

# Karbondiyoksit enjeksiyonu çimentonun sertleşme şeklini yeniden düzenliyor

Yeni bir araştırma, çimento pastasına CO<sub>2</sub> enjeksiyonunun tetiklediği kimyasal diziyi ortaya koyuyor ve gerçek zamanlı Raman spektroskopisi kullanarak ilk kez geçici bir ara reaksiyonu yakalıyor.



Konfokal Raman mikroskobu (solda), 24 saat boyunca CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş çimento pastası örneklerinin kimyasal evrimini izliyor; özel tablanın kuvars penceresi, lazerin aşağıdan tarama yapmasını sağlıyor. Çimento pastası, sağda görüldüğü gibi taze betonun temelini oluşturuyor; CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş beton, karbondiyoksiti kalıcı olarak depolayan bir malzeme olarak ticari ivme kazanıyor.

Bir Eylül günü, MIT'nin (Massachusetts Institute of Technology) Pierce Laboratuvarı'nın içinde kar yağmaya başladı.

Araştırmacılar, sıvı karbondiyoksit (CO<sub>2</sub>) dolu bir tankın basıncını düşürerek anında dondurdular ve katı pullar oluşturdular. Bunlar çimento pastasına karıştırıldı ve madeni para büyüklüğünde diskler hâline getirildi; her biri suyu içeride tutmak ve havayı dışarıda bırakmak için ince bir bitkisel yağ tabakasıyla ka-

## A shot of carbon dioxide rewires how cement sets

New research reveals the chemical sequence triggered by CO<sub>2</sub> injection in cement paste, capturing a fleeting intermediate reaction for the first time using real-time Raman spectroscopy.

patıldı. Ekip, her birine lazer ışınları tutarak, CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş çimento pastasının neden daha hızlı mukavemet kazandığını açıklayabilecek geçici kimyasal reaksiyonu ilk kez gözlemledi.

Beton gibi çimento ürünlerine CO<sub>2</sub> enjekte etmek, onu depolamanın ve atmosferden uzak tutmanın bir yoludur. Bu süreç, CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş beton karışımları sunan şirketlerin sayısının artmasıyla ticari ilgi

çekmiştir ancak şimdiye kadar, altta yatan çimento kimyası doğrudan görselleştirilmemişti.

Amerikan Seramik Derneği Dergisi'nde yayımlanan yeni bir açık erişimli makale, MIT Beton Sürdürülebilirlik Merkezi ve MIT İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü'nden Doçent Admir Masic liderliğinde ve yüksek lisans öğrencisi Marcin Hajduczek'in ilk yazarlığıyla, CO<sub>2</sub>'in taze çimento pastasıyla karşılaşmasının ardından ortaya çıkan kimyasal diziyi açıklıyor. Ortak yazarlar arasında MIT'den Santiago El Awad ve Franz-Josef Ulm'un yanı sıra IIT Jodhpur ve CarbonCure Technologies'ten araştırmacılar da yer alıyor.

Önceki çalışmalar, teori ve dolaylı kanıtlardan yola çıkarak CO<sub>2</sub> enjeksiyonunun kimyasal etkileri hakkında bir altyapı oluşturmuştu; temel reaksiyonlar çok hızlı gerçekleşiyor ve geleneksel tekniklerin onları yakalayamayacağı kadar tamamen ortadan kayboluyordu. Raman konfokal mikroskobu bunu başarabiliyor ve basit bir prensibe dayanıyor: Bir moleküllü lazerle aydınlatıldığında, saçılan ışık onun kimliğini ortaya çıkarıyor. Işık, her malzemenin benzersiz kimyasal bağlarıyla etkileşime girerek, farklı bir spektral "parmak izi" üretmek için enerjide kayma gösteriyor. En geçici ve amorf fazlar bile okunabilir bir iz bırakıyor. Masic, "Ölü Deniz Parşömenlerinden Antik Roma betonuna kadar tarihin en ilginç malzemelerinden bazılarını daha iyi anlamak için Raman spektroskopisi kullandık. Çimento pastası buna kıyasla daha az göz alıcı görünebilir, ancak sertleşirken CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş çimento pastasına lazer tutmak, daha önce görülmemiş şeyleri görselleştirmemizi sağlıyor." diyor.

