hazırlanan deneme karışımları ve kullanılacak malzemelerin istenilen işlenebilirlikteki karma suyu ihtiyacı, bağlayıcı miktarının rahatlıkla belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Beton karışım elemanları miktarı tayininde ilk adım kütle

betonunun değişik kısımlarında hangi agregâ en büyük tane boyutunun kullanılacağına belirlenmesidir. Bir sonraki aşama, istenilen slump değeriinde toplam su ihtiyacının belirlenmesidir. Slump deneyi için taze beton elek göz açıklığı 1 1/2" (37,5mm) olan elekten ıslak elenmeli ve elekten geçen numune üzerinde deney gerçekleştirilmelidir. Agregâ en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan düşük slump'lı ve hava sürüklenmiş betonlarda su ihtiyacı doğal şekillenmiş agregâlar için 70kg/m³ ile 90kg/m³ arasında, kırmataş agregâ için ise 85kg/m³ ile 115kg/m³ arasında değişmektedir. Agregâ en büyük tane boyutu 3" (75mm) olan betonlarda su ihtiyacı yaklaşık %20 daha fazla olmaktadır. Bununla birlikte, 1 yıllık basınç dayanımının 28 MPa veya üzeri olmasının gerekli olduğu durumlarda 3" (75mm) agregâ en büyük tane boyutu daha verimli olabilmektedir.

Karışımında kullanılacak olan bağlayıcı miktarı toplam su ihtiyacının su/çimento oranına bölünmesi ile elde edilebilmektedir. İşlenebilirliğin belirleyici olduğu durumlarda ise istenilen işlenebilirliği temin edebilecek en düşük çimento dozajı belirlenmektedir. Karışıma giren çimento ve karma suyunun hesaplanması ve hava miktarının %3-5 arasında tahmini bir değer olarak kullanılması ile geriye sadece agregâ kalmaktadır. Bu aşamada ince ve iri agregâ tane sınıflarının oranlarının bilinmesi gereklidir. Optimum oran, agregâ granülometrisi ve agregâ tane şekline bağlıdır. Bu oranlar arazide belirlenebilmektedir. Agregâ en büyük tane boyutu 6" (150mm) olan doğal şekillenmiş iri ve ince agregâ içeren betonlarda toplam agregâdaki ince agregâ oranı %21 kadar düşük olabilmektedir. Kırmataş agregâlar için ise bu oran %25-27 arasında olabilmektedir.

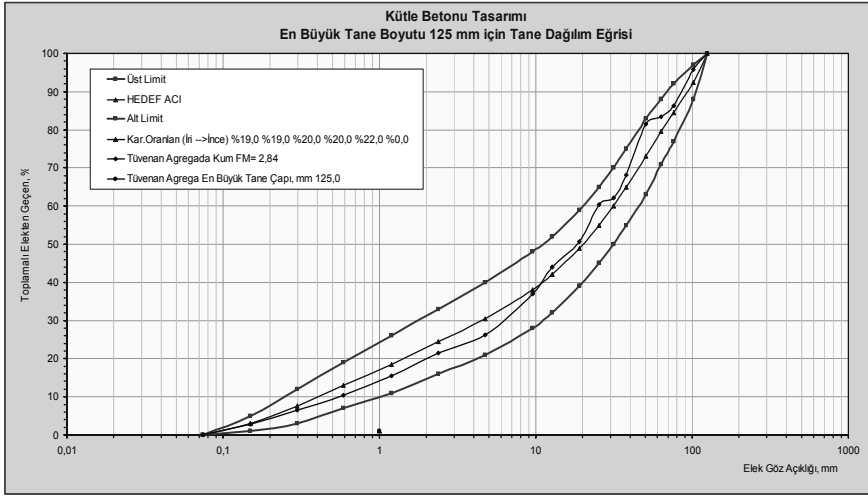
Karışımında bağlayıcı olarak puzolanın da kullanılması durumunda, karışım oranları tayini işlemi değişmemektedir. Ancak, aşağıda belirtilen maddeler dikkate alınmalıdır:

- a) Karma suyu ihtiyacının değişebileceği dikkate alınmalıdır,
- b) Erken yaşlardaki dayanımın kritik olabileceği göz ardı edilmemelidir,
- c) Karışım oranlarının en ekonomik bir şekilde tayini için daha büyük tasarım yaşı (90 veya 180 gün) kullanılması önerisi dikkate alınmalıdır.

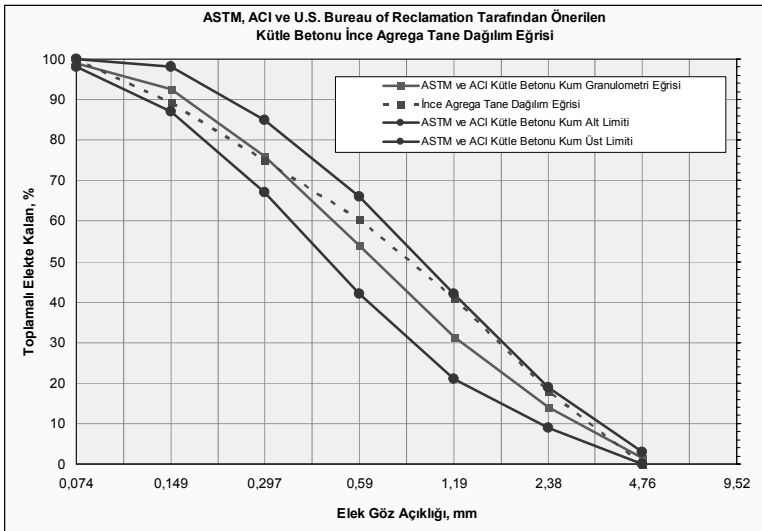
Puzolan içeren betonlarda dayanım gelişimi, sadece portland çimentosu kullanılan betonlara kıyasla daha yavaş seyretnmektedir. Bununla birlikte, kütle betonu üzerinde yükleme genellikle beton oldukça ileri yaşlarda iken yapılmaktadır. Bundan dolayı, puzolan içeren kütle betonu genellikle 90 gün ile 365 günlük dayanım değerleri dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Kütle betonunun tasarlanan fonksiyonlarını yerine getirebilmek için erken yaşlarda dayanım gereksiniminin olmamasına karşın, çoğu yapıda üst tabaka kalıpları

bir alt tabakaya ankrajla sabitlenmektedir. Bundan dolayı erken yaşlardaki dayanım, ankraj tespit sistemini taşıyabilecek kadar yeterince büyük olmak zorundadır. Bununla birlikte özel tasarım kalıp ve ankraj sistemleri yüksek pozolan veya düşük çimento dozajlı betonlar için çözüm olabilmektedir.

Aşağıda Şekil 1 ve Şekil 2'de bir beton ince kemer baraj gövdesinde kullanılan tüvenan ve ince agregata (en büyük tane boyutu = 125 mm) tane dağılım eğrileri verilmektedir. Kütle betonunda kullanılacak olan agregata tane dağılım eğrilerinin bu sınırlar içerisinde olması tavsiye edilmektedir.



Şekil 1 – Tüvenan agregata için tane dağılım eğrisi.



Şekil 2 – Kütle betonu içinde bulunan ince agregata için tane dağılım eğrisi.

Sıcaklık Kontrolü

Tamamı veya birkaçı tedbir olarak kütle betonunda kullanılabilecek dört etkili sıcaklık kontrol programı şu şekilde sıralanabilir:

- a) Bağlayıcı malzeme miktarı kontrolü - bağlayıcı tipi ve miktarı hidrasyon ısı potansiyelini azaltabilmektedir.
- b) Önsoğutma - Karışımında kullanılacak olan malzemelerin soğutulması taze beton sıcaklığının daha düşük seviyelere çekilmesini sağlamaktadır.
- c) Ard-soğutma - Hidrasyon sonucu artan sıcaklığın dengelenmesi maksadıyla içerisine yerleştirilen soğutma tesisatı ile sıcaklık artışı sınırlandırılabilir.
- d) Yapı yönetimi - mükemmel planlanma, yapım yöntemleri, betonun üretiminden yerleştirilmesine kadar geçen aşamalar ile ilgili bilgi birikiminin iyi kullanılması yardımıyla aşırı sıcaklık farklılıklarının oluşması engellenebilmektedir.

Küçük yapılarda, sıcaklık kontrolü için beton işlerinin soğuk periyotlarda (geceleri, soğuk aylarda vb.) yapılması gibi tek bir tedbir alınması yeterli olabilmektedir. Bununla birlikte daha büyük yapılarda, bağlayıcı miktarının azaltılması, puzolan kullanımı, agreganın ve karma suyunun önsoğutma işlemine tabi tutulması (karma suyunun bir kısmının yerine buz kullanımı) gibi tedbirlerin alınması sureti ile beton yerleştirme sıcaklığı düşürülebilmektedir. Hava sürükleyici veya diğer katkı maddelerinin kullanımı hem taze ve hem de sertleşmiş beton özelliklerini geliştirerek betonun uygun boyutta bloklar halinde yerleştirilmesini, yerleştirme sıklığının artırılmasını, tabaka kalınlığına müdahale edilmesi sureti ile inşaa programının koordine edilmesini sağlamaktadır. Özel karıştırma ve yerleştirme ekipmanları betonun karıştırılmasından yerleştirilmesine kadar geçen süreci çevre sıcaklığından fazla etkilenmeden hızlı bir şekilde tamamlamasını temin etmektedir. Su kürü sonrası buharlaşma yolu ile soğumanın sağlanması, beton içerisine yerleştirilen tesisat ile sertleşmiş betonun soğutulması ve yüzeylerin yalıtılması yolu ile iç ve dış kısımlar arasında sıcaklık farklılıklarının en alt seviyeye çekilmesi de etkili tedbirlerdir.

İnce agreganın soğutulması pratik olmamakla birlikte iri agrega rahatlıkla soğutulabilmektedir. Karma suyunun bir kısmı ya da tamamının buz olarak karışıma konulması da etkin bir yöntemdir. Sonuç olarak taze beton sıcaklığı 10°C veya altına rahatlıkla çekilebilmektedir. Daha düşük sıcaklıkların elde edilmesi genellikle çok zordur. Taze beton sıcaklığının düşürülmesi maksadıyla karma suyuna sıvı nitrojen enjekte edilmesi işlemi de kullanılabilmektedir. Çoğu durumda sıvı nitrojen yardımı ile taze beton sıcaklığı 18°C'nin altına başarı ile çekilebilmektedir. Sıcaklık düştükçe su ihtiyacı da azaldığından dolayı, soğutulmuş beton oldukça avantajlıdır.

Sıcaklık artışını sınırlamanın başlıca yolu, bağlayıcı malzemenin tipi ve miktarının kontrol altına alınmasıdır. Bu yüzden tasarım çalışmalarında istenilen dayanım değerinin en düşük bağlayıcı kullanılarak sağlanması hedeflenmelidir. Bağlayıcı miktarının azaltılmasındaki tek engel işlenebilir bir karışım elde edebilmek için karışımda olması gerekli olan çimento inceliğindeki en az malzeme miktarıdır. Puzolan, hava sürükleyici katkı maddesi ve diğer katkı maddelerinin yardımcı olarak kullanılmaması durumunda kütle beton tasarımı, termal çatlak oluşumlarına engel olabilmek maksadıyla çimento dozajı düşük seviyede tutulurken, işlenebilirliğin de sağlanması mücadelesine sahne olmaktadır.

Bağlayıcı malzeme üzerinde 7 günde 70cal/g veya 60cal/g gibi hidrasyon ısısı kriterlerinin uygulanması, sıcaklık artışını kontrol altına almaktadır. Düşük hidrasyon ısısı bir bağlayıcı dozajı 140 kg/m³'ü aşmadığı durumlarda sıcaklık farkı 19°C'yi geçmemektedir.

