

Sürdürülebilirlik - Beton İnovasyonundaki Öncü Rolü*

H. Justnes ⁽¹⁾ and T. A. Martius-Hammer ⁽¹⁾

Çeviren: İnş.Yük.Müh. Yasin Engin

Özet

Çimento üretimi dünya çapında insan kaynaklı karbondioksit (CO₂) oluşumuna etkide 3. sırada yer almaktadır. Bu nedenle, daha inovatif (yenilikçi) ve sürdürülebilir beton üretmek için aşağıda belirtilen bir veya birden fazla yolu izlemek gerekmektedir:

1. Beton içerisindeki çimentoyu genel kullanımdan daha fazla ikincil bağlayıcı malzeme (mineral katkı) ile yer değiştirmek,
2. Beton içerisindeki çimentoyu mineral katkı kombinasyonları ile yer değiştirerek betonun dayanım ve dayanıklılığını iyileştirmek,
3. Su azaltıcı katkı kullanımı ile beton içerisindeki çimento miktarını azaltmak,
4. Uzak mesafeden reaktif olmayan agrega yerine uygun bağlayıcı kombinasyonları kullanarak yakın kaynaktan alkali silika reaksiyonuna bile duyarlı agrega kullanmak,
5. Kaynağı yakın (yerel) kırma taş agrega ile beton üretmek.

1. Giriş

Toplumda sürdürülebilirlik konusu üzerindeki güncel odaklanma, artan talepler ve yaşam süresi, azalan kaynak ve enerji tüketimi, düşen CO₂ emisyonu ve giderek iyileşen verimlilik inşaat sektörünün daha yenilikçi bir anlayışa geçmesini zorlayan bir güç olarak öne çıkmaktadır. Bu tanım ayrıca COIN - Norveç Beton İnovasyon Merkezi'nin (www.coinweb.no) misyonunun da temel dayanağıdır.

Beton ile ilgili olarak; çimento üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonu, üzerinde durulması gereken en önemli gündemdir. Çimento sektörü, dünya çapında toplam antropojenik (insan kaynaklı) CO₂ emisyonunun yaklaşık % 5-8'inden sorumludur. Eğer üretimde fosil yakıt kullanılmışsa ve herhangi iyileştirici bir yöntem uygulanmadıysa 1 ton klinker üretimi sonucu 1 ton CO₂ emisyonu açığa çıktığı genel olarak kabul edilir. Çimento endüstrisinin insan kaynaklı CO₂ emisyonu oluşumunda 3. sırada yer alması çimentonun çevresel açıdan kötü bir malzeme olduğunu göstermez. Bu derecenin esas nedeni tüm dünyada alt ve

Sustainability - A Driver for Concrete Innovation

Production of cement is ranking 3rd in causes of man-made carbon dioxide emissions worldwide. Thus, in order to make concrete more sustainable concrete innovation should move along one or more of the following routes;

- 1) Replacing cement in concrete with larger amounts of supplementary cementing materials (SCMs) than usual, 2) Replacing cement in concrete with combinations of SCMs leading to synergic reactions enhancing strength, 3) Producing leaner concrete with less cement per cubic meter utilizing plasticizers, 4) Making concrete with local aggregate susceptible to alkali silica reaction (ASR) by using cement replacements, thus avoiding long transport of non-reactive aggregate, and 5) Making concrete with local aggregate manufactured from crushed rock.

(*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen 17. ERMCO Kongresi'nde sunulmuştur.

(1) SINTEF Building and Infrastructure, Trondheim, Norway

üst yapı inşaatlarında betonun çok geniş bir alanda ve büyük hacimde kullanılmasıdır. Beton aslında çevre dostu yapı malzemeleri arasında yer almaktadır. Bileşimi genel olarak yaklaşık 1 birim çimento, 0.5 birim su ve 5-6 birim ince ve iri agregadan oluşmaktadır. 2013 yılında dünya çimento üretimi yaklaşık 4 milyar ton olarak gerçekleşmiştir. Bu da yaklaşık 24 milyar ton betona ya da 10 milyar m³ betona denk gelmektedir. Bu miktardaki beton ile dünyadan aya ve aydan dünyaya 20 cm çapında silindirik bir beton eleman yapılabilir ya da 1 km² taban alanında ve 10 km yüksekliğinde (Everest Dağı 8848 m) beton bir blok yapılabilir.