24 saatlik sürekli tarama sırasında ortaya çıkan şey, üç perdelik bir kimyasal süreçti.

#### Birinci Perde: Kalsiyumun yakalanması

CO<sub>2</sub> taze çimento pastasına eklendiği anda, çalışmaya başlar. Gözenek çözeltisine karışır ve çözünen klinker tarafından salınan kalsiyum ile reaksiyona girerek çeşitli kalsiyum karbonat formları olarak çöker. Klinker, kireç taşı ve alüminosilikat malzemelerinin bir fırında ısıtılmasıyla üretilir ve çimento yapmak için ince bir toz hâline getirilmiş ana bileşeni oluşturur. Bu, ilk saat içinde gerçekleşir ve kalsiyumun

ilerlemesi gereken normal hidrasyon reaksiyonunu geçici olarak yavaşlatır.

Bunun aksine, CO<sub>2</sub> mevcut olmadığında, çözünen klinker tarafından salınan kalsiyum yerel olarak kullanılabilir durumda kalır ve malzemenin sertleşmesi sırasında bağlayıcı fazların kademeli oluşumunu destekler.

Kalsiyum olmadan, klinker tarafından salınan silikatlar gözenek çözeltisine karışır ve kaynaklarından uzakta çökerek, pasta boyunca birbirine bağlı bir silika jel ağı oluşturan zincirler hâlinde birleşir. Bu amorf, geçici jel, bundan sonra olabilecekler için zemin hazırlar.

#### İkinci Perde: Hayalet jel

Enjekte edilen CO<sub>2</sub> tamamen mineralize olduktan sonra -karıştırmadan yaklaşık dört ila beş saat sonra- normal hidrasyon yeniden başlar. Kalsiyum hidroksit gözenek boşluğuna çökmeye başlar ve çökeldiğinde, onu bekleyen silika jel ağıyla karşılaşır.

İki faz arasındaki reaksiyon hemen başlar ve çimentoya bağlayıcı özelliğini veren bileşik olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) üretir. Bu C-S-H formunu farklı kılan şey, nerede ve nasıl oluştuğudur: Geleneksel hidrasyonda olduğu gibi klinker parçacıklarının etrafında kümelenebilir, aksine silika jelin yayıldığı her yerde, tüm matris boyunca dağılır.

CO<sub>2</sub>, macunun alkaliliğini geçici olarak bastırmıştı ve bu düşük pH, tek çözümdü.

Silika jelin bütünlüğünü korumak önemlidir. Hidrasyon yeniden kendini gösterip standart hidrasyon ürünleri olan C-S-H ve kalsiyum hidroksit ürettiğinde, ikincisi pH'ı kendi kendini güçlendiren bir döngü içinde tipik seviyelere geri yükseltir; silika jel, puzolanik reaksiyon adı verilen bir reaksiyon yoluyla kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girer. Sekiz saat içinde silika jel neredeyse tamamen yok olur - daha önce iyi dağılmış olan jel ağı, bu kritik erken dönemde hızla ilave C-S-H'ye dönüşür.

Hajduczek, "Başlangıçta, silika jelin geçici doğası Raman verilerinde bir tesadüf gibi görünüyordu ancak, ani kayboluşunun her CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş numunenin tutarlı, inkâr edilemez bir özelliği olduğu hızla anlaşıldı." diyor.