Kütle betonunda adyabatik sıcaklık artışı ve sıcaklık gradienti

Çimento ile su arasında meydana gelen ekzotermik reaksiyon nedeniyle kütle betonunda oluşan sıcaklık artışı ve beraberinde getirdiği problemlerin anlaşılabilmesi amacıyla ısı transferi kanunlarından faydalanmak gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan eşitliklerin çözülebilmesi için farklı metotlardan faydalanılmaktadır. Kütle betonunda aşılması gereken problemlerden bir tanesi termal gerilimlerden dolayı beton çatlamadan ano kalınlığının artırılması ve üzerine yapılacak olan diğer anonun da hızlı bir şekilde üzerine dökülmesidir. Bu sağlandığı takdirde beton döküm hızı artacak ve proje daha hızlı bitirilecektir ve sonuçta oldukça büyük miktarda tasarruf sağlanmış olacaktır. Kütle betonlarında sıcaklık artışı sistemin adyabatik olduğu kabulü ile aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir:

$$\Delta T_a = \frac{M_c \times Q_h \times \alpha(t)}{\rho \times C}$$

Burada, M_c toplam bağlayıcı (çimento+puzolan), kg, Q_h çimentonun toplam hidrasyon ısısı, kJ/kg, $\alpha(t)$ çimentonun t zamanındaki hidrasyon derecesi ve ρ betonun yoğunluğu, kg/m³ ve C ise betonun özgül ısısıdır, kJ/kg°C. Bu eşitlik ile hesaplanan adyabatik sıcaklık artışı ve kütle betonundaki gerçek sıcaklık artışı deneysel olarak da doğrulanmalıdır.

Yukarıdaki eşitlik yardımı ile bulunan ve betonun merkezinde ulaşılan adyabatik sıcaklık artışına ilâve olarak, kütle betonunda ısı transfer analizi de yapılmalıdır. Kartezyen kooordinat sisteminde kondüksiyonla ısı iletim kanunu Fourier tarafından geliştirilmiştir ve aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + w = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$$

burada, k , betonun ısı iletim katsayısı, w , hidratasyon ısını, T sıcaklığı, t zamanı ve x , y ve z koordinat sistemini gösterir. Zamana bağlı hidratasyon ısı w aşağıda gösterildiği gibi sıcaklığın ve zamanın bir fonksiyonu olarak da verilebilir;

$$w = M_c \frac{dQ_h}{dt} \text{ veya } w = \rho C \frac{dT_a}{dt}$$

buradaki T adyabatik sıcaklık artışının zamanla olan değişimini ortaya koyar. Bu durumda son eşitlik aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{k}{\rho C} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial T_a}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

veya kısaca aşağıdaki formda yazılabilir.

$$k \nabla^2 T + w = \rho C T^{\delta}$$

Bu eşitliği çözümlerin yollarından bir tanesi sonlu-eleman yöntemidir. Öncelikle bu amaca yönelik olarak sınır şartlarının belirlenmesi işlemi gerçekleştirilir ve daha sonra çözümüne başlanmalıdır.

SONUÇ

Geçmişte kütle beton tabiri sadece beton ağırlık barajları gibi büyük boyutlu beton yapılar için kullanılmakta idi. Ancak, günümüzde kütle beton teknolojik açıdan termal etki kaynaklı çatlak oluşumlarının olabileceği tüm yapılar için kullanılmaktadır.

Bu tip yapılarda malzeme seçimi ve karışım oranları tasarımı yapılırken dayanıklılık, ekonomi, ve termal etkiler ön planda olup, dayanım sıklıkla ikincil derecede ele alınmaktadır. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonun ekzotermik olması ve açığa çıkan ısı transferi için büyük hacimli betonlarda çok uzun bir süreye ihtiyaç olması nedeni ile oldukça yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılabilir. Beton henüz erken yaşlarda iken sıcaklığının yüksek değerlere ulaşması ve sıcaklık kayıp hızının da bu tip beton yapılarda oldukça düşük olması nedeniyle soğuma çok uzun bir süreyi gerektirmektedir. Soğumanın tamamlanarak çevre sıcaklığına ulaşılıncaya kadar ise beton dayanımı ve elastisite modülü artmaktadır. Uzun vadede betonun soğuyarak çevre sıcaklığına ulaşılması ile birlikte önemli birim boy değişimleri (kısılma) ve dolayısı ile çekme gerilmelerinin oluşumunu da kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle, yapıda ciddi hasar oluşumlarının önlenmesi, yapısal bütünlüğün bozulmaması, aşırı sızma riskinin önlenmesi,

servis ömrünün kısalması ve estetik olarak da kabul edilemez hasar oluşumlarının meydana gelmemesi için termal etkilerin oldukça dikkatle ele alınması zorunludur. Kütle betonu tasarımında dikkat edilmesi zorunlu şartlar aşağıdadır;

- ✓ Düşük hidrasyon ısısına sahip bağlayıcı kullanmak,
- ✓ Toplam bağlayıcı miktarını olabilecek en az değerde kullanmak,
- ✓ Beton döküm ve yerleştirme sıcaklığını ön-soğutma sistemleri ile 10-15°C'de tutmak,
- ✓ Çimento hidrasyon hızını yavaşlatıcı (priz geciktirici) kimyasal ve mineral katkılardan mutlaka faydalanmak,
- ✓ Beton elemanın şekli ve büyüklüğünü doğru seçmek,
- ✓ Gerektiğinde ard-soğutma sisteminin kurulmasını temin etmek,
- ✓ Beton merkez sıcaklığı ile dış sıcaklık arasındaki farkın ortalama 20°C'yi aşmamasını sağlamak,

Hem malzeme yelpazesinin geniş olması ve hem de seçilen malzemelerin karışım oranları belirlenirken çok değişik oranlar ile çalışılabilmesi termal etki, dayanıklılık, dayanım, geçirgenlik, ekonomi vb. özelliklerin tamamının kriterleri sağlaması amacıyla çok boyutlu karışım oranları tayini yapılmasını mümkün kılmaktadır. Bu çalışmalar sonucu hem standard(lar) ve/veya şartname(ler) de belirtilen kriterlerin sağlanması ve hem de optimum karışım oranlarına ulaşılması sağlanabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] "Cement and Concrete Terminology" reported by ACI Committee 116R-90, ACI Materials Journal; 1990.
- [2] "Mass Concrete" reported by ACI Committee 207.1R-05, ACI Materials Journal; November 1996.
- [3] "Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete" reported by ACI Committee 221R-96, ACI Materials Journal; May 1996.

BAKIR ENDÜSTRİSİ ATIKLARININ BETON KATKI MADDESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Başak MESCI

Öğr.Gör.Dr.

Ondokuz Mayıs Üniv.
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği
Böl.
Samsun, Türkiye

Osman Nuri ERGUN

Prof.Dr.

Ondokuz Mayıs Üniv.
Mühendislik Fakültesi
Çevre Mühendisliği
Böl.
Samsun, Türkiye

Mehmet ÇAKIROĞLU

Prof.Dr.

Ondokuz Mayıs Üniv.
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği
Böl.
Samsun, Türkiye

ÖZET

Sürdürülebilir ve yaşanabilir bir çevre oluşturmak, diğer pek çok faktörün yanında çeşitli endüstrilerden oluşan ikincil ürünlerin rasyonel olarak kullanımına bağlıdır. Yapı materyallerinin özelliklerinin pek çoğu, endüstriyel atıkların doğal ve/veya yapay katkı malzemeleri olarak kullanımı ile geliştirilebilmektedir.

Bakır flotasyon atıkları, bakır endüstrilerinden oluşan atıklardır. Büyük miktarlarda oluşan bakır endüstrisi flotasyon atıkları genellikle herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın tesis çevresindeki alanlara gelişigüzel bir şekilde depolanmaktadır. Çoğu zaman atıkların depolandığı arazi zemininde sızdırmazlık sağlayabilecek herhangi bir örtü tabakası kullanılmadığından, atıkta bulunan ağır metaller zamanla yağış sularının da etkisiyle toprak, yeraltı ve yüzey sularına karışarak insan sağlığını ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir.

Bu çalışmada Samsun Eti Bakır İşletmeleri bakır flotasyon atıklarının betonda katkı maddesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. İlk aşamada, çimentoya % 2.5, % 5, % 7.5, % 10, % 12.5 ve % 15 oranlarında flotasyon atıkları

ilave edilerek çimentonun basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, karışımlar beton üretiminde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, Türk Standartları ve referans değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bakır endüstrisi flotasyon atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Beton, çimento, bakır flotasyon atığı, basınç mukavemeti.

GİRİŞ

Nüfus artışı, hızlı ekonomik gelişme ve şehirleşmenin sonucu olarak inşaat sanayi gelişmekte, buna bağlı olarak beton, çimento üretimi ve çeşitleri de artmaktadır. Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesidir. Betonun ana bileşenlerinden olan çimento önemli bir işleve sahiptir. Çimento ve betonda, malzemelerin etkili kullanımı, düşük enerji gerektiren materyallerin gelişmesi, yapıların ve kentsel altyapının servis ömürlerinin uzatılması, geri kazanım ve çeşitli atık malzemelerin kullanımı ile çevreye verilen zararların azalacağı beklenmektedir. Günümüzde çimentonun çeşitli puzolanik malzemelerle yer değiştirilerek hem daha ekonomik, hem de çevreye karşı daha duyarlı bir beton üretimi gündemdedir. Yüksek fırın curufu, uçucu kül, bakır endüstrisi flotasyon atığı ve silis dumanı bağlayıcı ve puzolanik özelliklerinden dolayı çimento ve betonda en fazla kullanılan atık malzemeler arasında yer almaktadır (1, 2, 3).

Bakır endüstrisi flotasyon atıkları, bakır endüstrilerinden oluşan ve Zn, Co ve Pb gibi toksik metallerin eser miktarları yanında önemli miktarda Cu içeren atıklardır. Proseste 1 ton bakır üretiminden yaklaşık 2.2 ton bakır flotasyon atığı oluşmaktadır. Dünyada, bakır üretiminden her yıl yaklaşık 24.6 milyon ton bakır flotasyon atığının olduğu bilinmektedir. Büyük miktarlarda oluşan bakır atıkları genellikle herhangi bir ön işleme tabi tutulmaksızın tesis çevresindeki alanlara gelişigüzel bir şekilde depolanmaktadır (4, 5, 6).

Samsun'da kurulu bulunan Eti Bakır İşletmelerine ait izabe tesislerinde cevherden metalik bakır üretilmektedir. İzabe tesislerde yaklaşık olarak %5-7 bakır içeren Murgul, Küre gibi bir çok yerden gelen ve Kalkoprit (CuFeS_2), Bornit (Cu_5FeS_4), Kovelin (CuS) ve Kalkozin (Cu_2S) gibi bakır mineralleri işlenmektedir. Proses sonucu ortaya çıkan curuf ise açık havada bekletilerek soğutulmakta ve içerisinde kalan bakırı kazanmak için flotasyon ünitesine gönderilmektedir. Flotasyon ünitesinde bakırın % 1-2'lik bir kısmı geri kazanıldıktan sonra kalan kısım fabrika çevresindeki araziye flotasyon atığı olarak depolanmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu flotasyon atığının fabrika

sahası içinde yaklaşık 140.000 m²'lik bir alanı işgal ettiği belirlenmiştir. Çoğu zaman atıkların depolandığı arazi zemininde sızdırmazlık sağlayabilecek herhangi bir örtü tabakası kullanılmadığından, atıkta bulunan ağır metaller zamanla yağış sularının da etkisiyle toprak, yeraltı ve yüzey sularına karışarak insan sağlığını ve çevreyi olumsuz yönde etkilemektedir (7).

