

YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETON ÜRETİMİNDE MINERAL KATKI MADDELERİNİN ETKİNLİĞİ

Turan ÖZTURAN
Doç.Dr.
Boğaziçi Üniversitesi
İstanbul, Türkiye

ÖZET

Mineral katkı maddeleri puzolanik özelliklere sahip doğal veya yapay maddeler olup, beton teknolojisinde çeşitli amaçlarla yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Bu amaçlar arasında, öncelikle betonun durabilitesinin iyileştirilmesi ve de nihai mukavemetinin arttırılması gelmektedir. Ayrıca bazı yüksek aktiviteli puzolanlar, yüksek mukavemetli beton üretiminde etkin bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Bildiride önce puzolanların tanımı, sınıflandırılmaları ve betonda kullanım yöntemleri verilmektedir. Daha sonra mineral katkı maddelerinin betonun taze ve sertleşmiş haldeki bazı özellikleriyle, durabilitesine etkileri özetlenmiştir. Son olarak, puzolanların betonun mukavemet kazanma prosedürüne etkinliği ve yüksek mukavemetli betonlarda kullanımı irdelenmiştir.

1.GİRİŞ

Puzolanik özelliklere sahip birçok doğal ve yapay madde çok eski zamanlardan günümüze değin yapım alanında ve beton üretiminde çeşitli amaçlarla kullanılmışlardır. Betonun temel bileşenlerinden olmayan bu maddeler, gelişen beton

teknolojisinde betonun çeşitli fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini değiştirmek ve de üretimde ekonomi sağlamak amaçlarıyla kullanılan bir tür katkı maddeleridirler. Bu nedenle de bu tür puzolanik maddeler mineral katkı maddeleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri Portland çimentosuna benzer mineralojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık yetenekleri yoktur. Bu nedenle, bunlar ikincil bağlayıcı maddeler olarak da anılmaktadırlar. Efektif bir dolgu maddesi fonksiyonu görebilen bu maddeler, puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özellikleri iyileştirilirken; bilhassa puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri, boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını, agrega-hamur arayüzeyindeki aderansın artmasını sağlamakta, ve bunların süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleriyle birlikte kullanımlarıyla beton üretiminde yüksek ($f_c > 65$ MPa) ve çok yüksek ($f_c > 100$ MPa) mukavemetlere erişilmesi mümkün olabilmektedir.

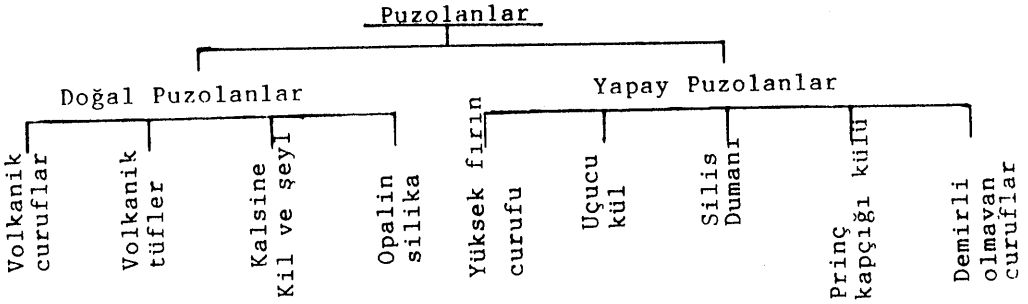
2. PUZOLANİK MADDELER

2.1. Puzolanların Tanımı, Türleri ve Özellikleri

ASTM C618'e göre [1] kendi kendine bağlayıcılık özeliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile kimyasal reaksiyona girip bağlayıcı özeliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denilmektedir. Bu tanıma uyan birçok doğal malzeme bulunduğu gibi, birçok endüstri atığı mineral madde de puzolanik özellikler göstermektedir. Şekil 2.1 de puzolanların sınıflandırılması ve türleri görülmektedir.

