

Yapay zekâ ile düşük karbonlu ve daha hızlı kürlenen beton üretimi



Using AI to make lower-carbon, faster-curing concrete

Meta has developed an open-source AI tool to design concrete mixes that are stronger, more sustainable, and ready to build with faster—speeding up construction while reducing environmental impact.

Meta, daha güçlü, daha sürdürülebilir ve daha hızlı inşa edilebilir beton karışımları tasarlamak için açık kaynaklı bir yapay zekâ aracı geliştirdi. Bu sayede inşaat süreci hızlanırken çevresel etki de azaltıldı.

Bu yapay zekâ aracı, Meta'nın BoTorch ve Ax çerçeveleri tarafından desteklenen Bayes optimizasyonundan yararlanıyor ve yüksek performanslı, düşük karbonlu beton keşfini hızlandırmak için Amrize ve Illinois Üniversitesi Urbana-Champaign ile birlikte geliştirildi.

Meta, yapay zekâ aracıyla optimize edilmiş bir beton karışımını bir veri merkezi şantiyesinde başarıyla uyguladı. Açık kaynaklı ve ücretsiz olarak sunulan bu yapay zekâ aracı, inşaat sektöründe sürdürülebilir beton karışımlarının benimsenmesini ve optimizasyonunu artırmaya yardımcı olabilir. Düşük karbonlu beton çözümleri, 2030 yılında net sıfır emisyon hedefimize ulaşmamız için olmazsa olmazdır. Dünya

Ekonomik Forumu'na göre, beton üretimi veri merkezi inşaatındaki somut karbon emisyonlarına önemli bir katkıda bulunmakta ve çimento kullanımından dolayı küresel CO₂ emisyonlarının %8'ini oluşturmaktadır.

Beton, geleneksel olarak dayanım (28 günlük basınç dayanımı) ve maliyet açısından optimize edilir ancak veri merkezleri de dâhil olmak üzere modern yapılar, sürdürülebilirlik, kürlenme hızı, işlenebilirlik ve bitirilebilirlik açısından da optimize edilmiş beton gerektirir.

Beton formülasyonlarında inovasyon zor ve yavaştır. Geleneksel betonla karşılaştırıldığında, mevcut düşük karbonlu beton formülleri çeşitli zorluklarla karşı karşıyadır, daha yavaş kürlenme hızları, yüzey kalitesiyle ilgili sorunlar ve yeni malzemeler söz konusu olduğunda tedarik zincirlerinde yaşanan zorluklar, ancak beton tedarikçileri, yapay zekâyı kullanarak, hemen kullanıma hazır alternatifler olarak yenilikçi beton karışımları geliştirebilir ve ölçeklendirebilir, böylece büyük ölçekli kullanım için sürdürülebilir malzemelerin keşfini ve entegrasyonunu hızlandırabilirler.

Meta'nın yeşil beton için yapay zekâ modeli

Beton formülleri tasarlamak karmaşık ve çok amaçlı bir sorundur. Tasarımcı, çeşitli çimento türleri ve oranları, düşük karbonlu tamamlayıcı çimento esaslı malzemeler (SCM'ler), su-bağlayıcı oranları, iri ve ince agrega türleri ve katkı maddeleri arasında seçim yapmalıdır. SCM'lerin beton performansı üzerindeki etkisi, kaynak konumuna ve mevsimselliğe göre değiştiğinden, doğrulama için uzun vadeli testler gerektirir. Son olarak, yeni karışımların performansını tam olarak doğrulamak için günler ve haftalar süren zaman alıcı testlere ihtiyaç vardır. Bu nedenle, tasarım sürecinin mümkün olduğunca verimli olması önemlidir.

Sürdürülebilir bir beton karışımında sıklıkla kullanılan birkaç temel bileşen vardır:

Çimento, betonu bir arada tutan "tutkal"dır. Kireç taşı, kil ve diğer minerallerin yüksek sıcaklıktaki döner fırında kalsine edilmesiyle üretilir, bu işlem CO₂ emisyonlarına önemli ölçüde katkıda bulunur. Çimento daha sonra hazır beton tesisinde su, SCM'ler, agregalar ve katkı maddeleriyle karıştırılarak beton oluşturulur. Çimento hamuru zamanla sertleştiğinde, betona mukavemetini veren sert ve bağlayıcı bir yapı oluşturur.

Cüruf, çelik üretiminin bir yan ürünüdür. Soğutulup ince bir toz hâline getirilen bir atık malzemedir. Betonda cüruf, çimentonun yerini alarak betonun içerdiği karbonu azaltmaya yardımcı olur ve uzun vadeli mukavemeti, dayanıklılığı ve dış kimyasallara karşı direnci artırır.

Uçucu kül, kömürle çalışan enerji santrallerinden elde edilen bir tür endüstriyel yan üründür. Hava kirliliği kontrol sistemlerinden toplanır ve betondaki çimentonun bir kısmının yerine kullanılabilir. Uçucu kül, çimentonun yerini alarak betondaki karbonu azaltmaya yardımcı olur ve ayrıca uzun vadeli mukavemetini, dayanıklılığını ve işlenebilirliğini artırır.