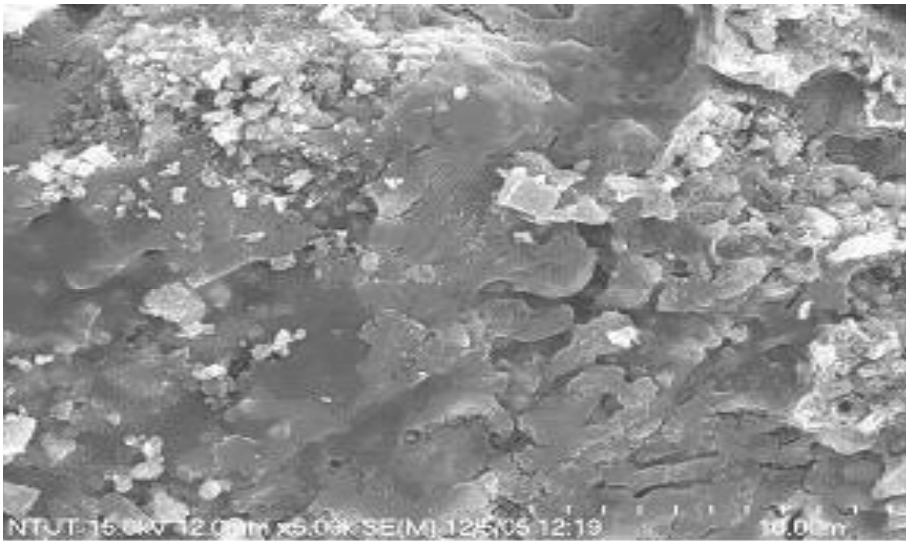
AMAÇ

Bu çalışmada, Samsun Eti Bakır İşletmeleri İzabe Tesisi flotasyon atıklarının çimento katkı maddesi olarak kullanıldığında betonun basınç mukavemeti üzerine etkisi araştırılmıştır. İlk aşamada çimentoya, % 2.5, % 5, % 7.5, % 10, % 12.5 ve % 15 oranlarında flotasyon atıkları ilave edilerek çimentonun basınç dayanımı özellikleri incelenmiştir. İkinci aşamada, karışımlar beton üretiminde kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, Türk Standartları ve referans değerle karşılaştırılmıştır.

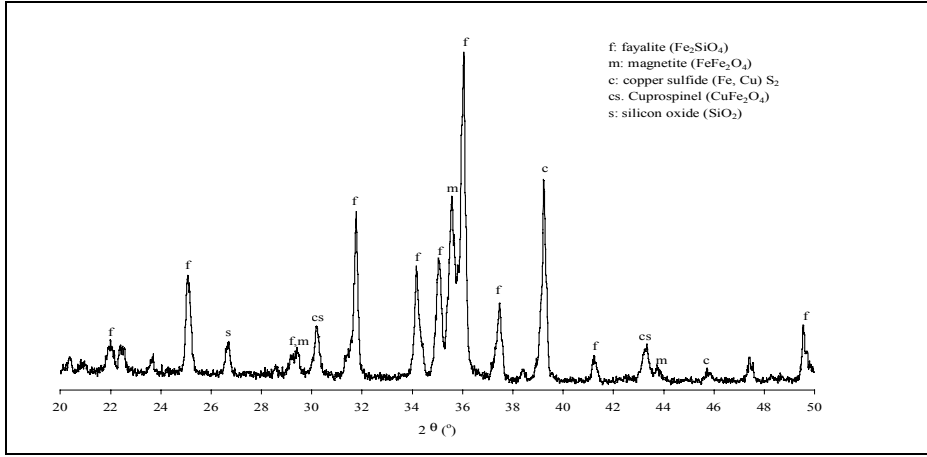
MATERYAL VE METOD

Flotasyon Atıkları

Flotasyon atıkları, Eti Bakır İşletmesi İzabe Tesisleri'nde mekanik bakır eldesi sırasında ortaya çıkan curuflar içerisinde kalan bakırın geri kazanılması için, uygulanan flotasyon ünitesinden temin edilmiştir. Flotasyon atığının SEM fotoğrafı Şekil 1'de, XRD spektrumu Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Bakır Flotasyon Atığının SEM Görüntüsü



Şekil 2. Bakır Flotasyon Atığının XRD Spektrumu

Flotasyon atığının yaklaşık % 68'i Fe_2O_3 , % 25'i SiO_2 ve geri kalan % 10'luk bir bölümü ise, ZnO , CuO , PbO , Cr_2O_3 ve CaO 'dan oluşmaktadır. Flotasyon atığının kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Eti Bakır İşletmesi İzabe Tesisi Flotasyon Atığının Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Bileşim	Bakır Flotasyon Atığı (%)
SiO_2	24.93 ± 0.04
Al_2O_3	0.88 ± 0.01
Fe_2O_3	67.72 ± 0.03
CaO	0.72 ± 0.01
MgO	0.43 ± 0.02
CuO	1.01 ± 0.01
ZnO	2.82 ± 0.02
PbO	0.31 ± 0.01
BaO	0.11 ± 0.01
MnO	0.89 ± 0.01
K_2O	0.46 ± 0.01
SO_3	2.16 ± 0.01
Diğerleri	0.4

Deneyisel çalışmalarda kullanılan bakır flotasyon atıkları, saha içerisindeki farklı noktalardan alınmış ve çalışmalar süresince aynı örnekler kullanılmıştır. Flotasyon atığı tesisten öğütülmüş olarak açığa çıkmış olduğu için herhangi bir boyut analizi yapılmamıştır. Örnekler 103°C 'de 2 saat bekletildikten sonra deneylerde kullanılmıştır.

Çimento

Deneyisel çalışmalarda kullanılan çimento örnekleri Yibitaş-Lafarge Samsun Çimento Fabrikasından temin edilmiştir. Çalışmalarda kullanılmak üzere seçilen çimento örneği TS EN 197-1'e göre CEM I 42,5 R tip çimento deneylerde kullanılmıştır. Bu ürünü kullanım amacı katkısız tip bir çimento kullanım ihtiyacındandır. Kullanılan çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEM I 42.5 R Tip Çimentonun Kimyasal Analizi

Kimyasal Bileşim	CEM I 42.5 R Tip (%)
SiO ₂	19.57
Al ₂ O ₃	5.58
Fe ₂ O ₃	2.94
CaO	63.11
MgO	1.95
SO ₃	2.73
Kızdırma Kaybı	3.35
Çözünmeyen Kalıntı	0.62
Diğerleri	0.15

Çimento Denemelerinin Oluşturulması

Çalışmada, değişik miktarlarda bakır endüstrisi flotasyon atıkları CEM I tip çimento ile karıştırılarak altı deneme oluşturulmuş ve çimentoda basınç dayanım deneyleri yapılmıştır. Denemelerin karışım oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Çimento Denemelerinin Oluşturulması

Deneme No	Karışım Oranları
B1	% 2.5 bakır atığı + % 97.5 CEM I
B2	% 5 bakır atığı + % 95 CEM I
B3	% 7.5 bakır atığı + % 92.5 CEM I
B4	% 10 bakır atığı + % 90 CEM I
B5	% 12.5 bakır atığı + % 87.5 CEM I
B6	% 15 bakır atığı + % 85 CEM I

Çimento harcı oluşturulurken numuneler, kütlece bir kısım çimento, üç kısım standart kum ve 0.50 su/çimento oranında olacak şekilde hazırlanmıştır. Kullanılan kalıplar üç adet prizma biçimli numunenin aynı

anda hazırlanabilmesi için, en kesiti 40mm x 40mm ve uzunluğu 160mm olan üç yatay bölümden oluşmaktadır. Bu kalıpların et kalınlığı en az 10mm olan çelik levhadan yapılmıştır (8).

Çimentonun basınç dayanım deneyleri yapılmak üzere hazırlanan harç, üç deney prizmasına yetecek kadar, (420 ± 2) gr çimento karışımı, (1350 ± 5) gr kum ve (225 ± 1) gr sudan oluşmaktadır. Deneylerde, daha önceden karıştırılmış ve (1350 ± 5) gr'lık plastik torbalarda deneye hazır hale getirilmiş CEN Referans kumu kullanılmıştır. Kırılma günü gelinceye kadar 2, 7, 28 ve 90 gün bekletilmek üzere, su sıcaklığı 20°C'ye ayarlanmış kür havuzlarına konulmuştur (9, 10).

Beton Denemelerinin Oluşturulması

Bu aşamada, çimento deneylerinin gerçekleştirildiği B1, B2, B3 ve B4 karışımları ile beton oluşturularak basınç dayanım deneyleri yapılmıştır.

Beton oluşturulurken ise su / çimento oranı (W/C) 0.95 olacak şekilde ayarlanmıştır. 1 m³'lük beton üretmek için toplam ağırlık 2292 kg olarak alınmış ve 969 kg (% 53) kırma kum, 445 kg (% 24) 08 / 16 mm'lik agrega, 428 kg (% 23) 16 / 31.5 mm'lik agrega kullanılmıştır.

Hazırlanan beton karışımları, 15 x 15 x 15 cm'lik PVC kalıplara dökülerek 1 gün bekletilmiş ve kalıplardan çıkarılmıştır. Kırılma tarihleri gelinceye kadar, 2, 7, 28 ve 90 gün kür havuzunda bekletilmiştir (11, 12).

Basınç Dayanım Testleri

Çimentoda basınç dayanım testleri yapılırken, bekleme süresi dolan numuneler kırılarak ikiye bölünerek her yarım prizma cihazın plakaları arasına ± 0.5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezi ayarlanmış ve prizmanın arka yüzü plakadan 10mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiştir. Basınç, (2400 ± 200) N/s hızda olmak üzere prizmalar kırılana kadar arttırılmıştır. Basınç dayanımı deneyinin sonucu, 3 prizmalık takımdan tayin edilen 6 adet sonucun aritmetik ortalaması olarak ifade edilmiştir (8).

Betonda basınç dayanım testleri yapılırken her beton karışımından iki adet numune hazırlanmış ve iki numunenin beton dayanım değerinin ortalaması alınmıştır. Küp şeklindeki numunelerin basınç dayanımı preste kırılarak ölçülmüştür.

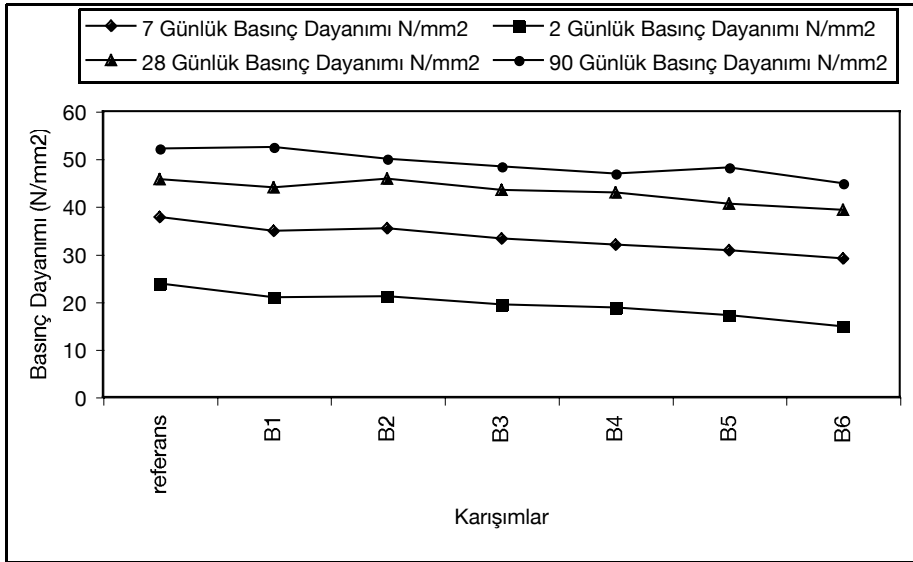
BULGULAR VE DEĞERLENDİRME**Bakır Endüstrisi Atığı Katkılı Çimentonun Basınç Dayanım Sonuçları**

Katkı maddesi olarak bakır atığının çimento ve betonda davranışını tespit edebilmek amacıyla hazırlanan karışımlara farklı oranlarda ilave edilmiştir. Bakır atığı ilave edilerek oluşturulmuş karışımlarla yapılan basınç dayanımı testlerinde 2 ve 7 günlük basınç dayanımları referans çimento için 23.8 N/mm² ve 37.8 N/mm² olarak bulunmuştur. Bu oranlar referans çimentoya göre düşme göstermiştir. 28 günlüklerde ise bu düşme değeri biraz daha azalmıştır. Bu değerler ilave edilen bakır atığı miktarına göre, atık miktarı arttıkça 2, 7, 28 ve 90 günlük değerlerde basınç dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar Zain (2004) tarafından yapılan deneylerde de elde edilmiştir. Zain bakır atıklarının güvenli bertarafı için çimentoya katılması gereken optimum dozu % 5 olarak belirlemiştir. Çünkü bu orandan sonra dayanımlarda azalma görülmüştür. Zain (2004) azalmanın nedenini bakır atığında bulunan puzolanik özelliğin, çimentoda bulunanla kıyasladığında düşük olduğundan kaynaklandığını ifade etmiştir. Değerler bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir (13).