Küresel karbon ayak izini düşürmek için çimento üreticileri kömür gibi fosil yakıtlar yerine kalorifik değeri yakın ya da denk alternatif yakıtlar ve atıklar kullanmakta, ayrıca klinker oranı azaltılıp ikincil bağlayıcı malzemeler (mineral katkıları) kullanarak katkılı çimento üretmektedir. Ancak; çimento çok geniş bir alana yayılmış uygulamalara yönelik olan, farklı müşteri gruplarına arz edilen ve belirli standartları sağlamak zorunda olan bir üründür. Bu nedenle yapılacak iyileştirmeler de belirli limitler dahilinde olmaktadır.

Öte yandan beton, performans kriterleri önceden belirlenmiş nihai bir üründür ve uygulamalara bağlı olarak sürdürülebilir özelliği iyileştirilebilir. Bu yazı potansiyel iyileştirmelere ve zorluklara aşağıda belirtilen hususlar kapsamında yer vermektedir:

- Beton içerisindeki çimentoyu daha fazla mineral katkı ile yer değiştirmek, ayrıca kalsine marn gibi az uygulanan malzemeler kullanmak,
- Beton içerisindeki çimentoyu mineral katkı kombinasyonları ile yer değiştirerek betonun dayanım ve dayanıklılığını iyileştirmek,
- Su azaltıcı katkı kullanımı ile beton içerisindeki çimento miktarını azaltmak,
- Uzak mesafeden reaktif olmayan agrega yerine uygun bağlayıcı kombinasyonları kullanarak yakın kaynaktan alkali silika reaksiyonuna bile duyarlı agrega kullanmak,
- Kaynağı yakın (yerel) kırma taş agrega ile beton üretmek.

Sürdürülebilir beton üretimi ile ilgili aşağıda belirtilen diğer hususlar bu yazıda ele alınmamaktadır:

- Betonarme yapı yıkıntılarından elde edilen geri dönüşümlü agrega ile beton üretilmesi,
- Daha az bakıma ihtiyaç duyan ve daha uzun servis ömrü olan dayanıklı beton üretmek,
- Yüksek dayanımlı beton ile daha narin yapılar yapmak (birim beton hacminde daha fazla çimento kullanılsa da toplam beton hacmi düşük olmaktadır),

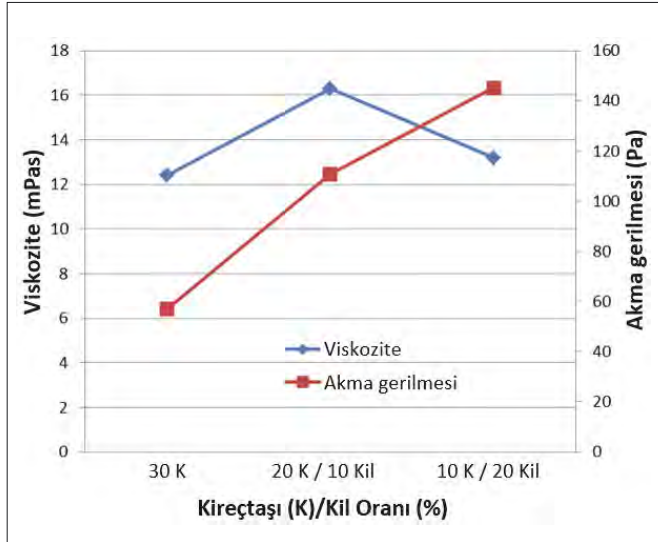
- Betonun ısı kapasitesi sayesinde ofis ve evlerde ısıtma/soğutmada daha az enerji sarfıyatı sağlamak,
- Klasik donatı yerine lifler (fibers) kullanmak,
- Hafif agrega kullanmak,
- Kendiliğinden yerleşen (sıkışan) beton kullanmak.