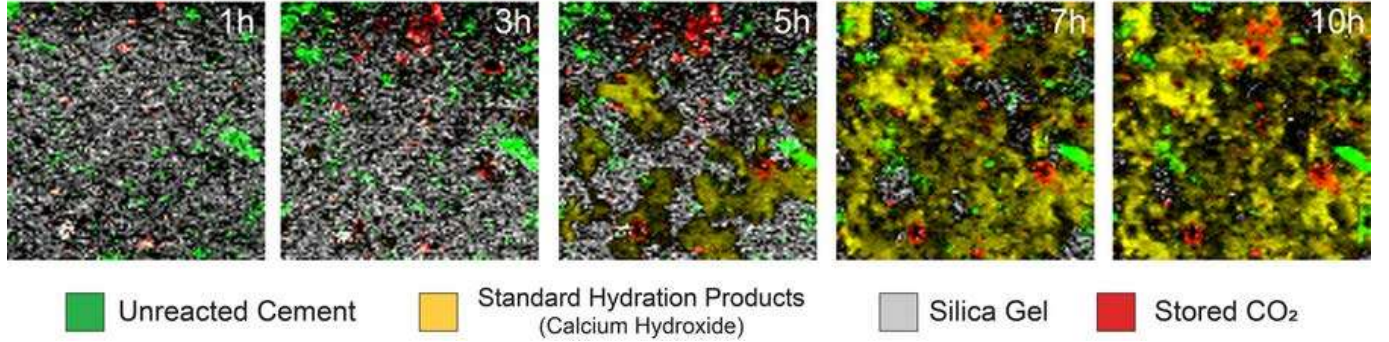
One September day, it started to snow inside MIT's Pierce Laboratory.

Researchers depressurized a tank of liquid carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), instantly freezing it and releasing solid flakes. These were blended into cement paste and pressed into discs roughly the size of a dime, each sealed with a thin layer of vegetable oil to keep water in and air out. The team trained lasers on each, observing for the first time the transient chemical reaction that might explain why CO<sub>2</sub>-injected cement paste gains its strength faster.

Injecting CO<sub>2</sub> into cement products like concrete is one way to store it and keep it out of the atmosphere. The process has attracted commercial interest, with a growing number of companies offering CO<sub>2</sub>-injected concrete mixes. But until now, the underlying cement chemistry hadn't been directly visualized.

**Üçüncü Perde: Yeniden düzenlenmiş bir matris**

Silika jel tüketildikten sonra, pasta geleneksel hidrasyona yerleşir, ancak geride bıraktığı şey ölçülebilir derecede farklıdır. Yeni bağlayıcı, çimento matrisi boyunca daha eşit bir şekilde dağıtıldığı için, ortaya çıkan mikro yapı erken yaşta daha güçlü ve daha homojendir. Çalışmada, çimento ağırlığının %1'i oranında CO<sub>2</sub> ile karıştırılmış macun, referans karışımlara kıyasla 24 saatte ortalama %13 daha yüksek basınç dayanımı elde etmiştir.

**Raman Imaging of Cement Paste with CO<sub>2</sub> Injection**

Raman haritaları, karbondioksit enjekte edilmiş çimento pastası numunesi içindeki fazların zaman içindeki evrimini göstermektedir. Silika jel (gri), pasta sertleştikçe standart hidrasyon ürünlerine (sarı) dönüşür. Reaksiyona girmemiş çimento yeşil, depolanmış CO<sub>2</sub> ise kırmızı renkte gösterilmiştir.

Masic, “Yıllardır çimento ürünlerine CO<sub>2</sub> enjekte ediyorduk, ancak içeri- de ne yaptığını tam olarak anlamı- yorduk. Şimdi bunu görebiliyor ve performans artışına yol açan altta yatan mekanizmayı anlayabiliyoruz. Bu nedenle kontrol etmeye başlaya- biliriz ve daha da geliştirebileceği- miz çok alan var.” diyor.

Bulgular ayrıca, CO<sub>2</sub> enjekte edilmiş çimento hamurunun daha yüksek erken yaş dayanımına ilişkin önde gelen bir açıklamayı da iyileştiriyor: Daha önce C-S-H büyümesini baş- lattığı düşünülen kalsiyum karbonat kristalleri, C-S-H oluşturmak için reaksiyona girmek yerine, silika jel şablonuna gömülü pasif gözlemciler olarak ortaya çıkıyor.

**Kimyanın bir sonraki adımı**

Mekanizmayı bilmek, araştırmacılar- ra daha spesifik bir dizi soru sunu- yor. Silika jel şablonu, yeni C-S-H'nin dağılımını açıklıyor, ancak mekanik

A new open-access paper in the *Journal of the American Ceramic Society* — led by Associate Professor Admir Masic and first-authored by graduate student Marcin Hajduczek, both of the MIT Concrete Sustainability Hub and MIT Department of Civil and Environmental Engineering — describes the chemical sequence that unfolds after CO<sub>2</sub> meets fresh cement paste. Co-authors include MIT col- leagues Santiago El Awad and Franz-Josef Ulm, alongside researchers from IIT Jodhpur and CarbonCure Technologies.