% 2.5 bakır atığı katkılı çimentonun 2 günlük basınç dayanım değeri referans çimentoya oranla % 12 oranında basınç kaybına uğrarken, bu oran 7 günlükte % 7.6, 28 günlükte % 3.7 bulunmuştur. 90 günlük karışım ise referans ile yaklaşık olarak aynı değerdedir. Bakır endüstrisi atık miktarı % 10'a çıkarıldığında basınç dayanım değerlerinde sürekli düşme gözlenmiştir. Bu oran referansla karşılaştırıldığında 2, 7, 28 ve 90 günlük değerler için basınç dayanımlarındaki azalma oranları sırasıyla %21, %16, % 6 ve %10 olarak belirlenmiştir. Bakır endüstrisi atığı miktarı % 15 olduğunda referans çimentoya göre 2 günlük dayanımlarda % 37 dayanım kaybı olmuştur. 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarda ise bu değer % 15'lere ulaşmıştır. Yapılan çalışmalar ilave edilen tüm oranlarda bakır atığı katkılı çimentonun basınç dayanım değerlerini düşürdüğünü göstermiştir.

Tablo 4. Bakır Endüstrisi İzabe Tesisi Atığı Katkılı Çimentolardan Elde Edilen Karışımların Basınç Dayanımları

Sembol	Çimento Karışımları	Basınç Dayanımı (N/mm ²)			
		2 gün	7 gün	28 gün	90 gün
CEM I 42.5 R	Portland Çimentosu (Referans)	23.8	37.8	45.7	52.2
B1	% 2.5 bakır atığı + % 97.5 CEM I	20.9	34.9	44.0	52.5
B2	% 5 bakır atığı + % 95 CEM I	21.1	35.4	45.8	50.0
B3	% 7.5 bakır atığı + % 92.5 CEM I	19.4	33.3	43.5	48.4
B4	% 10 bakır atığı + % 90 CEM I	18.8	32.0	42.9	46.9
B5	% 12.5 bakır atığı + % 87.5 CEM I	17.2	30.8	40.6	48.2
B6	% 15 bakır atığı + % 85 CEM I	14.8	29.1	39.3	44.9



Şekil 3. Bakır Endüstrisi Atığı ve CEM I Tip 42.5 Karışımından Oluşan Çimentonun Basınç Dayanımlarındaki Değişimi

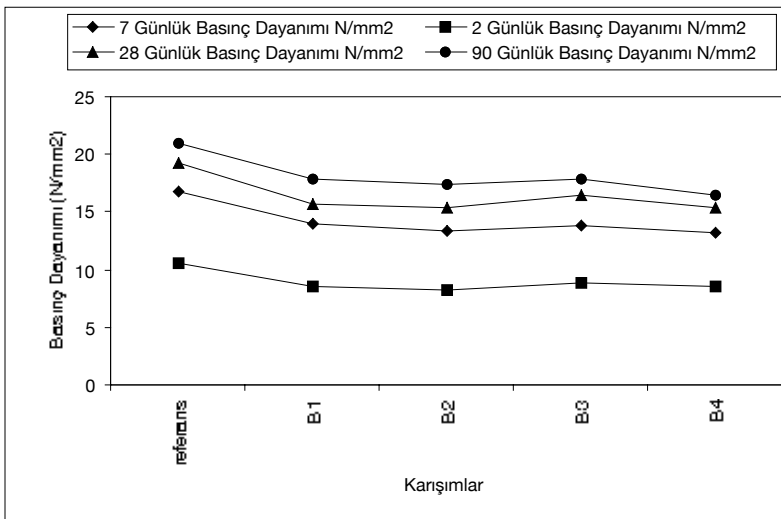
Şekil 3'den de görüldüğü gibi 2 ve 7 günlük değerler için basınç dayanımlarındaki düşme paralellik göstermiştir. 28 günlük değerlerde % 5 bakır atığı katkılı çimento referans çimento değerine ulaşmış ancak katkı ilave oranı arttıkça dayanım düşmüştür. 90 günlük değerlerde ise % 2.5 bakır atığı katkılı çimento referans değerine ulaşmıştır.

Bakır Endüstrisi Atığı Katkılı Betonun Basınç Dayanım Sonuçları

Bakır endüstrisi izabe tesisi atığı katkılı çimentolardan elde edilen betonların basınç dayanımları Tablo 5’de verilmiştir. Referans çimento ile hazırlanan 2 günlük betondaki basınç dayanımı 10.5 N/mm^2 iken, % 2.5 bakır atığı katkılı karışımda 8.5 N/mm^2 ve % 10’luk karışımda 8.2 N/mm^2 bulunmuştur. Beton basınç dayanım testlerinde referans çimentoya oranla düşme gözlenmiştir. 2 günlük değerlerde bakır atığı miktarı arttıkça çimentoda % 16 ve betonda ise ortalama % 20 oranında kayıp bulunmuştur. 7 günlük çimento deneylerinde basınç dayanımı % 10 civarında düşerken bu değer beton deneylerinde % 20, 28 günlüklerde çimento deneylerinde basınç dayanım değerleri % 4 civarında düşerken betonda ise % 20 civarında olmuştur. 90 günlük çimento deneylerinde ise basınç dayanımlarındaki düşme % 5 iken betonda % 17 olarak belirlenmiştir.

Tablo 5. Bakır Endüstrisi İzabe Tesisi Atığı Katkılı Çimentolardan Elde Edilen Betonların Basınç Dayanımları

Sembol	Çimento Karışımları	Basınç Dayanımı (N/mm^2)			
		2 gün	7 gün	28 gün	90
CEM I 42.5 R	Portland Çimentosu (Referans)	10.5	16.7	19.3	21.0
B1	% 2.5 bakır atığı + % 97.5 CEM I	8.5	14.0	15.7	17.9
B2	% 5 bakır atığı + % 95 CEM I	8.2	13.4	15.3	17.4
B3	% 7.5 bakır atığı + % 92.5 CEM I	8.9	13.8	16.5	17.9
B4	% 10 bakır atığı + % 90 CEM I	8.2	13.2	15.4	16.5



Şekil 4. Bakır Endüstrisi İzabe Tesisi Atığı Katkılı Çimentolardan Elde Edilen Betonların Basınç Dayanımlarındaki Değişimi

SONUÇ

Beton ve çimento katkı maddesi olarak atık materyallerin kullanılması son yıllarda artış göstermiştir. Yapılan çalışmada Samsun Eti Bakır İşletmelerinden blister bakırın eldesi esnasında ortaya çıkan ve çevresel problemlere neden olan flotasyon atığının beton ve çimentoda katkı maddesi olarak kullanımı araştırılmıştır.

Bakır atığı katkılı karışımların beton deney sonuçları, basınç dayanımı değerleri göz önünde bulundurularak irdelendiğinde, %7.5 bakır atığı + %92.5 CEM I karışımıyla yapılmış olan betonun, bakır oranları değiştirilerek yapılan karışımlara oranla daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Farklı oranlarda bakır atığı katkılı çimentoların 2,7,28 ve 90 günlük basınç dayanımları referans çimento değerleriyle karşılaştırıldığında artan bakır atığı ilavesiyle basınç dayanımlarının düştüğü gözlenmiştir. Ancak % 2.5 bakır atığı ilavesi ile yapılan deney sonuçlarının referans değerlerle uyumluluk gösterdiği belirlenmiştir. Beton deney sonuçları incelendiğinde bakır atığı miktarının artmasının basınç dayanımları üzerinde azalan bir etki göstermediği bulunmuştur. Bununla birlikte referans değerlerle karşılaştırıldığında basınç dayanım oranlarında bir miktar düşme olduğu gözlenmiştir.

Daha önce yapılmış çalışmalarda hiçbir işlen uygulanmamış bakır flotasyon atığına TCLP leaching yöntemi uygulandığında atıktan çözeltiye geçen bakır konsantrasyonları yaklaşık 150-160 mg/l arasında bulunmuştur. Bulunan bu değer deşarj standartlarının oldukça üzerindedir. Bu atığın çimentoda katkı maddesi olarak kullanıldıktan sonra yapılan leaching test sonuçlarında değerlerin 0.01mg/l' nin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bakır flotasyon atığının katkı maddesi olarak kullanılmasıyla aynı zamanda atığın güvenli bir şekilde bertarafı da gerçekleşmektedir (14).

Sonuç olarak bakır endüstrisi atıklarının çimento ve beton üretiminde kullanımı ile atığın zararlı etkilerinin zararsız hale getirilmesi sağlanmakta aynı zamanda bu teknolojinin giderek artan hammadde gereksiniminin bir kısmı karşılanmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Hårdtl, R., "High Quality Concrete Containing Fly Ash According to New European Standards", Cement and Concrete Technology in the 2000s, Mineral Admixtures, Second International Symposium, Turkish Cement Manufacturers Association, Proceedings Volume:1, Ed. A. Yeğinobalı, Ankara, 2000, pp 350-358.

2. Okucu, A., “Volkanik Tüflerle Birlikte Cürufun Çimento Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliği”, 6. Ulusal Beton Kongresi, Türkiye Mühendisler Mimarlar Odası Birliği, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, İstanbul, 2005, pp 73-80.
3. Turanlı, L., Erdoğan, T.Y., ve Karaer, K., “Çayırhan Uçucu Külünün Portland Çimentosu-Uçucu Kül Hamur ve Harçlarının Özelliklerine Etkisi”, Endüstriyel atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması 3 Bildiriler Kitabı, 1-2 Ekim, Eskişehir, 1997, pp 283-293.
4. Wei, M.S. and Huang, H.H., 2001. “Recycling and Reuse of Industrial Wastes in Taiwan”, Waste Management, 21, pp 93-97.
5. Shi C., Qian J., “High Performance Cementing Materials from Industrial Slags”, Resources Conservation & Recycling, 29, 2000, pp195-207.
6. Gorai, B., Jana, R.K., and Premchand, “Characterisric and Utilization of Copper Slag”, Resources, Conservation and Recycling, 2003, pp 1-15.
7. Çoruh, S., Bakır Endüstrisi Atıklarının Vitrifikasyon Yöntemi İle Bertarafı ve Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 2003, 135 sayfa.
8. TSE, Çimento-Deney Metotları-Bölüm 1: Dayanım Tayini, (TS EN 196-1), Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.
9. TSE, Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, (TS EN 197-1), Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.
10. TSE, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıpların Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, (TS N 12390), Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.
11. TSE, Çimento-Deney Metotları-Bölüm 7: Çimentodan Numune Alma ve Hazırlama Metotları, (TS 23 EN 196-7), Türk Standartları Enstitüsü, 2002, Ankara.
12. TSE, 2003. Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, (TS 500), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
13. Zain, M.F.M., Islam, M.N., Radin, S.S. and Yap, S.G., “Cement-Based Solidification for the Safe Disposal of Blasted Copper Slag”, Cement and Concrete Composites, No.26, 2004, pp 845-851.
14. Mesci, B., Bakır Endüstrisi Flotasyon Atıkları ve Zeolitlerin Beton Üretiminde Kullanım Olanaklarının Araştırılması, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, 2007, 122 sayfa.

ENDÜSTRİYEL ATIK KATKILI ÇİMENTOLARIN BETON DAYANIMI VE DONATI KOROZYONUNA ETKİLERİ

Ergin ERGİ
Kimya Mühendisi
Denizli, Türkiye

G.Sevim BİLGİN
Kimya Mühendisi
Sakarya, Türkiye

M.Sadrettin ZEYBEK
Yrd.Doç.Dr.
Hitit Üniversitesi
Çorum, Türkiye

Abdurrahman ASAN
Yrd.Doç.Dr.
Hitit Üniversitesi
Çorum, Türkiye

ÖZET

Bu çalışma, bazı endüstriyel atıkların, betonun mekanik dayanımına etkisini araştırmak amacıyla Ekmekçioğlu Çinko-Bakır fabrikasından alınan atıklar, Ece Seramikten alınan alçı atığı, Zonguldak Çatalözü Termik Santralinden alınan uçucu kül ve Bandırma Etibor'dan alınan boraks şlamı belli oranlarda Yibitaş Lafarge-Çorum Çimento Fabrikasının ürettiği PÇ 42,5 CEM II/A çimentosuna ilave edilerek yapılmıştır. Basınç Dayanımları; Bor+Ekmekçioğlu katkılı çimentolarının 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre %1 bor + %9 Ekmekçioğlu Cürufu ihtiva edenin en iyi basınç dayanımı verdiği, %7 bor + % 3 Ekmekçioğlu ve %5 bor + % 5 Ekmekçioğlu katkılı çimentolarının da standart çimentoya göre düşük basınç dayanımı verdiği gözlenmiştir. Bor+Ece Alçı katkılı çimentolarının 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre standart çimentoya göre düşük basınç dayanımı sonucu elde edildi. Ayrıca bu katkıların betonarme demirlerinin korozyonuna etkisini araştırmak için 60 gün süreyle korozyon potansiyelleri ölçüldü. Endüstriyel atık katkı maddesi içeren çimento ile elde edilen beton bloklardaki betonarme demirlerinin korozyon potansiyellerinde pozitif yönde artış tespit edilmiştir.