Puzolanik maddelerin beton teknolojisinde kullanılabilmesi için bazı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaları gerekmektedir [2]. Kimyasal bileşim, puzolanik

aktivite, incelik (tane boyutu veya özgül yüzey), ısınma kaybı veya karbon miktarı, nem yüzdesi gibi puzolanlarda aranan özellikler, deney yöntemleri ve sınır değerler çeşitli standartlarda belirlendiği gibi, birçok araştırmacının çeşitli puzolanlarda elde ettiği sonuçlar literatürde verilmiştir [2],[3],[4],[5],[6],[7].



Şekil 2.1 Puzolanların sınıflandırılması ve türleri

2.2. Puzolanların Betonda Kullanım Yöntemleri

Mineral katkı maddelerinin beton teknolojisinde kullanım yöntemleri puzolanın türüne göre değişebilmektedir. Doğal puzolanlar çoğunlukla katkılı Portland çimentosu üretiminde kullanılmaktadırlar [2]. Bu tür çimentoların kullanılmasıyla betonda önceden belirlenmiş oranlarda puzolan kullanılmış olmaktadır. Yapay puzolanlardan yüksek fırın cürufu ve uçucu küller beton üretiminde iki yoldan kullanılmaktadırlar [3], [7],[8]. Birinci yöntemde puzolan, belirli oranda uçucu kül veya cüruf içeren, katkılı Portland çimentosu kullanımıyla betona katılmış olur. İkinci yöntemde ise uçucu kül veya ince öğütülmüş cüruf, betona, karıştırma sırasında, çimentoya ilave ya da ikame olarak katılır [4].

3. PUZOLANLARIN BETON ÖZELİKLERİNE ETKİLERİ

3.1. Puzolanların Taze Beton Özelliklerine Etkileri

3.1.1. Priz süreleri

Mineral katkı maddeleri genelde taze betonun priz

sürelerinde geciktirici etki yaparlar. Bu durum bilhassa kış şartlarında beton dökümünde dikkate alınması gereken bir husustur. Ancak yüksek oranda kireç içeren (C-sınıfı) uçucu küller ve silis dumanı ile yapılan bazı araştırmalarda bileşim özelliklerine bağlı olarak priz sürelerinin pek etkilenmediği, hatta hızlandırıcı etki görüldüğü de rapor edilmiştir [3].

3.1.2. Taze betonun su ihtiyacı

Doğal puzolanlar ile silis dumanı sabit işlenebilme için gerekli su ihtiyacını arttırmırlarken, çoğu uçucu küller tersine etki göstermekte ve eşit bağlayıcı hamuru için aynı işlenebilmeyi daha az su ile sağlayabilmektedirler. Ancak karbon miktarı yüksek ve iri taneli küllerde su ihtiyacının yükseldiği de görülmüştür [3].

3.1.3. Taze betonun işlenebilmesi

Doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, ve uçucu küller genellikle katkı yüzdesine ve bileşim özelliklerine bağlı olarak taze betonun işlenebilmesini iyileştirirken, silis dumanı ile taze betonda çökme değerleri azalmakta ve daha kohezif bir karışım elde edilmektedir [4].

3.1.4. Taze betonun diğer özellikleri

Doğal puzolanlar ve silis dumanı ile yapılan çalışmalar, bunların taze betonda terlemeyi azalttığını ortaya koymuşlardır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufunda ise puzolanın özelliklerine bağlı olarak değişik sonuçlar alınabileceği görülmüştür [3],[7]. Buna bağlı olarak puzolanlı betonlarda plastik rötrein artma ihtimali bulunmaktadır. Diğer taraftan hemen tüm puzolanların taze betonda hidrasyon ısısını azalttıkları gözlenmiştir. Hava sürüklenmiş betonlarda, belirli bir hava yüzdesi için gerekli kimyasal katkı miktarı, betonda puzolan kullanılması halinde artış göstermektedir.