Previous studies had pieced together a story about CO<sub>2</sub> injection's chemical impacts from theory and indirect evidence; the key reac- tions simply moved too fast, and vanished too completely, for conventional techniques to catch them in the act. Raman confocal microscopy could — and it works on a simple principle: Illuminate a molecule with a laser, and the scattered light will reveal its identity.

The light interacts with each material's unique chemical bonds, shifting in energy to produce a distinct spectral “fingerprint.” Even the most fleeting and amorphous phases leave a readable trace.

özelliklerini doğrudan ölçmek bir sonraki adım olmaya devam ediyor.

Pratik açıdan, dozaj önemlidir: Sis- temi çok fazla CO<sub>2</sub> ile doldurursa- nız, jel oluşup reaksiyona girmeden önce kalsiyum karbonata kilitlenir. Eğer burada kullanılan hamur bol miktarda C-S-H oluşturuyorsa, te- orik olarak çimento üretiminden kaynaklanan karbon emisyonlarının %40'ına kadarını telafi edebilir. Bu, süreçte kullanılan fosil yakıtlarla ilişkili emisyonları hariç tutar an- cak pratikte, elde edilebilecek telafi muhtemelen bu değerinde sadece bir kısmı olacaktır, yine de potansiyel olarak önemli olabilir.

Bu açık sorulara rağmen, hayaletim- si jel yakalandı ve artık araştırma- cılar neye bakacaklarını bildiklerine göre, ilk sekiz saatte ortaya çıkan kimya artık görünmez değil.

**Kaynak:** <https://news.mit.edu/2026/carbon-dioxide-rewires-how-cement-sets-0611>

# Daha akıllı beton tasarımı için metakaolin ve yapay zekâ

Araştırmacılar, metakaolini gelişmiş tahmin modellemesiyle birleştirerek daha güçlü, daha düşük karbonlu beton tasarlamak için yapay zekâ destekli bir yöntem geliştirdiler.



**Çalışma:** Yapay zeka destekli sürdürülebilir mukavemet tahmini ve metakaolin içeren yüksek performanslı lif takviyeli betonun deneysel değerlendirilmesi.

Scientific Reports'ta yayımlanan yeni bir çalışma, çimentonun kısmen daha sürdürülebilir bir alternatif olan metakaolin ile değiştirildiği yüksek performanslı lif takviyeli betonu (FRC) inceliyor. Çalışma, inşaat sektörünün Portland Çimentosu (OPC) ile bağlantılı emisyonları azaltma konusunda artan baskıyla karşı karşıya kalması nedeniyle iki öncelik olan hem mekanik performansı hem de çevresel etkiyi iyileştirmeye odaklanıyor.

Çalışmanın merkezinde, yüksek hassasiyetle beton dayanımını tahmin etmek üzere tasarlanmış, Adaptif Piramit Genişletilmiş Yoğun Uzun Kısa Süreli

## New Study Combines Metakaolin and AI for Smarter Concrete Design

Researchers have developed an AI-driven method to design stronger, lower-carbon concrete by combining metakaolin with advanced predictive modeling.

Bellek ve Seyrek Dikkat (A-PDDLSTM-SA) adı verilen derin öğrenme modeli yer almaktadır.

Model, %96,13'e varan doğruluk seviyelerine ulaşarak malzeme performansını değerlendirmek için daha verimli bir yol sunmaktadır. Laboratuvar testlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırmaya da, gerekli deneysel çalışma ölçeğini önemli ölçüde azaltmaktadır.

**Daha akıllı malzemeler, daha güçlü beton**  
Çalışma, çimento tüketimini azaltmak için ek çimentolu malzemelerin (SCM'ler) artan kullanımına dayanmaktadır. Kaolin kilinin kalsinasyonu

üretile metakaolin, yüksek reaktivitesi ve basınç dayanımını ve dayanıklılığını artırma yeteneğiyle öne çıkmaktadır.