GİRİŞ

Günümüz teknolojisinin gelişmesine paralel olarak çimento teknolojisi de gelişmektedir. Bu gelişmeler özellikle, standart dışı yeni çimento karışımları araştırma geliştirme ve bunların standardizasyonu alanlarında olmaktadır. Bir taraftan basınç dayanımı yüksek, korozyona dayanıklı, kimyasal etkilere dayanıklı, yoğunluğu düşük standart üstü çimentolar üretilmeye çalışılırken, diğer yünden, çevreyi kirleten birçok sanayi atığının katkı maddesi olarak kullanılmasını amaçlayan, fakat daha ucuza mal olan standart altı çimentoların üretilmesi üzerinde durulmaktadır.

Çimento üretiminde çeşitli endüstriyel atıklardan yararlanılması, üretim maliyetinin düşürülmesi, ürünün çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi ve hammadde kaynaklarından tasarruf sağlanması gibi amaçlara hizmet etmektedir. Bu amaçla kullanılan endüstriyel atıklar içinde en önemlileri yüksek fırın cürufu çelik yapımında çıkan, uçucu baca külleri ve fosfojibs gibi malzemelerdir[1].

Çimento Katkı Maddeleri

Portland çimentosunun hammaddelerinden başka hidratlaşma derecesini ayarlamak amacıyla öğütme kademesine klinkere % 3-6 oranında yardımcı hammadde olarak jibs (alçı taşı), $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ilave edilmektedir. Klinker, alçı taşı katılmadan öğütülürse su ile muamelede hemen sertleşir. Ayrıca portland çimento klinkerine, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, tabii cüruf veya tras, kum, kireçli toprak ve demirli maddeler katılmaktadır. Bazı kimya fabrikalarında yan ürün olarak elde edilen CaSO_4 'lı maddelerde çimentoya alçı yerine katılabilir[1].

Betondaki Demir Korozyonu

Beton içindeki çeliğin korozyon hızı büyük ölçüde çevre koşullarına bağlıdır. Beton içinde korozyon olayının cereyan edebilmesi her şeyden önce oksijen ve nemin birarada olmasıyla mümkün olur. Klorür iyonu, yürüyen korozyon olayının hızını artırır. Eğer beton ıslanma kuruma şeklinde bir etkiye maruzsa korozyon şiddeti daha da artar. Korozyon hızını etkileyen diğer faktörleri şu şekilde sıralamak mümkündür. Beton boşluk suyunun pH'ı, karbonasyon olayı, betonda bulunan çatlaklar, kaçak akımlar, galvanik etkiler. Beton tasarımı da korozyon açısından önemlidir. Beton karışımının bileşimi, betonarme demirlerinin yüzeye olan uzaklığı (pas payı) da önemli rol oynar.

Beton içindeki çelik korozyona uğrayınca pas oluşur. Pas demire göre daha büyük bir hacim kaplar. Bu betonda içsel gerilmelere neden olur ve beton parçalanır. İç kısımlarda da beton ile çelik arasındaki yapışma kaybolur. Dolayısıyla beton mukavemetini kaybeder.

YÖNTEM

Numunenin Temini

Çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılan numuneler Ekmekçioğlu Çinko-Bakır Fabrikası, Ece Seramik, Zonguldak Çatalözü Termik Santrali ve Bandırmadaki Etibor Fabrikasından temin edilmiştir.

Kimyasal analizleri Çorum Yibitaş Lafarge Çimento Fabrikasının Kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen katkılı çimentoların TS EN 196-2 standartlarına uygunluğu test edilmiştir.

Testler

Priz Başlama ve Sona Erme Süreleri(TS EN 196-3)

Vicat kalıbı standart kıvamdaki çimento pastası ile doldurulur ve düzlenir. Doldurulmuş vicat kalıbı taban plakası ile birlikte rutubet odasına yerleştirilir, uygun bir süre sonra vicat cihazına ve iğnenin altına yerleştirilir. İğne pastayla temas edinceye kadar yavaşça indirilir. İğnenin pastaya batması tamamlandıktan sonra okuma yapılır.

Basınç Dayanımı (TS EN 196-1)

Yarım prizmalar, cihazın plakaları arasında ± 0.5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plakadan veya yardımcı plakalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilir. Yük (2400 ± 200) N/sn hızda olmak üzere düzgün şekilde, prizma kırılana dek artırılır[4].

Korozyon Testleri (ASTM C 876-91)

Çimento kalıplarının iki ucuna yerleştirilen betonarme demirlerin potansiyelleri; avometrenin bir ucu kalıp üzerine yerleştirilen bakır sülfat çözeltisindeki bakır tele, diğer ucu demir üzerine temas ettirilir. Avometredeki değerin sabitlenmesiyle okunan değer kaydedilir.

AMAÇ

Bazı endüstriyel atıkların, betonun mekanik dayanımına ve betonarme demirlerinin korozyonuna etkisini araştırmaktır. Bu amaçla Ekmekçioğlu Çinko-Bakır fabrikasından alınan atıklar, Ece Seramikten alınan alçı atığı, Zonguldak Çatalözü Termik Santralinden alınan uçucu kül ve Bandırma Etibor'dan alınan boraks şlamı farklı oranlarda Yibitaş Lafarge-Çorum Çimento Fabrikasının ürettiği PÇ 42,5 CEM II/A çimentosuna ilave edilerek yapılmıştır

SONUÇ

Yibitaş Lafarge-Çorum Çimento fabrikasının ürettiği PÇ 42,5 CEM II/A çimentosunun her bir malzemesi (klinker, tras, alçıtaşı, kalker) fabrika sahasından temin edilmiş olup, standartlara göre öğütülmüş ve bu karışımdan oluşan çimento standart kabul edilerek, bu çimento içine Ekmekçioğlu Çinko-Bakır fabrikasından alınan atıklar cüruf ilavesi olarak, Ece Seramikten alınan alçı atığı, Zonguldak Çatalözü Termik Santralinden alınan uçucu kül ve Bandırma Etibor'dan alınan boraks şlamı belli oranlarda ilave edilerek bu atıkların çimento içinde değerlendirilebilir olduğu görülmüştür. Numunelerimize toplam % 10 katkı ilavesi yapılması uygun görülmüştür. Ayrıca bu katkılı çimentoların betonarme demirlerinin korozyonunu önlediği tespit edilmiştir.

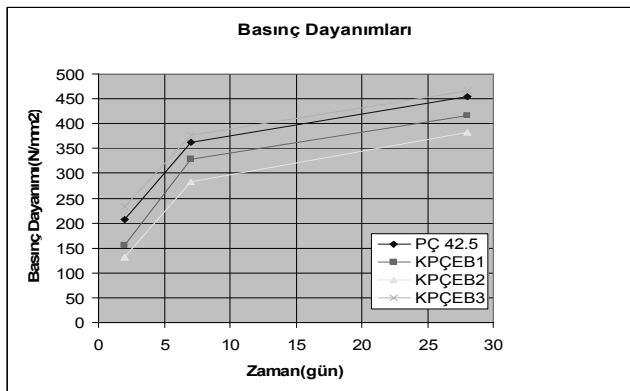
Çizelge 1. Çimento Kodları ve Bileşimleri

Çimentoların Kodları	Çimentonun Adı	Uçucu Kül %	Ece Alçı %	Ekmekçioğlu Cüruf %	Bor %
PÇ 42.5	Standart Portland Çimentosu	---	---	---	---
KPÇEB1	Katkılı Portland Çimentosu Ekmekçioğlu-Bor1	---	---	3	7
KPÇEB2	Katkılı Portland Çimentosu Ekmekçioğlu-Bor2	---	---	5	5
KPÇEB3	Katkılı Portland Çimentosu Ekmekçioğlu-Bor3	---	---	9	1
KPÇBE1	Katkılı Portland Çimentosu Bor-Ece Seramik1	---	3	---	7
KPÇBE2	Katkılı Portland Çimentosu Bor-Ece Seramik2	---	5	---	5
KPÇBE3	Katkılı Portland Çimentosu Bor-Ece Seramik3	---	9	---	1
KPÇUB1	Katkılı Portland Çimentosu Uçucu Kül-Bor1	3	---	---	7
KPÇUB2	Katkılı Portland Çimentosu Uçucu Kül-Bor2	5	---	---	5
KPÇUB3	Katkılı Portland Çimentosu Uçucu Kül-Bor3	9	---	---	1

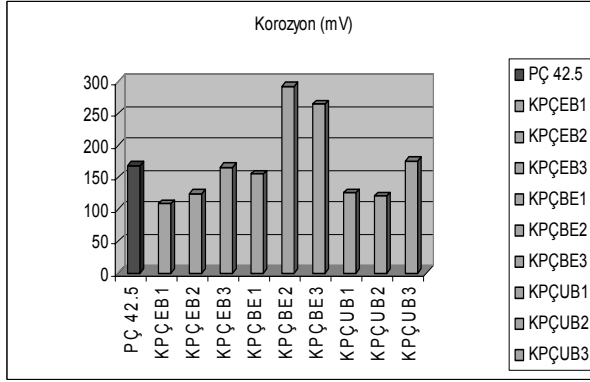
Priz Süreleri; bütün çimento karışımlarının uygunluk gösterdiği bulunmuştur. Standart numune ile karşılaştırıldığında Bor+Ekmekçioğlu katkılarının bulunduğu **KPÇEB1, KPÇEB2 ve KPÇEB3** numunelerinde priz sürelerinin geç başlayıp erken bittiği, Bor+Ece Alçı katkılarının bulunduğu **KPÇBE1, KPÇBE2 ve KPÇBE3** numunelerinde ise priz sürelerinin daha da geç başladığı ve erken bittiği, Bor+Uçucu Kül katkılarının bulunduğu **KPÇUB1, KPÇUB2 ve KPÇUB3** numunelerinde ise priz sürelerinin Bor+Ece Alçı katkılı numunelerle yakınlık gösterdiği ve priz sürelerinin geç başlayıp erken bittiği sonuçlarına varıldı. Bunun sebebi ise alçının priz süresini geciktirdiği bilinmektedir. Bizim de alçı oranlarımızın yüksek olması priz süresini geciktirmiştir. Bulunan sonuçların hepsi standartlar dahilindedir. Standarda göre 1 saat önceden priz süresinin başlamaması ve 10 saatten sonra da priz süresinin tamamlanmaması istenir.

Çizelge 2. Deneysel Sonuçlar

Çimentoların Kodları	Basınç Dayanımları (N/mm ²)			Korozyon (mV)	İncelik		Priz Başlangıç min 1 saat	Priz Bitiş max 10 saat
	2 gün	7gün	28 gün		90 µ üstü %	200 µ üstü %		
PÇ 42.5	20.8	36.3	45.4	169	2.8	0.3	140	190
KPÇEB1	15.6	32.9	41.7	108	2.8	0.5	340	425
KPÇEB2	13.2	28.3	38.3	124	2.6	0.4	430	455
KPÇEB3	23.4	37.6	46.6	166	4.4	1	200	235
KPÇBE1	14.8	23.7	38.4	155	2.3	0.7	410	435
KPÇBE2	10.2	15.9	21.3	293	4.5	0.6	500	555
KPÇBE3	13.0	17.3	22.9	265	5	0.5	220	260
KPÇUB1	8.4	14.1	30.0	126	2.7	0.4	485	575
KPÇUB2	10.5	23.6	31.2	121	2.5	0.3	480	565
KPÇUB3	17.3	29.8	41.4	175	1.6	0.2	200	235



Şekil 1. 2-7-28 Günlük Basınç Dayanımı



Şekil 2. Korozyon Test Sonuçları

Basınç Dayanımları; Bor+Ekmekçioğlu katkıli çimentolarının 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre %'lik oranları grafiğe geçirdiğimizde %1 bor + %9 Ekmekçioğlu Cürufu ihtiva edenin en iyi basınç dayanımı verdiği (46.6 N/mm²), %7 bor + % 3 Ekmekçioğlu (41.7 N/mm²) ve %5 bor + % 5 Ekmekçioğlu (38.3 N/mm²) katkıli çimentolarının da standart çimentoya göre düşük basınç dayanımı verdiği gözlenmiştir.