2. Yüksek Oranda Mineral Katkı İçeren Beton

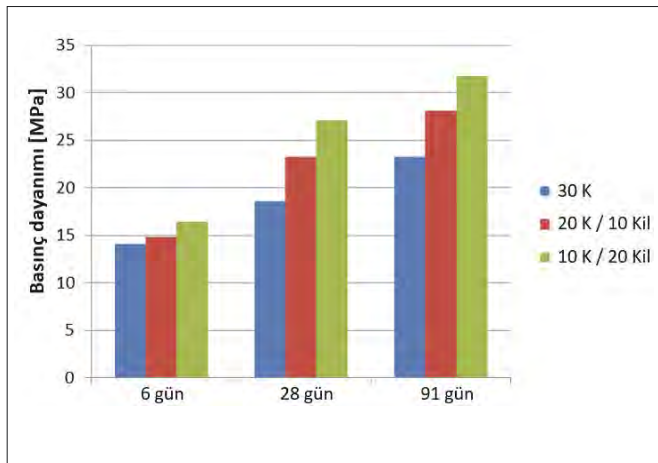
Çimento ve beton üretimi sonucu açığa çıkan CO₂ emisyonunu en hızlı ve en etkili şekilde azaltacak yöntemler beton içerisindeki çimentonun bir kısmını mineral katkı ile yer değiştirmek veya klinkerin bir kısmının mineral katkı ile yer değiştirdiği katkılı çimento kullanmaktır. Gizli hidrolik özelliği olan öğütülmüş yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi kalsiyum hidroksit ile tepkimeye giren puzolanlar en tipik mineral katkı örnekleridir. Kireçtaşı tozu özellikle kendiliğinden yerleşen betonlarda dolgu (filler) malzemesi olarak kullanılabilir.

Avrupa'da öğütülmüş yüksek fırın cürufu yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Uçucu kül kullanımında ise belli bölgelerde temin sıkıntısı yaşanmaktadır. Diğer puzolanlar düşük miktarlarda kullanılmaktadır, ama genelde silis dumanı, piring kabuğu külü ve metakaolinle kombine edilerek (birlikte) kullanılabilir. Ancak, silis dumanı, piring kabuğu külü ve metakaolin gibi puzolanik malzemeler pazarda yeterli miktarda bulunmamaktadır. Ayrıca, kapasiteleri oranında CO₂ emisyonunu düşürmek için gerekli miktarda kullanımları pahalı olmaları nedeniyle pek mümkün olmamaktadır. Bu nedenle yeterli kaynağa sahip ve gün yüzüne pek çıkmamış malzemeler araştırılmış ve kalkers kil veya marnın (tuğla ve hafif agrega endüstrisinde kullanımı uygun olmayan) bu yönünde potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir. Mavi kil miktar olarak fazla bulunduğu için uygun bir seçenek olabilmektedir. Hem kil hem de marn puzolanik özelliğe sahip olmaları için 750-850 °C'de kalsine edilmek zorundadır. Deniz kökenli killeri klorür içerdiği için donatı içeren betonlarda kullanım öncesinde kontrol edilmelidir.

Justnes ve arkadaşları [1] kendiliğinden yerleşen (sıkışan) betonda kireçtaşı tozu (dolgu malzemesi) yerine dengeleyici olarak kalsine kil kullanımını test etmiştir. Figür 1'de görülebileceği gibi kil miktarının artması viskoziteyi göreceli olarak sabit tutarken akma gerilmesini artırmaktadır. Buna ek olarak, Figür 2'de görüleceği gibi tüm test zamanlarında kil oranının artması basınç dayanımını artırmaktadır. Başlangıçta hacimsel olarak %30 oranında kireçtaşı tozu (dolgu malzemesi) kullanılmış, daha sonra ise bu miktar 1/3 ve 2/3 oranında kalsine kil ile yer değiştirmiştir.

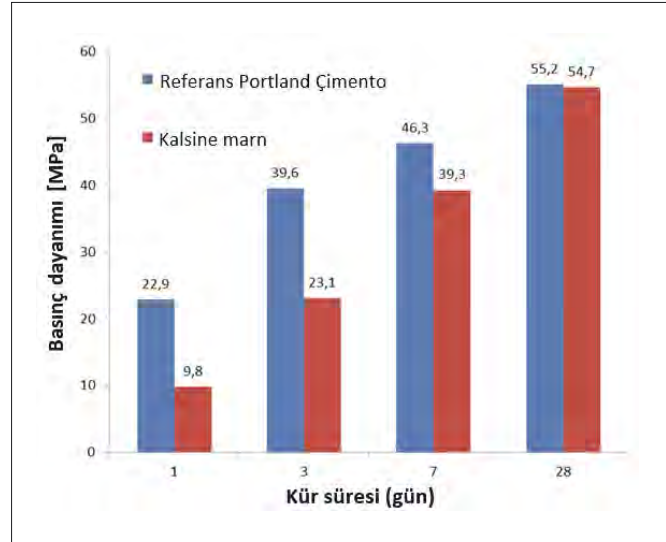


Figür 1: Farklı oranlarda kireçtaşı tozu (K) ve kalsine kil (Kil) içeren kendiliğinden yerleşen betonun viskozite ve akma gerilmesi (Justnes ve arkadaşları [1])



Figür 2: Farklı oranlarda kireçtaşı tozu (K) ve kalsine kil (Kil) içeren kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanım gelişimi (Justnes ve arkadaşları [1])