3.2. Puzolanların Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri

3.2.1. Basınc mukavemeti

Doğal puzolan veya yüksek fırın cürufu içeren betonların basınc mukavemetleri ilk yaşlarda daha düşük olurken, ileri yaşlarda puzolanın kalitesine ve miktarına bağlı olarak Portland çimentosundan fazla olabilmektedir [2],[7]. F-sınıfı

uçucu küller ilk yaşlarda betonda daha düşük basınç mukavemetleri verirken, C-sınıfı küllerle ilk yaşlardaki mukavemet kazanma hızı daha fazla olmakta ve bu dezavantaj bir ölçüde ortadan kalkmaktadır [3],[8]. Oldukça etkin bir puzolan olan silis dumanı içeren betonlarda ilk yaşlardaki mukavemetler de yüksek değerler alabilmekte ve referans betonun mukavemetlerini geçebilmektedir. Basınç mukavemeti etkinlik faktörü, silis dumanı için 2-5 arasında verilmektedir [4]. Uçucu kül ve/veya silis dumanı ile yüksek hatta çok yüksek basınç mukavemetleri elde etmek de mümkün olmaktadır [9],[10],[11],[12],[13],[14],[15].

3.2.2. Çekme ve eğilme mukavemetleri

Mineral katkı maddelerinin betonun çekme ve eğilme mukavemetlerine olan etkileri, basınç mukavemetine paralellik göstermektedir. Çekme ve eğilme mukavemetlerinin basınç mukavemetiyle olan değişimi de katkısız betonunkinden pek farklı değildir [4],[8].

3.2.3. Diğer mekanik özellikler

Puzolanik maddeler betonun elastik özellikleri üzerinde önemli bir etki yapmamaktadırlar [3],[4]. Elastisite modülü genellikle ilk yaşlarda biraz düşük, geç yaşlarda ise biraz yüksek olmaktadır [8]. Silis dumanı içeren betonların daha kırılğan oldukları da belirtilmektedir [4]. Puzolanların genellikle çimento hamuru-agrega ve beton-donatı aderansını arttırdığı ileri sürülmektedir [4],[7].

Doğal puzolan katkılı çimentolarla yapılan betonlarda rötre daha fazla olmaktadır [2]. Diğer taraftan uçucu küllerin betonda hidrolik rötreyi pek fazla etkilemediği belirtilmiştir [3]. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufu kullanımında ise betonda hidrolik rötre artmaktadır [4],[7]. Puzolanların betonun sünmesine etkileri üzerine yeterli sayıda çalışma bulunmadığı ve az sayıdaki çalışmalardan da çelişkili sonuçlar elde edildiği belirtilmektedir [3],[4],[7].

3.3. Puzolanların Betonun Durabilitesine Etkileri

3.3.1. Geçirimsizlik

Hemen tüm puzolanlar betonda sıvı geçirimsizliğini arttırmaktadırlar [2],[3],[4],[7],[16]. Etkin bir dolgu maddesi olarak davranması ve puzolanik etki sonucu, çimento

hamurunun boşluk yapısının değişmesi nedeniyle betonda geçirimsizlik artmaktadır.

3.2.2. Donmaya dayanıklılık

Puzolanların betonun donmaya dayanıklılığına etkisi büyük çoğunlukla bu maddelerin çimento hamurundaki sürüklenmiş hava sistemine etkisine bağlı olmaktadır [2],[3],[8],[11],[16]. Puzolanlar genellikle hava sürükleyici katkı miktarında artışa neden olmalarına rağmen, hava sürüklenmiş puzolanlı betonların donma-çözülme tekrarlarına dayanımları oldukça iyidir.

3.3.3. Sülfat etkisine dayanıklılık

Puzolanik reaksiyon sonucu serbest kirecin bağlanması nedeniyle tüm puzolanlar betonun sülfata dayanıklılığını arttırmaktadırlar [2],[3],[4],[16]. %45 ile %72 arasında yüksek fırın cürufu içeren betonların 10 yıl süreyle sülfat etkisine maruz kalmalarına rağmen zarar görmedikleri gözlenmiştir [17].