Bor+Ece Alçı katkıli çimentolarının 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre % oranlarını grafiğe geçirdiğimizde standart çimentoya göre düşük basınç dayanımı sonucu elde edildi. **KPÇBE1** (38.4 N/mm²), **KPÇBE2** (21.3 N/mm²), **KPÇBE3** (22.9 N/mm²). Bunun sonuçlara göre bor ve Ece alçının basınç dayanımına olumsuz etki yaptığı görülmüştür.

Bor+Uçucu Kül katkıli çimentolarında 2-7-28 günlük basınç dayanımlarına göre % oranlarını grafiğe geçirdiğimizde standart çimentoya göre düşük basınç dayanımı sonucu elde edildi. **KPÇUB1** (30.0 N/mm²), **KPÇUB2** (31.2 N/mm²), **KPÇUB3** (41.4 N/mm²).

Ancak PÇ 32,5 Standartlarına uygunluk göstermesi sebebiyle PÇ 32,5 olarak kullanılabilir.

Mekanik testlerin sonucunda en iyi basınç dayanımını ve priz süresinin de ideal olduğu **KPÇEB1** (41.7 N/ mm²) ve **KPÇEB3** (46.6 N/ mm²) numaralı katkıli çimentoları vermiştir.

KPÇBE2, **KPÇBE3** numuneleri, korozyonun önlenmesinde çok önemli bir katkı sağlarken diğer numuneler önemli bir katkı sağlamamıştır. Ancak korozyon açısından kötü bir etkisi de tespit edilmemiştir.

Bütün sonuçların değerlendirmesi yapılırsa; elde ettiğimiz katkıli çimentoların bütün özelliklerinin standartlar içinde gözlenmesi bu katkıli

çimentoların kullanılabileceğine ve atıkların uzaklaştırılmasında yararlı olacağı sonucuna varılmıştır. Atıkların çimento içerisindeki maliyeti düşüreceğinden ülke ekonomisi açısından yararlı olacağı söylenebilir.

Ancak yapılan deneyleri genel olarak değerlendirdiğimizde katkı oranı arttıkça basınç dayanımlarında gittikçe düşüş görülmektedir. Bu yüzden kullanımda katkı oranı artırılırsa basınç dayanımları standartlara uygunluk göstermeyeceği yorumunu yapabiliriz.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada denenen alçı atığı, uçucu kül ve boraks şlamı gibi endüstri atıklarının çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabileceği ve **KPÇBE2**, **KPÇBE3** atık katkılı çimentoların, betonarme demirinin korozyonunun önlenmesinde önemli bir katkı sağladığı, diğer numunelerin ise olumsuz bir etki sağlamadığı tespit edilmiştir.

5. KAYNAKLAR

1. Zeybek, S., “Borlu Çimentolar”, Yüksek Lisans Tezi, Manisa, Şubat 1996.
2. Yeğınobalı, A., “Katkılı Beton mu, Katkılı Çimento mu?”, Çimento ve Beton Dünyası, Nisan 2001.
3. Arslan, A., H., “Portland Çimentosu Hidratasyonu”, KTÜ Bitirme Tezi, 1979.
4. Türk Standardı TS EN 196-1, TS EN 196-2, TS EN 196-3
5. Başyigit, C., “Yüksek Oranda, Yüksek Kalsiyumlu Uçucu Kül Katılmasının Beton Özelliklerine Etkisi”, Jeoloji Mühendisliği, Doktora Tezi, 1993
6. Tokyay, M., Erdoğan, K., “Cürufklar ve Cürufllu Çimentolar”, TÇMB Yayınları, Ocak 2002
7. Erdoğan, Y., Demirbaş, A., Genç,H., “Partly-Refined Chemical By-Product Gypsums as Cement Additives”, Cem. Concr. Res., 22, 841, 1992.
8. Ölmez, H., “Endüstriyel ve Tarımsal Atıkların Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi”, OMÜ Yayınları, Samsun 1988.
9. Aslan, A., “Termik Santral ve Biyokütle Atıkları ile Tras Katkılarının Çimentonun Mekanik Dayanım ve Hidratasyon Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması”, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon, 1998.
10. Tokyay, M., Erdoğan, K., “Uçucu Küllerin Karakterizasyonu”, TÇMB Yayınları, Ağustos 1998.
11. Genç,H., “Borik Asit Fabrika Atıklarının Değerlendirilmesi”, KTÜ Y.L.T., Trabzon, 1991.

BORAKS ÜRETİMİNDE ORTAYA ÇIKAN ATIK MALZEMENİN ÇİMENTODA DEĞERLENDİRİLMESİ

Mine ÖZDEMİR

Doç.Dr.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Eskişehir, Türkiye

Ali UĞURLU

Kim. Yük. Müh.

DSİ TAKK
Ankara, Türkiye

ÖZET

Türkiye 803 milyon ton bor cevheri rezervi ile dünyadaki bor cevheri rezervinin yaklaşık % 63'üne sahiptir. Türkiye'deki en önemli bor cevherleri kolemanit, üleksit ve tinkaldir. Boraks üretiminde kullanılan tinkal minerali ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Bu üretim sırasında her yıl 120.000 ton katı atık ortaya çıkmakta ve bunların depolanması ekonomik ve teknik yönden ciddi sorunlar oluşturmaktadır. Tinkalin konsantre hale getirilmesi sırasında konsantre tinkal ve boraks pentahidrat ünitelerinde ortaya çıkan bu katı atıklar 1. ve 2. kil pestili atığı (1. KPA ve 2. KPA) olarak bilinmektedir. Kil pestili atığı % 8-20 B_2O_3 içermektedir. Epeyce yüksek miktarda B_2O_3 içeren bu atıkların değerlendirilememesi ülke ekonomisi için bir kayıp olduğu gibi çevre açısından da sorun oluşturmaktadır. Ayrıca boraks atıkları kil minerali ile aynı bileşenleri içermesi nedeniyle hafif bir puzolanik karakter taşımaktadır. Bu nedenlerden dolayı söz konusu atık malzemenin çimento içerisinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada, kil pestili atıkları katkı maddesi olarak Portland çimentosuna katılmış ve kil pestili oranının çimento yapısı üzerindeki etkisi taze ve sertleşmiş beton deneyleri yapılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Türk Standartları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak 1. ve 2. kil pestili atık malzemesinin sırasıyla % 5 ve % 7 oranlarında çimento içerisinde katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

GİRİŞ

Türkiye dünya bor rezervlerinin yaklaşık % 63'ne sahip olup yıllık 1,72 milyon ton boraks minerali ve bileşikleri üretimiyle ABD'den sonra dünya ölçeğindeki en büyük bor üreticisidir [1]. Türkiye'deki bilinen bor rezervi 803 milyon ton olup tahmin edilen rezerv ise 2,40 ila 3,20 milyar ton arasındadır. Bor yatakları Zonguldak- Mersin hattının batısında kalan neojen göl tortulları içerisinde yer alır. Emet ve Bigadiç kolemanit yatakları ile Kırka'daki tinkal yatakları dünyanın sayılı boraks cevherleri olarak gösterilmektedir [2]. Etibank Kırka Boraks Tesislerinde konsantre tinkal, boraks pentahidrat ve susuz boraks üretimi esnasında; 1. ve 2. kil pestili ve şlam gibi konsantratör atıkları ile eleküstü ve 2. kademe atıkları adı verilen değişik atık malzemeler ortaya çıkmaktadır [3]. Tesiste her yıl 120 bin ton civarında kil pestili atığı ortaya çıkmakta ve bu malzeme hiçbir şekilde değerlendirilmemektedir. Tesisten çıkan diğer atık maddeler de dikkate alındığında her yıl gittikçe artan bir atık sorunun varlığı kolayca anlaşılabilir. Atık maddeler içerisinde % 8 ile % 20 arası bor oksit bulunması depolamanın iyi yapılamaması durumunda çevre ve insan sağlığı için ciddi bir tehdit olarak algılanabilir. Günlük 20 mg boraks alımının hastalıklara, bu dozun üzerindeki alımların ise ölümlere neden olduğu bilinmektedir [4, 5]. Atık malzemelerin insan ve çevre sağlığına zarar vermeyecek şekilde depolanmasının yüksek maliyeti ise sorunun başka bir boyutudur. Son yıllarda atıklara değerlendirilebilecek bir malzeme olarak bakılması sonucu birçok atık malzeme sanayide değişik şekilde kullanılır olmuştur. Kimyasal ve fiziksel yapısı içine katılacağı esas malzemeye uygun olan ya da ona uygun hale getirilen atık malzemeler yapı malzemesi üretiminde; özellikle çimento, harç, beton, tuğla kiremit, yol vs yapımında kullanılır olmuştur [6,7].

AMAÇ

Çalışmanın amacı, tinkalin konsantre hale getirilmesi sırasında konsantre tinkal ve boraks pentahidrat ünitelerinde ortaya çıkan ve depolanması gerek teknik ve gerekse de ekonomik açıdan önemli bir yatırımı gerektiren, kimyasal yapısından da anlaşılacağı üzere kil içerisindeki aktif bileşenleri içeren atık malzemenin kalsine edilmeden çimento içerisinde değerlendirilmesidir. Çimento içerisine sadece öğütülerek katılan ve bu nedenle çimento maliyetini düşüren bu atık malzemenin çimento özelliklerini hangi yönde ve ne kadar değiştirdiği çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Kullanılan Malzemeler

Çalışmalarda kullanılan 1. ve 2. kil pestili atığı Etibank Kırka Boraks tesislerinden alınmış olup, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. 1. ve 2. kil pestili atık malzemelerinin özellikleri

Oksit bileşenler	1. Kil pestili, %	2. Kil pestili, %
B ₂ O ₃	19,78	9,63
CaO	15,86	20,24
MgO	14,26	17,31
SiO ₂	15,47	12,09
Na ₂ O	6,13	5,60
Al ₂ O ₃	2,05	1,35
Fe ₂ O ₃	1,72	1,44
K ₂ O	1,36	1,04
Kızdırma kaybı	23,37	31,3
Özgül ağırlık, gr/cm ³	2,24	2,08
Özgül yüzey, cm ² /gr	2820	2830
Priz süresi saat. dak		
başlangıç	28, 15	21, 3
bitiş	116, 23	93,17
200µm elekte kalan, %	0,9	0,8
90µm elekte kalan, %	11,3	10,3

Görüleceği üzere kil pestili (KPA) olarak tanımlanan malzeme içerisinde çimentolu hidrolik bağlayıcılar için önemli sayılan silis, alümina ve demir oksit gibi bileşenler mevcuttur. Her ne kadar tras standardı TS 25 ve ASTM C 618’e göre bir malzemenin puzolanik aktivitesi için bu “üç bileşenin malzeme içerisinde en az % 70 olması gerekir” koşulu sağlanmasa da bu bileşenlerin toplam yüzdesinden kil pestili atığının düşük de olsa puzolanik bir özellik taşıdığı açıktır [8,9].

Hazırlanan harç örneklerde kullanılan çimento Eskişehir Çimento Fabrikasının üretmiş olduğu Portland Çimentosu (PÇ 42.5)’dur. Kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 2’ deki gibidir [10, 11].