Justnes ve arkadaşları [2] tarafından kalsine marnın etkili bir puzolan olduğunu gösteren bir çalışma yayınlanmıştır. Pilot ölçekli bir fırında kalsine edilen marn, %50 oranında çimento ile yer değiştirilerek harç üretiminde kullanılmıştır. Bu harcın basınç dayanımının kür yaşına göre fonksiyonu Figür 3'te gösterilmiştir. 28 gün sonunda referans beton ile aynı basınç dayanımı elde edilmiştir ve 1 günde kalıptan almak için (20 °C / %90 nem koşullarındaki kür ortamı) gerekli basınç dayanımı (≈ 10 MPa) sağlanmıştır.



Figür 3: 1, 3, 7 ve 28 gün küre tabi tutulan % 0 (referans) ve % 50 oranında kalsine marn içeren harçların basınç dayanımı [2].

Bir miktar çimento yerin tam ölçekli (endüstriyel) döner fırında kalsine edilmiş marn kullanılarak üretilen harcın basınç dayanımının yer değiştirme oranına göre (%65'e kadar) ve yaşa göre (2 yıla kadar) fonksiyonunu içeren çalışma Justnes ve Østnor [3] tarafından yayınlanmıştır. Bu çalışmada harçların hem dürabilite özellikleri hem de mikro yapıları incelenmiştir.

Çimento yerine yüksek oranda ikincil bağlayıcı malzeme kullanımı durumunda verimliliği ve inşaat ilerleme hızını sağlamak için gerekli olan betonun erken dayanımı, çeşitli yöntemlerle iyileştirilmelidir. Bu iyileştirme kimyasal ya da mekanik etkinleştirme (aktive etme) ile sağlanabilmektedir. Hoang [4] tarafından yapılan çalışma; bağlayıcı kütlelerinin %0.35'i oranında üçlü (ternary) hızlandırıcı kullanımının basınç dayanımını aşağıdaki şekilde etkilediğini göstermiştir:

- 5°C'de 2 gün sonra %30 uçucu kül içeren harcın basınç dayanımında %60 oranında artış,
- 20°C'de 1 gün sonra %30 uçucu kül içeren harcın basınç dayanımında %30 oranında artış mümkün olmaktadır.

3. Üçlü Bağlayıcı Sistemli Beton

Kireçtaşı veya diğer bir adıyla kalker yaygın olarak temin edilebilen bir doğal kaynaktır. Kireçtaşı klinker üretiminde hammadde olarak ve çimento veya beton içeriğinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kömür kullanan termik santrallerden temin edilen uçucu kül, Çin ve Hindistan başta olmak üzere birçok ülkede bol miktarda bulunmaktadır. Uçucu kül ve kireçtaşının (öğütülmüş) birlikte kullanılması ile ortaya çıkan kimyasal sinerji sonucu basınç dayanımı artış göstermektedir. Kireçtaşı ve silis-

si uçucu külün birlikte kullanılmasının teorik altyapısı entrenjit, mono sulfoaluminat hidrat ve kalsiyum mono karboaluminat hidrat arasında oluşan hassas dengeye dayanmaktadır. Tüm bu denge su bağlayıcılığını artırma suyun çimentoya bağlanması ile ilgilidir. Çimento içeriğinde bu dengeyi oluşturacak yeterli aluminat olmadığı için, uçucu kül gibi ikincil bağlayıcı malzemelerden gelecek aluminata ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden çimento, kireçtaşı (öğütülmüş) ve örneğin uçucu kül üçlü bağlayıcı bir sistem oluşturabilmektedir.

Lothenbach ve arkadaşları [8-9] kireçtaşı ile çimentonun porozitesini ve oluşan fazları hesaplayacak termodinamik bir model tasarlamış ve dayanım gelişimi ile ilgili olumlu korelasyon elde etmiştir.