Betonun doğal kırılganlığını gidermek için araştırmacılar, karışıma çelik, cam, naylon ve polipropilen gibi lifler eklediler. Bu lifler, çatlak oluşumunu ve yayılmasını kontrol etmeye yardımcı olurken çekme dayanımını ve sünekliği de artırmaktadır.

Metakaolin ve lif takviyesi bir araya geldiğinde, dayanıklılık ve yapısal bütünlüğün kritik olduğu köprüler ve yüksek yapılar gibi zorlu uygulamalar için uygun bir malzeme olan yüksek mukavemetli lif takviyeli beton (HSFRC) üretilir.

#### **Karışımın test edilmesi**

Araştırma ekibi, çimento yerine %10 metakaolin kullanarak, farklı lif türleri ve dozajlarıyla birlikte birden fazla beton karışımı geliştirdi. Tüm örnekler, tutarlılığı korumak için 0,32 su-çimento oranına sahip C60 sınıfı bir tasarıma uygun olarak üretilir.

Hem standart hem de lif takviyeli numuneler kontrollü koşullar altında test edildi. Mekanik performans, 7, 28, 56 ve 90 günlük kürlleme aralıklarında basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı testleri ile değerlendirilerek, dayanımın zaman içinde nasıl geliştiği kaydedildi.

Yapay zekâ modeli, karışım bileşimi ve performans arasındaki kalıpları belirlemek için bu sonuçları analiz etti. Model parametrelerini ayarlayarak tahmin doğruluğunu artıran Güncellenmiş Rastgele Sayı Tabanlı Hibrit Optimizasyon Algoritması (URN-HOA) kullanılarak daha da geliştirildi. Analiz, %10 metakaolin ve %1 çelik lifinden oluşan optimal bir karışımı işaret etti.

#### **Performans kazanımları ve dengelemeler**

Sonuçlar, tüm temel mukavemet ölçütlerinde ölçülebilir kazanımlar göstermektedir. Optimal karışım, genel olarak en iyi performansı sağladı; çelik lifler, basınç dayanımını yaklaşık %12,5 artırırken aynı zamanda tokluk ve sünekliği de iyileştirdi ancak, daha fazla, her zaman daha iyi anlamına gelmez. Daha yüksek lif içeriği, zayıf dağılım ve lif kümelenmesi nedeniyle performansı düşürdü. Her lif türü farklı katkıda bulun-

A new study published in Scientific Reports examines high-performance fiber-reinforced concrete (FRC) that partially replaces cement with metakaolin, a more sustainable alternative. The work focuses on improving both mechanical performance and environmental impact, two priorities as the construction sector faces increasing pressure to reduce emissions linked to Ordinary Portland Cement (OPC).

At the center of the study is a deep learning model that goes by the name of Adaptive Pyramid Dilated Dense Long Short-Term Memory with Sparse Attention (A-PDDLSTM-SA), and it is designed to predict concrete strength with high precision. The model achieved accuracy levels of up to 96.13 %, offering a more efficient way to evaluate material performance. While it does not eliminate the need for lab testing, it significantly reduces the scale of experimental work required.

Smarter Materials, Stronger Concrete The study builds on the growing use of supplementary cementitious materials (SCMs) to reduce cement consumption. Metakaolin, produced by calcining kaolin clay, stands out for its high reactivity and ability to improve compressive strength and durability.

du: Cam lifler matrisi güçlendirdi, naylon lifler çatlak köprülemeyi geliştirdi ve polipropilen lifler büzülme çatlaklarını azalttı.

Metakaolin, betonun mikro yapısını iyileştirerek dayanıklılığı daha da artırmada merkezi bir rol oynadı.

Modelleme tarafında, A-PDDLSTM-SA sistemi, RNN, GRU, SVM ve standart LSTM modelleri de dâhil olmak üzere geleneksel yaklaşımlardan daha iyi performans göstererek %25,747'lik bir Ortalama Hata Yüzdesi (MEP) elde etti. Özellikle, sınırlı veri kümeleriyle bile güvenilirliğini koruyarak, pratik bir tasarım aracı olarak değerini pekiştirdi.