Tablo 2. Kullanılan Portland çimentosunun (PÇ42.5) özellikleri

Oksit bileşenler, %	Ağırlıkça, %	Fiziksel özellikler	
CaO	63,17	Öz. ağırlık, gr/cm ³	3,08
MgO	1,25	Öz. yüzey, cm ² /gr	3450
SiO ₂	21,24	Basınç dayanımı, MPa	
Al ₂ O ₃	4,96	2 gün	20,2
Fe ₂ O ₃	3,16	7 gün	38,2
Na ₂ O	0,06	28 gün	49,0
K ₂ O	0,50		
SO ₃	2,35	Çekme dayanımı, MPa	
Cl	0,002	2 gün	1,9
Kız. kaybı	2,20	7 gün	3,5
Çöz. kalıntı	1,10	28 gün	6,5
		Priz süresi, saat, dak	
		başlangıç	2,30
		bitiş	3,25
		Hacim gen, mm	3,0

Çalışma öncesi; KPA laboratuvar ortamında 2 ay bekletilerek havada kurutulmuş ve daha sonra etüvde 60 °C 'de 1 saat bekletilerek öğütülmüştür. Öğütülen malzeme 0.0125 mm elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Çalışmalarda TS 24 standardı esas alınarak örnekler hazırlanmış ve biri katkısız diğerleri çimentodan % 1,0; 1,5; 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15; 20 eksiltiyle yerine katkı ilave edilen toplam 9 seri harç örneği üretilmiştir [12]. Çalışmalar 1. ve 2. KPA örnekleri için ayrı ayrı tekrar edilmiştir. Hazırlanan harç (4x4x16)cm boyutlarında prizma şekilli kalıplara dökülmüştür. Her bir deney için 3 adet örnek hazırlanmıştır. Taze harç kalıplara yerleştirildikten sonra harici vibratör ile sıkıştırılmıştır. Hazırlanan örnekler laboratuvar ortamında 24 saat bırakılmış sonra sonunda kalıplardan çıkarılarak 20 ± 1 °C' lik kür havuzuna alınarak 28 gün boyunca kür edilmiştir.

ELDE EDİLEN SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

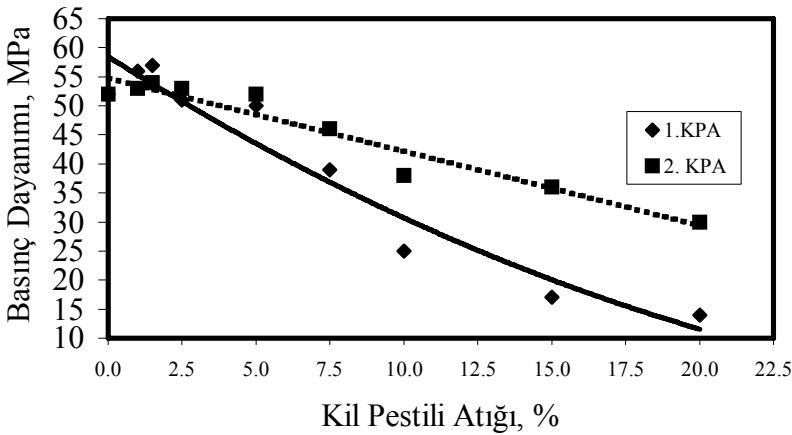
Basınç Dayanımı Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında üretilen örneklerden elde edilen sonuçlar Tablo 3 ve Şekil 1' den görülebilir. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere KPA çimento (dolayısıyla harç ve beton) içerisinde % 2,5 oranında kullanılabilir. Bu oranların üzerinde KPA'nın kullanılması durumunda dayanımda kayıplar meydana gelmekte, atık yüzdesinin artışı ile dayanım

Tablo 3. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları

Kodu	Katkı %	Basınç day., MPa		Çekme day., MPa	
		1. KPA	2. KPA	1. KPA	2. KPA
KPA ₀	0,0	52	52	7,2	7,2
KPA ₁	1,0	56	53	8,1	7,8
KPA _{1,5}	1,5	57	54	8,4	8,0
KPA _{2,5}	2,5	51	53	7,2	7,9
KPA ₅	5,0	50	52	7,0	7,3
KPA _{7,5}	7,5	39	46	6,4	6,9
KPA ₁₀	10	21	38	4,4	6,4
KPA ₁₅	15	17	36	2,1	5,7
KPA ₂₀	20	14	30	-	4,6

1. (-): Deneyde değer elde edilememiştir



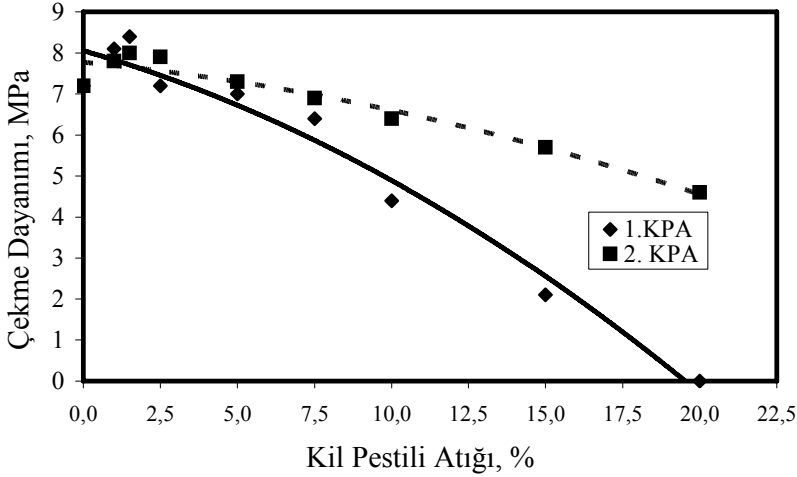
Şekil 1. Basınç dayanımının kil pestili içeriğine göre değişimi.

kayıplarında da artışlar kaydedilmektedir. Bor oksit içeriğinin düşük olduğu 2. kil pestili ile üretilen karışımlarda ise katkı kullanım oranını % 5'lere kadar çıkarmak olasıdır. 2. KPA kullanılarak hazırlanmış örneklerde atık miktarının % 5'ten fazla olması durumlarında bile şahit örneğe göre ortaya çıkan dayanımdaki azalmalar 1. KPA kullanılarak hazırlanmış örneklerle göre daha düşüktür. Bu, daha düşük bor oksit içeriğinden kaynaklanan bir durumdur. Buna karşılık daha yüksek bor içeriğine sahip olan 1. KPA kullanılarak üretilen örneklerin basınç dayanımı, % 1,5 katkı içeriğine kadar şahit ve 2. KPA örneklerinin basınç dayanımlarından daha yüksektir.

Çekme Dayanımı Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Çalışmalar kapsamında üretilen harç numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme dayanımı sonuçları Tablo 3 ve Şekil 2' de verilmiştir. Görüleceği üzere elde edilen çekme dayanımı sonuçları KPA'yı çimento içerisinde % 2,5' lara

kadar, hatta bor içeriğinin düşük olduğu 2. kil pestili atığının kullanıldığı örneklerde % 5'lere kadar değerlendirmek olasıdır. Daha yüksek katkı içeriklerinde artan katkı içeriğine bağlı olarak çekme dayanımında azalmalar meydana gelmektedir. 1. KPA ile üretilen ve düşük katkı içeren (% 1,5'a kadar) numunelerin çekme dayanımı aynı oranda 2. KPA içeren karışım ve şahit örnek sonuçlarına göre daha yüksektir. Elde edilen çekme dayanımı sonuçları basınç dayanımı sonuçlarıyla da uyumludur.



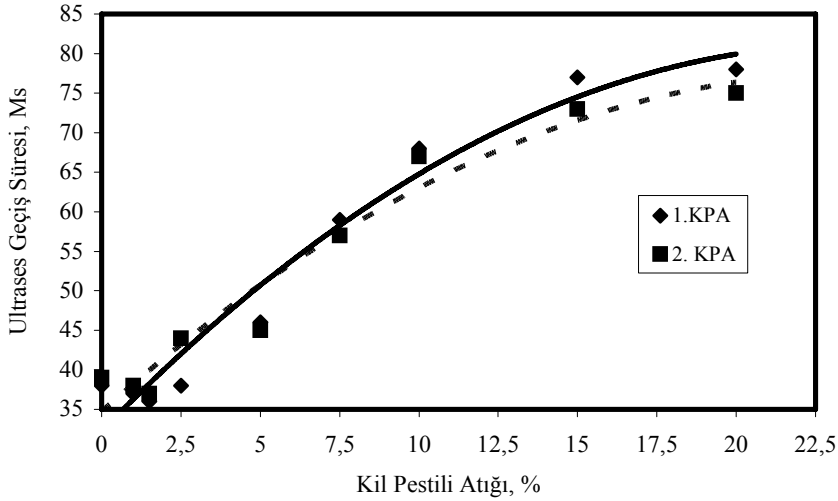
Şekil 2. Çekme dayanımının kil pestili içeriğine göre değişimi.

Ultrases Geçiş Süresi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 4 ve Şekil 3 incelendiğinde, düşük yüzdelerde (% 2,5' a kadar) kil pestili atığı kullanımı ile beton içyapısında herhangi bir kusur oluşmadığı atık oranının yükselmesi ile geçiş süresinin uzadığı tespit edilmiştir. Bu durum büyük olasılıkla birim ağırlık sonuçlarından da görüleceği üzere beton yoğunluğun düşük de olsa azalması ile ilgili bir durumdur. Elde edilen sonuçların basınç ve çekme dayanımı sonuçları ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Tablo 4. Ultrases geçiş hızı ve birim ağırlık deney sonuçları

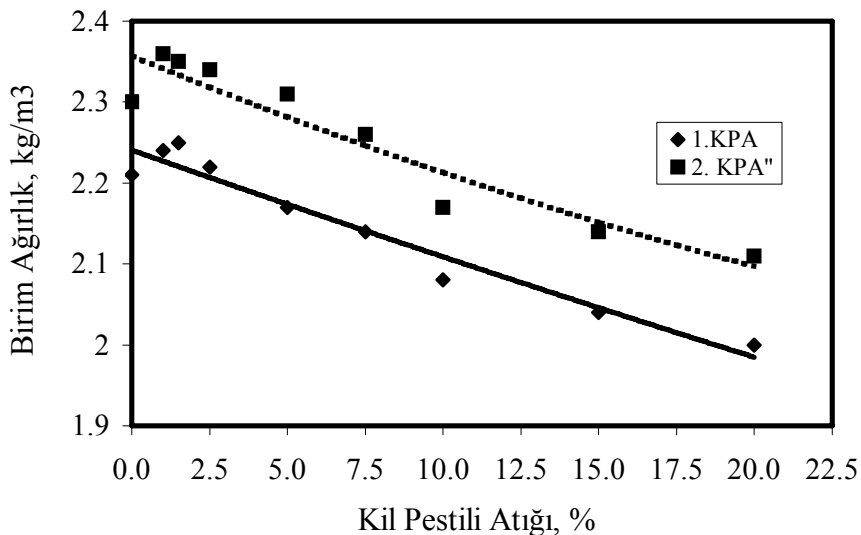
Kodu	Katkı %	Ultrases geç. hızı, μ s		Birim ağı., kg/m^3	
		1. KPA	2. KPA	1. KPA	2. KPA
KPA ₀	0.0	38	39	2.21	2.30
KPA ₁	1.0	37	38	2.24	2.36
KPA _{1,5}	1.5	36	37	2.25	2.35
KPA _{2,5}	2.5	38	44	2.22	2.34
KPA ₅	5.0	46	45	2.17	2.31
KPA _{7,5}	7.5	59	57	2.14	2.26
KPA ₁₀	10	68	67	2.08	2.19
KPA ₁₅	15	73	73	2.04	2.14
KPA ₂₀	20	78	75	2.02	2.10



Şekil 3. Ultrases geçiş hızının kil pestili içeriğine göre değişimi.

Birim Ağırlık Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 4 ile Şekil 4'den görüleceği üzere birim ağırlık deney sonuçları da önceki deney sonuçları ile uyumlu ve aynı eğilimleri gösterir niteliktedir. Burada da her iki KPA'nın % 2,5' lara kadar kullanılması ile birim ağırlıklarda hafif bir artış meydana gelmekte daha yüksek atık içeriklerinde ise hafif azalmalar ortaya çıkmaktadır. 2. KPA kullanılarak elde edilen sonuçlar birim ağırlık açısından 1. KPA ile üretilen örneklerle göre biraz daha yüksektir. Bu durum atığın bor içeriği ile açıklanabilir.