De Weerd ve Justnes [10], yüksek alkali çözeltisi (pH=13.2) uçucu kül-kireçtaşı-kalsiyum hidrat karışımları üzerine çalışmalar yapmıştır. Uçucu kül ve kireçtaşı arasında çok açık bir etkileşim olduğu gözlenmiştir. Sadece uçucu kül içerikli yapıya oranla daha fazla suyun bağlandığı ve hidratasyon ürünlerinin formunun değiştiği tespit edilmiştir. Uçucu külün puzolonik reaksiyonu sonucu oluşan kalsiyum aluminat hidrat, kireçtaşı bulunduran kalsiyum karbonat ile birleşerek kalsiyum karboaluminat hidrat oluşumuna neden olur. Kireçtaşındaki kalsiyum karbonat ve klinkerdeki aluminat fazının etkileşimi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir[9]. Az miktarda kireçtaşı tozunun olduğu durumlarda hidratasyon sonucu oluşan ürünler değişmektedir. Bu durum hidratasyon sonucu oluşan ürünlerin hacminin artmasına [6] ve dayanımın gelişirken geçirgenliğin azalmasına neden olmaktadır[8]. Bu etkileşim Portland çimentosundaki limitli aluminat içeriği nedeniyle sınırlı ölçüde gerçekleşmektedir. Öte yandan uçucu kül göreceli olarak yüksek oranda aluminat içeriğine sahiptir. Bu nedenle uçucu kül gibi aluminat içeriği yüksek ikincil bağlayıcı malzemeler ile çimentonun kimyasal etkileşimi olumlu neticeler vermektedir.

Uçucu kül ve kireçtaşı tozu birbirlerinin eksik ya da olumsuz yanlarını (erken ve geç dayanım gibi) kompanse ederken (dengelerken), aralarındaki kimyasal etkileşim sonucu (sinerjik reaksiyon) daha dayanıklı ve nitelikli bir yapı ortaya çıkmaktadır[11-13].

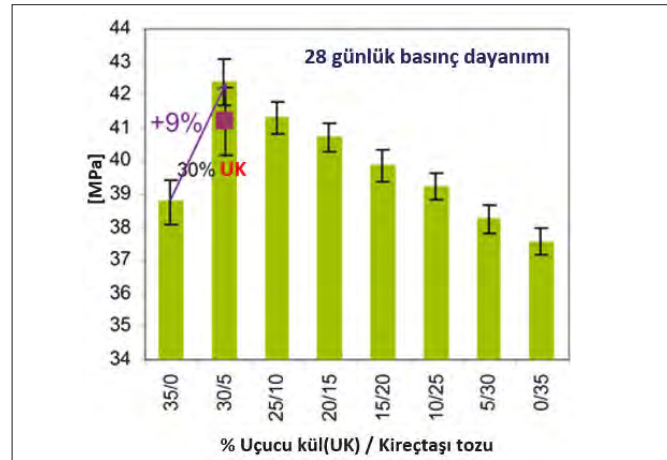
De Weerd ve Justnes [10] tarafından yapılan çalışma kireçtaşının uçucu külün puzolonik özellik taşıyan ürünleri ile tepkimeye girerek kalsiyum karboaluminat hidrat oluşturduğunu ve bu reaksiyonun dayanımı olumlu etkilediğini göstermiştir[11]. Figür 4'te, %5 kireçtaşı ve %30 uçucu kül içerikli harcın 28 günlük basınç dayanımının sadece %35 uçucu kül içeren harcın dayanımında yüksek olduğu ve hatta %30 uçucu kül içeren harcınkinden (kare olarak işaretli) bile yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum % 5 kireçtaşı içeriğinin aynı orandaki yani %5 oranındaki çimento ile aynı etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Önceki sinerji prensibi, reaksiyon sonucu kalsiyum aluminat hidrat açığa çıkaran diğer ikincil bağlayıcı malzemeler ile

birlikte kireçtaşı kullanımında muhtemelen çalışacaktır. Figür 2'de sonuçları gösterilen kalsine kil, yüksek fırın cürufu ve metakaolin örnek olarak gösterilebilir. Kalsine marn, 850 °C'nin üzerinde kalsine edilen kalsine kil ve kalsiyum karbonatın doğal bir kombinasyonudur. Kalsine kil ve kalsiyum karbonat arasındaki sinerjik reaksiyon Figür 3'te gösterildiği gibi dayanıma son derece olumlu katkıda bulunur.