#### **İnşaat sektörü için çıkarımlar**

Bulgular, beton tasarımına daha verimli bir yaklaşıma işaret ediyor. Yapay zekâyı kullanarak karışım konfigürasyonlarını simüle edip değerlendiren mühendisler, malzeme israfını azaltabilir, maliyetleri düşürebilir ve olgunluk sürelerini kısaltabilirler.

HSFRC'nin geliştirilmiş özellikleri, ağır yüklere ve zorlu ortamlara maruz kalan altyapı için uygun hâle getirirken, metakaolin kullanımı çimento üretimiyle ilişkili karbon emisyonlarını azaltmaya yardımcı olur.

Daha geniş anlamda, makine öğreniminin malzeme tasarımına entegrasyonu,

performans, sürdürülebilirlik ve verimliliğin aynı anda ele alındığı veriye dayalı inşaat uygulamalarına doğru bir kaymayı işaret ediyor.

#### **Sonraki adımlar**

Sonuçlar umut verici olsa da, çalışma, veri kümesinin boyutu ve belirli lif kombinasyonlarına odaklanması nedeniyle sınırlıdır. Gelecekteki çalışmaların verileri genişletmesi, hibrit lif sistemlerini incelemesi ve değişen çevresel koşullar altında uzun vadeli dayanıklılığı değerlendirmesi beklenmektedir.

Bununla birlikte, araştırma, performansı iyileştirirken beton tasarımını kolaylaştırmak için sürdürülebilir malzemeleri yapay zeka destekli modellemeyle birleştirme konusunda net bir yön sunmaktadır.

**Kaynak:** [www.azobuild.com/news.aspx?newsID=24017](http://www.azobuild.com/news.aspx?newsID=24017)

# Düşük karbonlu çimentodaki son trendler



Çimento ve beton üretimi günümüzde küresel CO<sub>2</sub> emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumludur, bu oran havacılık sektörünün ürettiği emisyonların üç katından fazladır. Fosil yakıtlar zamanla yenilenebilir enerji kaynaklarıyla değiştirilebilse de çimentosuz bir dünya hayal etmek neredeyse imkânsızdır.

Karbon emisyonlarını azaltmanın tek yolu karbonsuzlaştırmadır, ancak bu süreç hem zorlu hem de maliyetlidir. Norveç'in Brevik kentindeki Heidelberg Materials tesisi, bugün işletmede olan ve karbon yakalama sistemine sahip tek çimento fabrikasıdır. Başka projeler devam etmekte olsa da bu teknolojinin yaygınlaştırılması için gereken büyük yatırımlar, mevcut ekonomik koşullarda gerçekleştirilebilir değildir.

Ocak ayında iki gün boyunca çimento uzmanları, Münih'te düzenlenen 6. Küresel FutureCem Konferansı'nda alternatif çözümleri tartışmak üzere bir araya geldi. Görüşmeler; tamamlayıcı bağlayıcı malzemelerden (SCM), atık ısı geri kazanımına ve yapay zekânın rolüne kadar geniş bir yelpazeyi kapsadı.

E.ON Energy Infrastructure Solutions İş Geliştirme Başkanı Christoph Hiesgen'e göre etkinlik son derece içerik odaklıydı ve teorik değil, pratik bir bakış açısıyla yürütüldü. Bu durum yoğun tartışmalara ve yüksek katılımcı etkileşimine yol açtı.

## Karbonsuz çimentonun maliyeti

Hiesgen, "Ana tema, karbon piyasasındaki mevcut durum göz önüne alındığında karbondan tamamen kurtulmanın neredeyse imkânsız olduğuydu, çünkü asıl soru şuydu: Müşteri, yeşil çimento için daha yüksek bir ücret ödemeye istekli mi? Teknolojik açıdan bakıldığında neredeyse her şey mümkün, ama sonuçta faturayı kim ödeyecek? Bu nedenle, en kritik sorulardan biri, sürdürülebilir dönüşüm yaparken üretim maliyetlerini makul bir seviyede nasıl tutabileceğimizeydi." diyor.