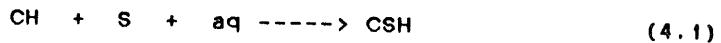
3.3.4. Alkali-agrega reaktivitesi

Alkali-agrega reaktivitesine dayanıklılığın artmasında doğal puzolanların, mineral atıklardan daha etkili oldukları ileri sürülmektedir [2]. Ancak genelde tüm puzolanlar alkali-agrega reaksiyonundan dolayı betonda oluşan genleşme ve çatlamaları azaltmaktadırlar. Çimento hamurundaki alkali konsantrasyonu puzolan tarafından azaltılmakta ve böylece zararlı reaksiyon riski azalmaktadır [4],[8].

4. PUZOLANLARIN BETON MUKAVEMETİNE ETKİNLİĞİ

4.1. Puzolanik Reaksiyon

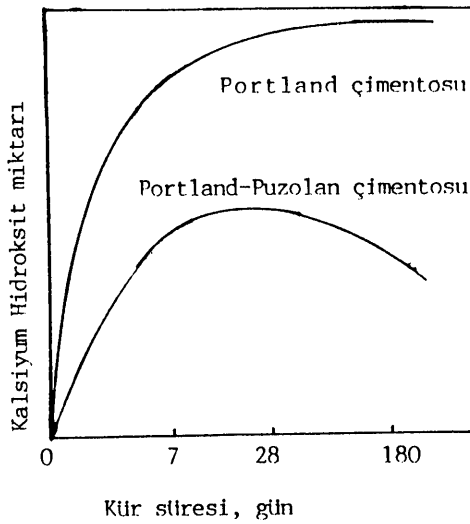
Puzolan içeren betonlarda temel puzolanik reaksiyon, puzolandaki silika (S) ile Portland çimentosu hidratasyonu sonucu açığa çıkan serbest kireç (CH) arasında sulu ortamda aşağıdaki gibi olmaktadır.



(4.1) denkleminde gösterilen puzolanik reaksiyon sonucu Portland çimentosunun silikatlı bileşenleri ile aynı hidrate

ürünler açığa çıkmaktadır. Ancak, bu reaksiyonun hem serbest kireç oluşumunu beklemesi, hem de oldukça yavaş seyreden bir reaksiyon olması sonucu puzolanik etki nedeniyle mukavemet kazanma da yavaş olmaktadır. Kür sıcaklığının artması ve alkali ve sülfatlı bazı kimyasal katkı maddelerinin varlığı ise reaksiyonu hızlandırabilmektedir.

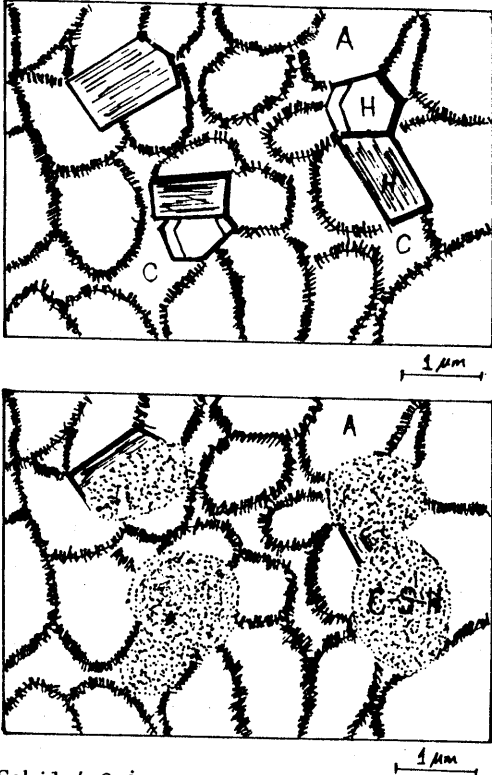
(4.1) denklemindeki temel puzolanik reaksiyonun yanında, serbest kireç ile puzolandaki alümin ve demir oksitlerin reaksiyonları sonucu hidratasyon ürünleri de oluşmaktadır. Böylece, Portland çimentosu hidratasyon reaksiyonu ile puzolanik reaksiyon arasında hem açığa çıkan ürünlerin kompozisyonu hem de reaksiyonların hızı açısından farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 4.1 Puzolan-Portland çimento karışımlarının Hidratasyonunda serbest kireç miktarının değişimi (Ref.2)