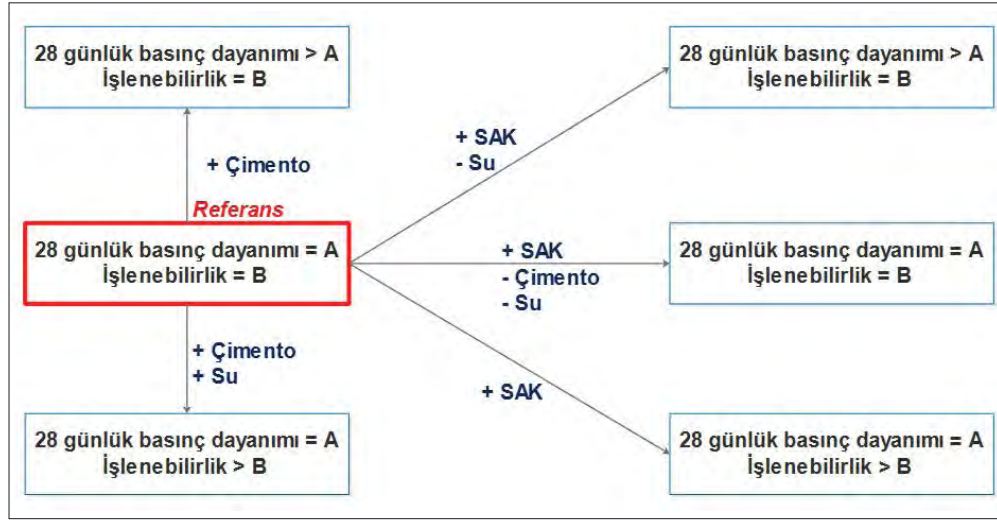
4. Düşük Bağlayıcı Miktarı İçeren Beton

Figür 5'te su azaltıcı katkıların ve akışkanlaştırıcıların beton teknolojisinde farklı kullanımları gösterilmektedir[14]. Su azaltıcı katkı kullanılmayan referans betonun dayanım ve işlenebilirlik özelliğini daha az çimento kullanarak asgari düzeyde sağlamak su azaltıcı katkı kullanımından beklenen temel sürdürülebilirlik özelliğidir.

Birçok beton üreticisi ekonomik nedenlerden dolayı çimento tasarrufu sağlamak için su azaltıcı kimyasal katkı kullanmaktadır. Bu durum ayrıca daha sürdürülebilir yapılaşma yolunda çevresel (ekolojik) faydalar sağlamaktadır. Pratik bir kabule göre modern polikarboksilat içerikli su azaltıcı kimyasal katkının 1 kg'ı ile bir metreküp betonda 20 kg su içeriği azaltılabilmektedir. 1 metreküpünde 350 kg çimento ve 1.8 kg polikarboksilat bazlı kimyasal katkı içeren betonda 0.6 su/çimento oranı sabit tutulduğunda çimento içeriği 290 kg'a düşürülebilmektedir (%17 oranında 60 kg çimento tasarrufu). Benzer hesaplamalar kimyasal katkı kullanımında ne kadar su tasarrufu olacağına dairde yapılabilmektedir. Bu çoğunlukla katkı üreticisi tarafından bildirilmektedir. Çimento ve su içeriği ile 30 mm slump (çökme) değerine sahip beton reçetesi kimyasal katkı kullanımı ile 200 mm kıvama sahip olacak şekilde optimize edildiğinde ekonomik bir çözüm ortaya çıkmaktadır. Collepardi [15] çalışmalarında bu pratik kabulün doğruluğunu deneysel olarak göstermiştir.



Figür 4: Farklı oranlarda uçucu kül (UK) ve kireçtaşı tozu içeren kompozit çimentoların 28 günlük basınç dayanımının karşılaştırılması [11].



Figür 5:

Beton teknolojisinde su azaltıcı katkıların (SAK) farklı şekillerde kullanımı (Rixom ve Mailvaganam [14])

5. Alkali Reaktif Agregaya Dirençli Beton

Beton içeriğine doğrudan katılan ya da çimento içeriğinde bulunan silis dumanı (mikro silika) hidratasyon reaksiyonu sonucu oluşan alkali hidroksitleri hızlı bir şekilde silikata dönüştürmektedir. Bu sayede alkali silika (agrega) reaksiyonu riski azalmış olmaktadır. Bérubé and Duchesne [16] tarafından yapılan çalışma, silis dumanının alkali silika reaksiyonu sonucu oluşan hacimsel genişlemeyi tamamen geciktirdiğini göstermiştir. Bununla birlikte silis dumanının betonun diğer mekanik ve dürabilite (dayanıklılık) özelliklerini iyileştirmesinin yanında alkali silika reaksiyonu riskine karşı bir çözüm olması İzlanda'da tüm çimentolarda %7-8 oranında silis dumanı (klinker birlikte öğütülmüş) kullanılmasına neden olmuştur[17]. Norveç'te alkali agrega reaksiyonuna hassas agrega kullanabilmek için çimento içeriğinde %20 oranında silissi uçucu kül kullanılmaktadır. Tüm bu çözümler sayesinde uzak mesafeden kaliteli agrega temini ihtiyacı ortadan kaldırılarak ve bu kaynakların daha uzun süreli kullanımı mümkün kılınarak sürdürülebilir bir çözüm elde edilmektedir.