Enerji verimliliği çözümleri sağlayıcısı Orcan Energy'de Satış Mühendisi olan Veronica Schwarz'a göre etkinliğin bir diğer önemli sonucu ise, çimento fabrikalarında CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltabilecek hızlı ve nispeten kolay uygulanabilir birçok fırsatın bulunmasıydı.

"Genellikle bu tür etkinliklerin çoğunda ana konu her zaman karbon yakalama ve depolamadır. Nihayetinde tamamen karbonsuz hâle gelmek için karbon yakalama gerekli olacak, ancak şu anda atılabilecek başka birçok adım da var." diye açıklıyor.

## Atık ısıyı değere dönüştürmek

Seçeneklerden biri, Organik Rankine Çevrimi (ORC) teknolojisini kullanarak atık ısıyı elektriğe dönüştürmektir. FutureCem'deki sunumuyla ödül kazanan Schwarz'a göre, dünya genelindeki çimento fabrikalarında oluşan yüksek miktardaki atık ısı ORC teknolojisiyle elektriğe dönüştürülse, yılda 67 TWh'den fazla elektrik üretilebilir. Bu miktar, yaklaşık 40 milyon Avrupalının konut elektrik ihtiyacına eş değerdir.

Schwarz, "Çimento şirketleri için en büyük fayda, tesis içinde kullanılabilecek elektrik

üretmek enerji maliyetlerinden tasarruf etmemizdir. Çimento fabrikaları için bu, baz yük elektriğidir. Güneş enerjisi veya rüzgâra kıyasla ORC'nin en büyük avantajı, fabrikaların en çok ihtiyaç duydukları anda, yani tesisin çalıştığı süre boyunca her zaman elektrik üretebilmemizdir." diye açıklıyor.

## Beyond CCUS: The latest trends in low-carbon cement

From clinker substitution and recycled cement to more efficient ways to use energy during manufacturing, decarbonising cement will involve so much more than carbon capture and storage. In this article, we recap discussions at FutureCem to explore the growing list of possibilities for cement companies seeking to reduce their carbon emissions.

Schwarz'ın sunumunun ana odak noktası, Orcan gibi ORC teknolojisi tedarikçilerinin atık ısı geri kazanımını çimento üreticilerinin bugün uygulayabilecekleri kadar erişilebilir hâle getirebilmeleri idi. Çözüm, tesisin ömrü boyunca meydana gelen ısı yükü değişikliklerine hızlı bir şekilde yanıt verebilen, ölçeği artırılıp azaltılabilen esnek, modüler sistemlerdir. Ayrıca, E.ON gibi şirketlerle yapılan iş birlikleri sayesinde, atık ısı çözümleri, Almanya'daki Holcim'in Dornhausen çimento fabrikasında E.ON ve Orcan'ın ortak projesinde gösterildiği gibi, düşük riskli "hizmet olarak enerji" modeli aracılığıyla uygulanabilir.

#### **Tamamlayıcı bağlayıcı malzemelerde önemli ilerlemeler**

Konferansta öne çıkan diğer bir konu da tamamlayıcı bağlayıcı malzemelerdeki (SCM) gelişmelerdi. Bu malzemeler, sektörün Portland çimentosunun yüksek karbonlu ana bileşeni olan klinkere olan bağımlılığını azaltabilir.

Kline Consulting'den John Kline'a göre ABD çimento sektörü 2024 yılında 20 milyon tondan fazla tamamlayıcı bağlayıcı malzeme tüketti. Uçucu kül toplama, taban külü öğütme ve doğal puzolan tesisleri güçlü bir büyüme gösterirken; geri dönüştürülmüş cam, biyokütle külü, geri dönüştürülmüş beton ince malzemeleri ve sentetik tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler de ilerleme kaydediyor.

Çimentonun karbon ayak izini yarıya kadar düşürebilen kil kalsinasyon projeleri de hayata geçirilmeye başlandı. Holcim, Avrupa ve Orta Amerika'daki çeşitli öncü kalsine kil projelerine 100 milyon avronun üzerinde yatırım yaptı. Amith Kalathingail, şirketin başarılarından birkaçını paylaşarak, Avrupa'nın ilk özel kalsine kil çimento üretim hattının bulunduğu Fransa'daki Saint-Pierre-la-Cour tesisinde kullanılan patentli "mini fırın" yöntemine dikkat çekti.