Puzolan ve Portland çimentosu karışımı hidratasyona girince puzolanik reaksiyonun etkisiyle bağlayıcı hamurundaki serbest kireç miktarı giderek azalmaktadır (Şekil 4.1). Buna göre belirli bir süre sonunda puzolan içeren betonların çimento hamurunda, Portland çimentosu hamuruna oranla daha az serbest kireç ve daha çok kalsiyum silikat hidrate elemanları bulunmaktadır. Daha çok bağlayıcı ürün oluşması mukavemet

artısına neden olurken, serbest kirecin azalması ve hamur boşluk yapısının iyileştirilmesi (Şekil 4.2 ve 4.3) geçirimsizliği ve dolayısıyla zararlı dış etkilere dayanıklılığı arttırmaktadır.

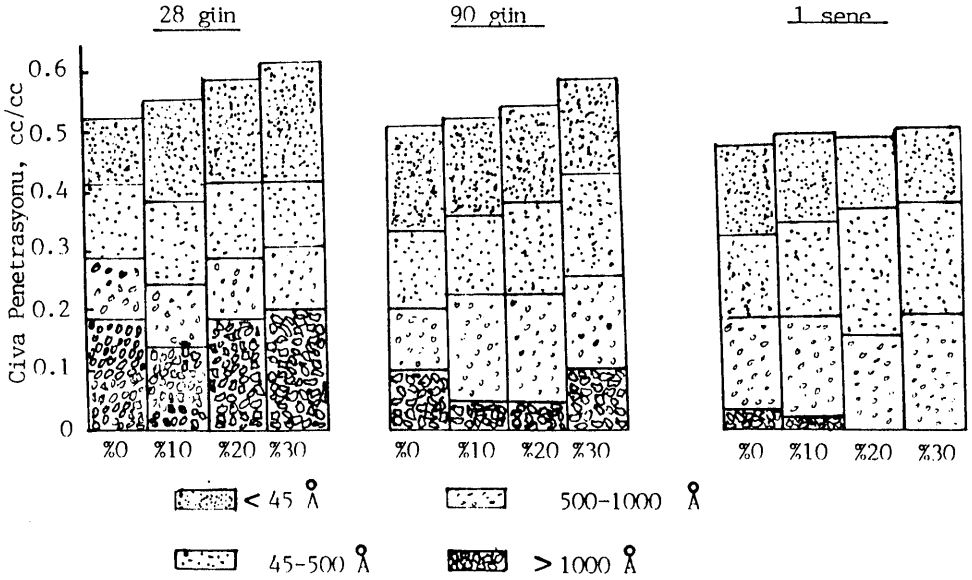


- A. İyi kristalize olmamış C-S-H partikülleri
- H. Heksagonal kristal CH
- C. Su ile dolu Kapiler ve büyük boşluklar

$CH + S \rightarrow C-S-H$ (Düşük yoğunluklu). Pozolanik reaksiyon yoğun CH fazını ve büyük boşlukları düşük yoğunluklu C-S-H elemanlarına ve küçük boşluklara dönüştürür.