6. Yerel Üretim Agregası

Başta doğal kum ve çakıl olmak üzere geleneksel agrega kaynaklarının giderek azalması alternatif kaynaklara ve teknolojilere olan ihtiyacı artırmaktadır. Norveç sert kayalardan kırma agrega temini ile bu yönde bir gelişme sağlamıştır. Agregası kaynaklarına erişim ve işletme ile ilgili olarak sürdürülebilirlik, son derece gerekli malzemeleri sağlayan ve satılabilir olmayan devasa proses tozu (kırma prosesi sonucu oluşan) stoklarından sorumlu bir endüstri için oldukça zorlayıcı bir konudur. Sürdürülebilirliğin en önemli alt başlıkları kaynak verimliliği, sıfır atık üretim, geri dönüşüm ve etkili lojistiklerdir. İmal edilmiş kum ve agrega doğal kuma ya da işlem görmemiş agregaya oranla daha fazla enerji tüketimine neden olmaktadır; ancak

kaynağın pazara yakın olması durumunda daha az nakliye kaynaklı emisyon açığa çıkmaktadır. Bu nedenle imal edilmiş malzeme daha çevreci bir hal almaktadır. Elbette bu durum her zaman için geçerli olmayabilir. COIN, gelecekte daha iyi bir şekilde kırılmış (şekillendirilmiş) agrega tedarik etmek için farklı endüstrilerden (makine tedarikçileri, agrega üreticileri, beton üreticileri ve uygulayıcıları) profesyonelleri, üniversitelerden ve araştırma enstitülerinden akademik unvana sahip insanları bir araya getirerek yeni ve farklı bir yaklaşım ortaya koymaya çalışmaktadır. Bu yeni konsept agrega üretiminde sıfır atık teknolojisidir. Bunun için de üretimde kırma işlemi esnasında açığa çıkan çok ince (satılabilir olmayan) malzeme miktarını azaltmak yerine bu malzemenin betondaki performansını artıracak şekilde tasarlamak ve iyileştirmektir. Proje kapsamında yeni ve uygun teknolojiye sahip bir agrega üretim tesisi ile işbirliğine gidilmiştir. Bu tesisteki üretim prosesi hazır beton ve asfalt üreticilerinin ihtiyaçlarına yönelik tüm ebatlardaki malzemede %100 başarı sağlayacak yeni tasarlanmış agrega konseptine dayanmaktadır[18].

7. Sonuçlar

Beton, yenilenemez doğal kaynaklara bağlı olduğu için hiçbir zaman tam anlamıyla sürdürülebilir bir malzeme olamayacaktır. Yine de içeriğindeki çimentonun belirli oranlarda endüstriyel yan ürün olan yüksek fırın cürufu (öğütülmüş) ve uçucu kül gibi ikincil bağlayıcılar (mineral katkıları) ile yer değiştirmesi sonucu daha sürdürülebilir (daha az sürdürülemez) olması sağlanabilir. Daha yüksek oranda ikincil bağlayıcı malzeme kullanılması için erken dayanımı olumlu etkileyecek daha ince ya da özel şekilde öğütme yapılabilir ya da dayanım hızlandırıcı ajanlar (katkılar) kullanılabilir. Silis dumanı ve/veya uçucu kül içeren çimentolar ile alkali reaktif agrega kullanımı mümkün olabilmekte ve bu sayede çevre korunmaktadır (yerel kaynak kullanımı sonucu daha düşük taşıma kaynaklı emisyon). Kalsine marn ve kil gibi yeni

tip ikincil bağlayıcı malzemeler kaliteli uçucu kül temininin zor olduğu ya da hiç olmadığı durumlarda kullanılabilir. Su azaltıcı katkıları beton karışımında aynı dayanım ve işlenebilirlik özellikleri sağlanarak daha düşük miktarda çimento kullanımına imkân sağlamaktadır. Bu nedenle oldukça çevreci bir uygulamadır. Daha az çimento ile beton üretilmesi CO₂ emisyonu yüksek olan klinkerin daha az tüketilmesine ve daha az doğal kaynak kullanılmasına neden olmaktadır. Tüm bunlar sürdürülebilir üretimin başarılmasında önemli rol oynamaktadır.

Teşekkür

Norveç Hazır Beton Birliği'ne (FABEKO) mali desteği için teşekkür edilmektedir. Çalışmaya ait sonuçların büyük kısmı COIN - Norveç Beton İnovasyon Merkezi kaynaklıdır.