Ayrıca tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler yalnızca çevresel değil ekonomik faydalar da sağlıyor. Joost Oostra, Kolombiya'daki bir klinker öğütme tesisinin yüksek klinker ithalat maliyetlerinden kaçınmak için hızla tamamlayıcı bağlayıcı malzeme kullanımına geçtiğini anlattı. Üç yıl içinde tesisin ham

maddesi %45 klinker ve %53 tamamlayıcı bağlayıcı malzemelerden oluşur hâle geldi. Kullanılan tamamlayıcı bağlayıcı malzemelerin büyük kısmı, yakınlardaki 300.000 ton kırık seramik karo içeren bir depolama alanından sağlandı.

#### **Dijitalleşme yeni fırsatlar sunuyor**

Bir diğer önemli tema, dijital teknolojilerin çimentonun karbon ayak izini azaltmadaki rolüydü.

Cement and concrete production currently account for around 8% of global CO<sub>2</sub> emissions – more than three times the amount produced by aviation. And unlike fossil fuels, which are gradually being replaced by renewables, it is almost impossible to imagine a world without cement. The only option is decarbonisation, but this proves to be both challenging and expensive. Opened last year, the Heidelberg Materials plant in Brevik, Norway is currently the only cement plant in operation today with carbon capture. While other projects are underway, scaling this technology requires significant investment which is just not feasible in today's climate. Across two days in January, cement experts gathered at the 6<sup>th</sup> Global FutureCem Conference in Munich to discuss alternative solutions, covering a range of topics from SCM front-runners to waste heat recovery and the role of AI. According to Christoph Hiesgen, Head of Business Development, E.ON Energy Infrastructure Solutions, the event was extremely content-driven yet "from a practical and not a theoretical sphere", resulting in intensive discussions and high levels of audience engagement.

Türkiye'nin önde gelen çimento üreticilerinden ÇİMSA'dan Ali Camgöz, şirketin fiziksel ve dijital dünyaları birleştirmek için ileri teknolojiyi nasıl kullandığını ve bunun daha akıllı, daha sürdürülebilir üretim ekosistemlerine nasıl yol açtığını anlattı.

Şirket, çeşitli kaynaklardan çimento üretim verilerini bir araya getirdikten sonra, bu bilgileri izlemek ve analiz etmek için bir sistem kurdu ve üretim hatlarının dijital ikizlerini oluşturdu. Dijital ikizler, yakıt ve karbon dalgalanmalarına ilişkin kısa vadeli tahminler sunarak değişkenliği en aza indirmeye yardımcı olurken, gelişmiş proses kontrol sistemleri enerji tasarrufuna ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunuyor.

Bu arada, Emidat'tan Lisa Oberaigner, AB'nin düzenlemelerinde Çevresel Ürün Beyanlarından Dijital Ürün Pasaportlarına (DPP) geçişin etkisini değerlendirdi. Yeni sistem, şirketlerin bir ürünün çevresel etkisine ilişkin dijitalleştirilmiş, gerçek zamanlı ve talep üzerine veriler sunmasını gerektirirken, bu verilerin toplanması satış ve ürün geliştirme açısından birçok avantaj sunuyor.

#### **Temel çıkarımlar**

Tartışmasız bir şekilde, çimentonun karbonsuzlaştırılması için sihirli bir çözüm bulunmuyor. Düşük karbonlu çimento karışımları, yenilenebilir enerji, atık ısı geri kazanımı, enerji verimliliği sağlayan alternatifler ve dijital dönüşüm, bu büyüyen endüstrinin yaydığı sera gazı seviyesini azaltmada rol oynarken, karbon yakalama gelecekte net sıfıra ulaşmak için hayati önem taşıyacaktır.

**Kaynak:** [www.worldconstructionnetwork.com/sponsored/beyond-ccus-the-latest-trends-in-low-carbon-cement/](http://www.worldconstructionnetwork.com/sponsored/beyond-ccus-the-latest-trends-in-low-carbon-cement/)