Şekil 4. Birim ağırlığın kil pestili içeriğine göre değişimi.

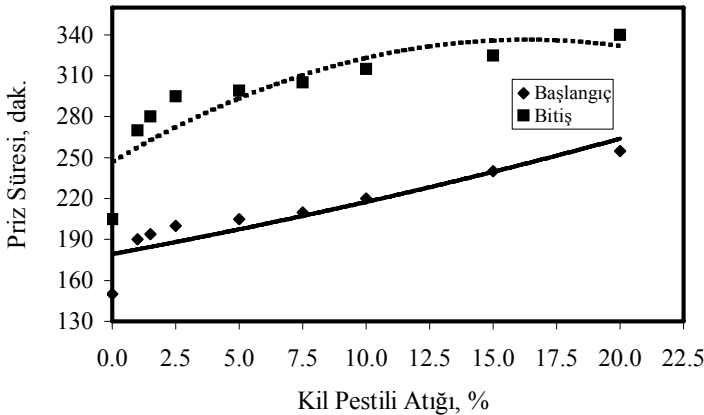
Priz Süresi ve Hacim Genleşmesi Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tablo 1'den görüleceği üzere bor içeren kil pestili atığının priz başlangıç ve bitiş süresi Portland çimentosu için tanımlanan limitlerin çok üzerindedir. Bu nedenle kil pestili atığı ile üretilen harç örneklerinin de priz başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 5, Şekil 5 ve 6'dan görüleceği üzere Portland çimentolarına göre daha uzundur. Bu durum kil pestili içerisindeki bor oksit yüzdesi ile yakından ilgilidir. Hazırlanan harç örneklerdeki katkı miktarının artması ile örneklerin priz süreleri de uzamaktadır. Bu nedenle 1. KPA ile üretilen örneklerin priz süreleri 2. KPA kullanılarak üretilen örneklerle göre daha uzundur.

Tablo 5. Priz süresi ve hacim genleşmesi deney sonuçları

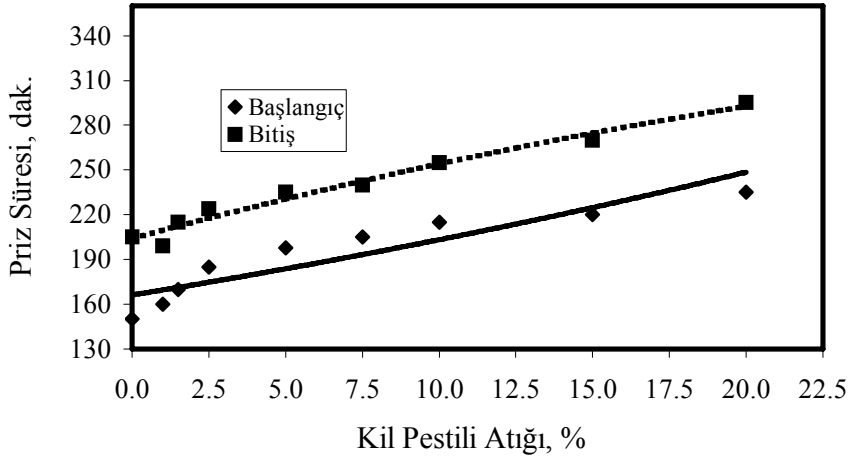
Kodu	Katkı %	Priz süresi, saat. dak				Hacim gen.,mm	
		1. KPA		2. KPA		1.KPA	2.KPA
		baş.	btş.	baş.	btş.		
KPA ₀	0,0	2,30	3,25	2,30	3,25	3	3
KPA ₁	1,0	3,10	4,30	2,40	3,05	3	3
KPA _{1,5}	1,5	3,14	4,40	2,50	3,25	3	3
KPA _{2,5}	2,5	3,20	4,55	3,05	3,44	4	3
KPA ₅	5,0	3,25	4,59	3,18	3,55	4	3
KPA _{7,5}	7,5	3,30	5,05	3,25	4,00	4	3
KPA ₁₀	10	3,40	5,19	3,35	4,15	4	3
KPA ₁₅	15	4,00	5,25	3,40	4,30	3	2
KPA ₂₀	20	4,15	5,40	3,55	4,55	2	2

Tablo 5, Şekil 5 ve 6'dan görüleceği üzere, prizde bir gecikme olmakla birlikte % 2,5 katkı içeriğine kadar priz başlangıcı % 25 – 35, priz sonu ise % 40 – 50 oranında uzamaktadır. Priz süresi gecikmesinin istenmediği durumlarda harç ya da beton içerisine



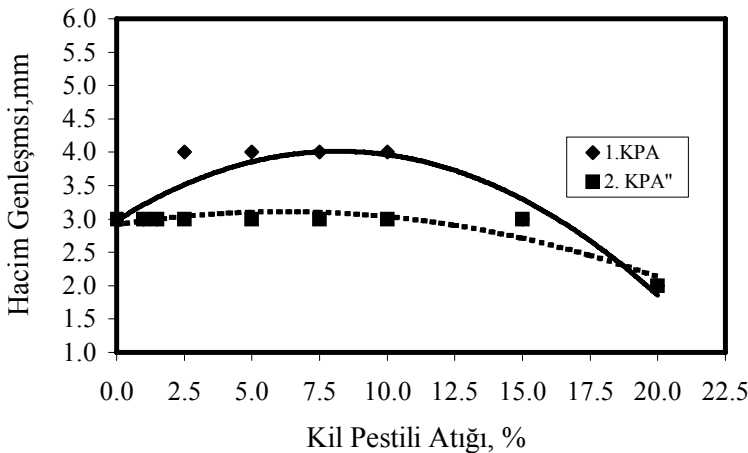
Şekil 5. Priz süresinin 1. KPA içeriğine göre değişimi.

priz hızlandırıcı bir katkı maddesi katılarak bu sorun çözülebilir. Buna karşılık katkılı harç ya da betonların bu özellikleri ile sıcak bölgelerde kullanımı bir avantaj teşkil edebilir. Elde edilen sonuçlar TS 19'a göre değerlendirildiğinde priz başlangıcının geciktiği buna karşılık priz bitiş sürelerinin sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir.



Şekil 6. Priz süresinin 2. KPA içeriğine göre değişimi.

• Kullanılan kil pestili atıklarının herhangi bir hacimsel genişlemeye neden olup olmadığını tespit etmek üzere TS 24'e göre deneyler yapılmış ve sonuçlar Tablo 5 ile Şekil 7'de verilmiştir. Bilindiği üzere çimento içerisinde fazla miktarda serbest kireç (CaO) veya



Şekil 7. Hacim genişmesinin kil pestili içeriğine göre değişimi.

serbest magnezyum oksit (MgO) bulunması hacim genişmesine neden olur. Çalışmalarda kullanılan kil pestili atık malzeme içerisindeki toplam

CaO ve MgO miktarları Portland çimentosundan daha düşüktür. Katkı maddesinin çimento içerisinde düşük yüzdelerde kullanılması gerçeği de göz önüne alındığında yapılan çalışmalarda yüksek ölçüde bir hacim genişmesi gözlenmemiştir. Elde edilen genişleme deneyleri sonuçları TS 19' da belirtilen limitler içerisinde dir.

SONUÇ

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kil pestili olarak adlandırılan boraksız atıkların çimento, harç ve dolayısıyla beton içerisinde değerlendirilebilirliğinin mümkün olduğu anlaşılmıştır. Yeni çimento standartları incelendiğinde; çimento içerisinde çimentonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini olumsuz etkilemeyen her türlü mineral katkı malzemesinin kullanılmasının mümkün olduğu görülmektedir. Bu nedenle kil pestili atıklarının, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi mineral katkılarla birlikte çimento içerisinde yeniden değerlendirilmesinde fayda vardır.

Çalışmayı sonuçları açısından özetlersek;

1. Bor içeren KPA' lı çimento, harç ya da beton içerisinde priz geciktirici bir karakter taşımaktadır. Bu özeliği nedeniyle çimento üretiminde; priz geciktirmek için çimentoya katılan jips yerine de kullanılabilir. Ayrıca, özellikle sıcak bölgelerdeki harç ya da beton uygulamalarında, soğuk derzin önlenemediği durumlarda, betonun uzun süre taşınmasının gerektiği hallerde çimento, harç ya da beton içerisinde KPA' ğı kullanılmasında fayda vardır.
2. Harç içerisine düşük yüzdelerde (% 3) kil pestili atığı katılması sonucu basınç ve çekme dayanımında az da olsa artışlar meydana geldiği görülmüştür. Bor oksit yüzdesi düşük katkıların (2.KPA) kullanımı ile harca katılan katkı miktarı (% 5'lere kadar) artırılabilir. Bu durum teknik yönden daha iyi bir çimento üretimi için doğru bir uygulama olacaktır. Bununla birlikte daha yüksek oranda kil pestili kullanımı da mümkündür. Örneğin 1. KPA % 5 ve 2. KPA'da % 7 oranlarında kullanıldığında çimentonun teknik özellikleri priz süresinin dışında önemli ölçüde değişmemektedir. Buna karşılık çimento ekonomisi bakımından bu oranlarda kil pestili atığı kullanılmasında fayda vardır. Pişirmeden öğütme sırasında klinkere katılması nedeniyle atık katkılı çimentoların üretim maliyeti de daha düşük olacaktır.
3. KPA'larının çimentoda değerlendirilmesi ile harç içyapısında herhangi bir olumsuz durum meydana gelmemiş aksine düşük yüzdelerdeki kullanımı ile ultrases geçiş sürelerinden de görüleceği üzere daha yoğun bir içyapı elde edilmiştir. Bu durum teorik olarak üretilen malzemenin geçirimsizliğini olumlu yönde etkileyecek ve onu durabilite yönünden de güçlendirecektir.

4. Atık malzeme içerisindeki bor oksit miktarının çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu etki, yüksek bor oksit içeriğindeki 1.KPA'nın çok düşük oranda kullanılmasından (%2,5'a kadar) çimento özellikleri olumlu etkilenmektedir. Düşük bor oksit içeriğindeki 2. KPA'nın kullanımında ise yüksek oranda kullanılmasına karşın (% 7' ye kadar) çimento özelliklerini ya hiç etkilenmemekte ya da az da olsa olumlu etkilenmektedir.

KAYNAKLAR

1. Özdemir, M.,Öztürk, N. U., utilization of clay wastes containing boron as cement additives, CRR Journal, 33 (2003), pp 1659-1661
2. Elbeyli, İ.Y., Boraks ve borik asit üretiminde ortaya çıkan katı atıkların çimento sanayinde değerlendirilmesi, YTÜ Yüksek lisans tezi, İstanbul, 2000
3. Ediz, N., Kırka boraks işletmesi atık killerinin tuğla yapımında kullanılabilirliğinin araştırılması, OGÜ Yüksek lisans tezi, Eskişehir , 1994
4. Genç, H., Ayas, A. P.,Yaylı, N, Protecting environment: evaluation techniques for waste – mud produced by boric acid and borax factories, Journal of Qafqaz University, vol 1, number 1 1997
5. Rand, MC., Agnold, E., Micheal, J., Standart methods, American Public Health Association, 14 th Edition, Washington, 1975
6. Boncukcuoğlu, Yılmaz, M. T., Kocakerim, M.M., Tosunoğlu, V., Utilization of trommel sieve waste as an additive in Port. Cem. production, CCR, 32 (2002), pp. 35-39
7. Pınarlı, V., Uğurlu, A., Atıksu arıtım çamuru külünün beton malzemesi olarak kullanılması, Beton Prefabrikasyon, ekim 2000, sayı.56
8. Türk Standartları, Tras, Türk Standartları Enstitüsü (TS 25), Nisan 1975
9. ASTM C 618, fly ash and row or colcined natural puzzolan for use as a mineral admixture in portland cement, Concrete, 1991
10. Türk Standartları, Çimentoların Kimyasal analiz metodları (TS 687), Türk Standartları Enstitüsü,1977
11. Türk Standartları, Portland Çimentoları (TS 19), Türk Standartları Enstitüsü,1984
12. Türk Standartları, Çimentoların fiziki ve mekanik deney metotları (TS 24), Türk Standartları Enstitüsü,, eylül, 1985