Şekil 4.2 İyi Hidrate olmuş Portland çimento ve Pozolan-Portland çimento karışımlarında çimento hamuru yapısının karşılaştırılması (Ref. 2)

Ayrıca pozolanik reaksiyon sonucu oluşan kalsiyum silikat hidratlarında C/S oranı daha düşük olmaktadır. Normal Portland çimentosu hidratasyonu sonucu oluşan CSH elemanlarında bu oran 1.2-1.68 arasında değişirken, kalsine kaolin ile kireç reaksiyonu sonucu oluşan ürünlerde 0.8-1.5 arasında [2], Portland çimentosu ile silis dumanı karışımlarında 0.9-1.3 arasında, yüksek oranda silis dumanı içeren betonlarda ise 0.7'nin altında olabilmektedir [4]. Pozolanların, betonun zararlı kimyasallara dayanıklılığını arttırması ve alkali-agrega reaksiyonundan zarar görme riskini azaltması bu faktöre bağlanmaktadır.



Şekil 4.3 Çeşitli oranlarda Doğal Pozzolan içeren Hidrate çimento hamurlarında boşluk boyutu dağılımı (Ref.2)

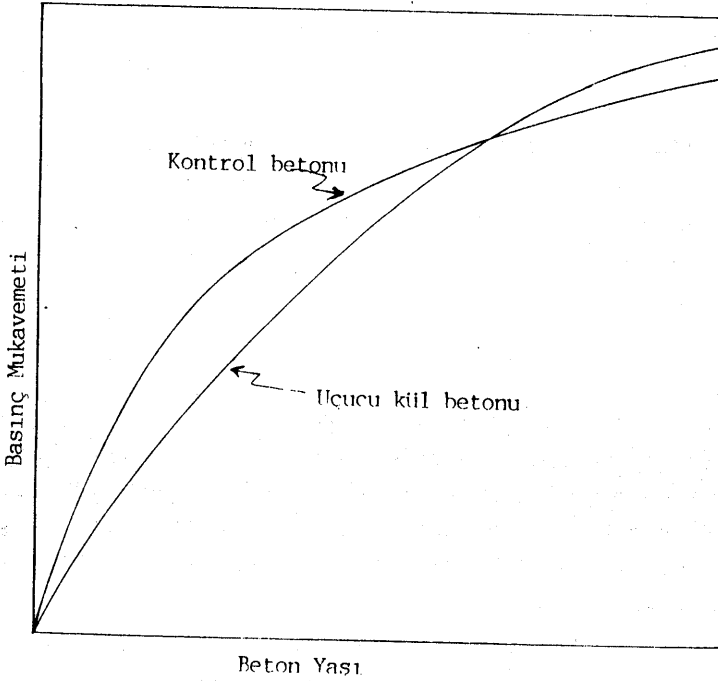
Diğer taraftan silis dumanı içeren betonlarda bağlayıcı hamur çok yoğun ve amorf bir mikroyapıya sahip olmaktadır ve bu yoğun yapı agrega-hamur arayüzeyinde de görülmektedir [4]. Böylece agrega-hamur arayüzeyindeki 40-50 mikron boyutundaki boşluklu yapı yerine yoğun bir hamur yapısı elde edilmekte ve yüksek oranda silis dumanı içeren yüksek mukavemetli betonlarda bu durum gözlenmektedir. İyileştirilmiş arayüzey özellikleri de beton mukavemetinin artışında önemli bir etken olmaktadır.

4.2. Mukavemet Kazanma Hızı

Pozzolanik reaksiyonun, Portland çimentosu hidratasyonundan daha yavaş gelişmesi pozzolanlı betonların mukavemet kazanma hızlarını da etkilemektedir. Genelde bu tür betonlarda ilk yaşlardaki mukavemetler daha düşük olmakta, ancak pozzolanların aktivitesinin yüksekliğine göre 28, 56 veya 90 gün sonraki mukavemetler referans betonunu yakalamakta veya geçmektedir (Şekil 4.4).

Ancak yüksek oranda kireç ($\text{CaO} \geq 30$) içeren C-sınıfı uçucu küllerle yapılan deneyler sonucu mukavemet kazanma hızlarının referans betonuyla hemen hemen aynı olduğu

söylenmektedir [3]. 20°C sıcaklıkta kür edilen silis dumanı betonlarında, puzolanın betonda mukavemet kazanma hızına en çok 3 ile 28 günleri arasında katkıda bulunduğu ileri sürülmektedir [4]. Bu puzolanların, betonun basınç mukavemetine bu erken yaşlardaki katkısı, hem ilk mukavemetlerin hem de 28 veya 56. günlerdeki mukavemetlerin çok yüksek olabilmesine imkan verebilmektedir.