Kaynaklar

- [1] Justnes, H., Østnor, T. A., De Weerd, K. and Vikan, H., "Calcined Marl and clay as mineral addition for more sustainable concrete structures", **Proceedings of the 36th International Conference on Our World in Concrete & Structures**, 14-16 August 2011, Singapore, 10 pp. (ISBN: 978-981-08-9528-0)
- [2] Justnes, H., Østnor, T. A. and Danner, T., "Calcined Marl as Effective Pozzolana", **Proceedings of the International RILEM Conference on Advances in Construction Materials Through Science and Engineering**, RILEM PRO 79, 5-7 September, 2011, Hong Kong, China, 8 pp.
- [3] Justnes, H. and Østnor, T.A., "Durability and microstructure of mortar with calcined marl as supplementary cementing material", **Proceedings of the XIII conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC)**, Sao Paulo, Brazil, September 3-5, 2014, pp. 771-780
- [4] Hoang, K.D., "Hardening Accelerator for Fly Ash Blended Cement", Doctoral Thesis at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Structural Engineering, Trondheim, Norway, No. 2012:366, 195 pp.
- [5] Matschei, T., Lothenbach, B. and Glasser, F.P., "The AFm phases in Portland cement", **Cement and Concrete Research**, 37, 118-130.
- [6] Matschei, T., Lothenbach, B. and Glasser, F.P., "The role of calcium carbonate in cement hydration", **Cement and Concrete Research**, 37, 551-558.
- [7] Matschei, T., Lothenbach, B. and Glasser, F.P., "Thermodynamic properties of Portland cement hydrates in the system CaO - Al₂O₃ - SiO₂ - CaSO₄ - CaCO₃ - H₂O", **Cement and Concrete Research**, 37, 1379-1410.

- [8] Lothenbach, B., Le Saout, G., Galluci, E. and Scrivener, K., "Influence of limestone on the hydration of Portland cements", **Cement and Concrete Research**, 38, pp. 848-860.
- [9] Lothenbach, B., Matschei, T., Möschner, G. and Glasser, F.P., "Thermodynamic Modelling of the Effect of Temperature on the Hydration and Porosity of Portland Cement", **Cement and Concrete Research**, 38, 1-18.
- [10] De Weerd, K. and Justnes, H., "Microstructure of binder from the pozzolanic reaction between lime and siliceous fly ash, and the effect of limestone addition", **RILEM Proceedings PRO 61, Microdurability Conference**, Nanjing, Vol. 1, 2008, pp.107-116.
- [11] De Weerd, K., Justnes, H., Kjellsen, K.O. and Sellevold, E., "Fly Ash-Limestone Ternary Composite Cements: Synergy Effect at 28 days", **Nordic Concrete Research**, 42 (2), 51-70 (ISBN: 978-82-8208-023-1).
- [12] De Weerd, K., Sellevold, E., Kjellsen, K.O. and Justnes, H., "Fly ash - Limestone Ternary Cements - Effect of Component Fineness", **Advances in Cement Research**, 23 (4), 203-214.
- [13] De Weerd, K., Ben Ha-Ha, M., Le Saout, G., Kjellsen, K.O., Justnes, H. and Lothenbach, B., "Hydration mechanism of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash", **Cement and Concrete Research**, 41 (3), 279-291.
- [14] Rixom, M.R. and Mailvaganam, N.P., (1999). **"Chemical Admixtures for Concrete"**, 2nd Ed., 1999, Spon Press.
- [15] Collepardi, M., "Combined use of chemical admixtures and polymer macro-fibres in crack-free industrial concrete floors without wire-mesh", **Proceedings of the Jean Péra Symposium on Special Cements and Sustainability Issues**, Ed. Kamal H. Khayat, held in conjunction with the 9th CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Warszawa, Poland 23-25 May, 2007, pp. 53-65.
- [16] Bérubé, M. -A. and Duchesne, J., (1992). "Does Silica Fume merely postpone Expansion due to Alkali-Aggregate Reactivity?", **Proceedings of 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**, 27-31 July, 1992, London, pp. 71-80.
- [17] Asgeirsson, H., (1986). "Silica Fume in Cement and Silane for counteracting of Alkali-Silica Reactions in Iceland", **Cement and Concrete Research**, 16 (3), 423-428.
- [18] Cepuritis, R., Danielsen, S. W. (2014): "COIN Project: Towards a Zero-Waste Technology for Concrete Aggregate Production in Norway" - Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-14394, 2014 - EGU General Assembly 2014.