Şekil 4.4 Portland çimento betonları ve Puzolanlı betonların mukavemetinin zamanla artışı (Ref.3)

4.3. Yüksek Basınç Mukavemeti

Silis dumanı ve puzolanik aktivitesi yüksek diğer bazı puzolanlar, ve kendi kendine bağlayıcılık özeliği gösterebilen C-sınıfı uçucu küllerle, puzolanın miktarına, kullanım yöntemine ve betonun bileşim özelliklerine (çimento miktarı ve su-çimento oranı gibi) bağlı olarak erken ve nihai mukavemetleri arttırmak mümkün olmaktadır.

Yüksek mukavemetli betonları 35-70 MPa arası, 70-100 MPa arası ve 100 MPa'dan yüksek basınç mukavemetlerine sahip betonlar olarak sınıflamak mümkündür [3]. Kuzey Amerika'da

70-120 MPa arası basınç mukavemetlerine sahip, şantiyede yerleştirilebilir betonlar üretilmektedir [9],[19]. Chicago civarında 62 MPa ve daha yüksek mukavemetli betonlar yaygın olarak bina inşaatlarında kullanılmaktadır [13],[18]. Avustralya ve Kuzey Avrupa'da da 80 MPa'ın üzerinde basınç mukavemetli betonlar üretilmekte ve yüksek yapılarda veya açık deniz platformlarında kullanılmaktadır [12],[15],[20].

Yüksek mukavemetli beton uygulamalarının hemen hepsinde yüksek aktiviteli C-sınıfı uçucu küller veya silis dumanı kullanılmış olup, bazılarında ise bu iki puzolan birlikte kullanılmıştır [9],[12],[13],[18],[21],[22],[23]. Puzolanların taze betonda su ihtiyacını arttırdıkları hususu ve de yüksek mukavemet için gerekli çok düşük su-çimento oranlarını ($W/C=0.25-0.35$) işlenebilir kıvamlarda sağlamak gereği gözönünde tutulduğunda, hemen tüm bu betonlarda neden süperakışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanıldığı daha iyi anlaşılmaktadır.

5.SONUÇ

Mineral katkı maddeleri puzolanik özelliklere sahip doğal veya yapay maddelerdir. Beton teknolojisinde, çimento ile önceden karıştırılmış olarak veya beton üretimi sırasında çimentoya ilaveten veya bir kısım çimentonun yerine kullanılmaktadırlar. Kullanım amaçları arasında beton teknolojisinde enerji tasarrufu sağlamak ve betona taze ve sertleşmiş halde bazı yeni özellikler kazandırmak veya bazı özellikleri iyileştirmek bulunmaktadır. Etkinlikleri, puzolanın mineralojik ve kimyasal yapısına, aktivitesine, kullanılma miktarına ve beton bileşim özelliklerine bağlı olmaktadır.

Puzolanlar serbest kireci bağlayarak, C/S oranı daha düşük kalsiyum silikat hidrate elemanları açığa çıkarmakta ve bağlayıcı ürünlerin miktarını arttırmaktadırlar. Aynı zamanda çimento hamuru boşluk yapısı iyileştirilmekte ve hamurda daha yoğun bir mikroyapı oluşturulmaktadır. Bu faktörlerin etkisiyle, mineral katkı maddeleri ileri yaşlardaki mukavemetlerde, puzolan yerine çimento kullanılmasıyla

getirilecek katkıdan, daha fazla artış yapmakta ve ayrıca durabilite özelliklerini ve özellikle kimyasal etkilere dayanıklılığı oldukça arttırmaktadırlar. Yüksek miktarda CaO içeren C-sınıfı uçucu külle ile silis dumanı ise betonda ilk yaşlardaki mukavemetleri de arttırmakta ve oldukça yüksek nihai mukavemetler verebilmektedir. Bu puzolanların süperakışkanlaştırıcılar ile kullanımıyla santiyede yerleştirilebilir kıvamda ve yüksek mukavemetli ($f_c > 65$ MPa) betonlar üretilmesi yolunda çığır açılmıştır.

KAYNAKLAR

1. ASTM C618-78, "Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use As a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete", 1978.
2. Mehta, P.K., "Natural Pozzolans", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.1-33, 1987.
3. Berry, E.E., and Malhotra, V.M., "Fly Ash in Concrete", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.35-163, 1987.
4. Sellevold, E.J., and Nilsen, T., "Condensed Silica Fume: A World Review", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.165-243, 1987.
5. Hooton, R.D., "The Reactivity & Hydration Products of Blast Furnace Slag", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.245-288, 1987.
6. Douglas, E., and Malhotra, V.M., "A Review of the Properties and Strength Development of Non-Ferrous Slags-Portland Cement Binders", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.371-428, 1987.
7. Malhotra, V.M., "Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Ground Granulated, Blast Furnace Slag" in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.289-334, 1987.
8. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete", ACI Materials Journal, pp.381-409, 1987.

9. Randall, V., and Foot, K., "High Strength Concrete For Pacific First Center", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, No.4, pp.14-16, April 1989.
10. Rosenberg, A.M., and Gaidis, J.M., "A New Mineral Admixture for High-Strength Concrete", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, NO.4, pp.31-36, April 1989.
11. Cohen, M.D., and Olek, J., "Silica Fume in PCC: The Effects of Form on Engineering Performance", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, No.11, pp.43-47, Nov.1989.
12. Ronneberg, H., and Sandvik, M., "High Strength Concrete for North Sea Platforms", Concrete International: Design and Construction, Vol.12, No.1, pp.29-34, Jan.1990.
13. Moreno, J., "225 W. Wacker Drive", Concrete International: Design and Construction, Vol.12, No.1, pp.35-39, Jan.1990.
14. Sivasundaram, V., Carette, G.G., and Malhotra, V.M., "Selected Properties of High Volume Fly Ash Concretes", Concrete International, Vol.12, No.10, pp.47-50, Oct.1990.
15. Hwee, Y.S., and Rangan, B.V., "Studies on Commercial High Strength Concretes", ACI Materials Journal, Vol.87, No.5, pp.440-445, Sept-Oct. 1990.
16. Douglas, E., "Blast Furnace Slag Cement Mortar and Concrete: Durability Aspects", in Supplementary Cementing Materials for Concrete, ACI Special Publication SP86-8E, pp.335-369, 1987.
17. Hooton, R.D., and Emery, J.J., "Sulfate Resistance of a Canadian Slag Cement", ACI Materials Journal, Vol.87, No.6, pp.547-555, Nov.-Dec. 1990.
18. Page, M.K., "Pumping High Strength Concrete on World's Tallest Concrete Building", Concrete International: Design and Construction, Vol.12, No.1, pp.26-28, Jan.1990.
19. Leatham, D.M., and Howard, N.L., "The Production and Delivery of High Strength Concrete", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, No.4, pp.26-30, Apr. 1989.
20. Burnett, I., "High Strength Concrete in Melbourne, Australia", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, No.4, pp.17-25, Apr. 1989.
21. Giraldi, A., "High Strength Concrete in Washington D.C.", Concrete International: Design and Construction, Vol.11, No.3, pp.52-55, March 1989.

22. Colaco, J.P., "75-Story Texas Commerce Plaza, Houston-the Use of High Strength Concrete", in High Strength Concrete, ACI Special Publication SP87-1, pp.1-8, 1985.
23. Drake, K.D., "High Strength Concrete in Seattle", in High Strength Concrete, ACI Special Publication SP87-1, pp.21-34, 1985.