Kum gibi ince agrega, iri agregadan daha küçüktür ve daha büyük kayalar veya iri agrega arasındaki boşlukları doldurur. Kum, pürüzsüz ve eşit bir yüzey oluşturmaya yardımcı olur ve betonun genel dokusunu iyileştirir.

Kaba agrega, betona hacim ve yük taşıma kapasitesi kazandırmak, betonun çatlama ve büzülmeyle karşı direncini artırmak için eklenen kırma taş veya iri agregayı ifade eder.

Bu bileşenlerin farklı oranlarda karıştırılması, farklı mukavemet ve sürdürülebilirlik özelliklerine sahip beton elde edilmesini sağlar. Her bir bileşenin özellikleri, üretim kaynağına ve koşullarına göre değişir. Dahası, bazı SCM'lerin bulunabilirliği azalmakta ve bu da hakkında çok az veri bulunan veya hiç veri bulunmayan yeni malzemelerin keşfedilmesini ve kullanılmasını gerektirmektedir. Tüm bunlar, beton tasarımının zorluklarını artırmaktadır. Mukavemet ve sürdürülebilirlik arasında denge amaçlanmaktadır.



Beton karışımları oluşturmak için kullanılan birkaç temel bileşen, sol üstten saat yönünde: uçucu kül, iri agregalar, ince agrega ve çimento.

Low-carbon concrete

Relative proportion of ingredients by weight



Ağırlıkça bileşenlerin göreceli miktarını gösteren düşük karbonlu bir beton karışım tasarımı örneği.

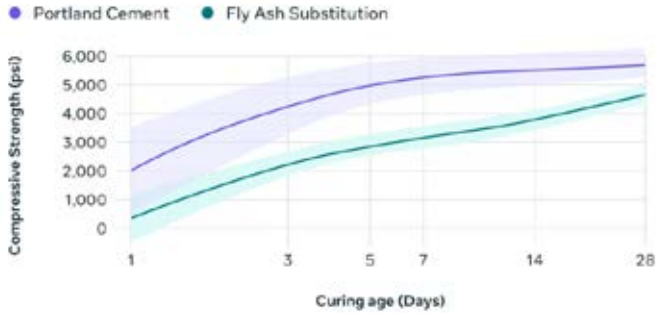
Beton karışım tasarım sürecini hızlandırmak için Meta, sırasıyla Bayes optimizasyonu ve uyarlanabilir deneyler için açık kaynaklı yazılımları olan BoTorch ve Ax'ı kullanarak sürdürülebilir beton için bir yapay zekâ modeli geliştirdi. Bu model, beton bileşimlerini öğrenmek ve optimize etmek için çok amaçlı Bayes optimizasyon algoritmaları kullanır. Bu yaklaşım, farklı karışımlar için basınç dayanımı eğrilerini tahmin ederek kısa ve uzun vadeli dayanım özelliklerini ve sürdürülebilirliği optimize eder.

Yaklaşımın temeli, farklı beton karışımlarıyla ilişkili basınç dayanımı eğrilerini tahmin eden bir modeldir.

Aşağıdaki şekil, biri en yaygın kullanılan çimento türü olan saf Portland çimentosu (mor) içeren bir beton karışımıyla ilişkili, diğeri ise çimentonun bir kısmının karbon etkisi çimentonunkinden daha düşük olan uçucu kül (mavi) ile ikame edildiği iki dayanım eğrisi tahminine örnek göstermektedir. Daha sonra, dayanım tahminlerini çeşitli zamanlarda kullanarak, ilgili karışımların kısa ve uzun vadeli dayanım özelliklerini ve sürdürülebilirliğini birlikte optimize ettik ve testlerle doğrulanabilen yeni formüller ürettik.

Yapay zekâyı kullanarak keşif sürecini hızlandırabilir ve deney sürecinde verimliliği artırabiliriz.

Compressive strength model predictions



Modelimiz tarafından erken geliştirme aşamasında gerçekleştirilen iki dayanım eğrisi tahmini. Daha sürdürülebilir karışım (yeşil), başlangıçta daha düşük basınç dayanımı sergiler, ancak daha sonra geleneksel karışımı (mavi) geride bırakır; bu, daha sürdürülebilir beton karışımlarının yaygın bir dezavantajıdır.

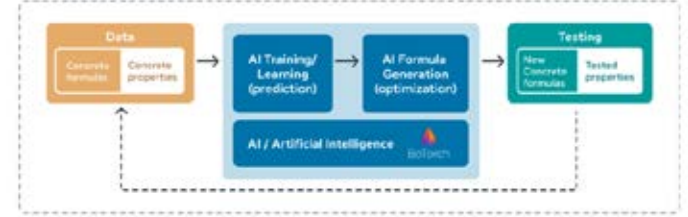
Bu yapay zekâ modelini gerçek verilerle eğitmek için, Illinois Üniversitesindeki Profesör Nishant Garg ve araştırma grubuyla iş birliği yaptık. Her yinelemede, yapay zekâ, en son verilerle güncellenen performans tahminlerine dayanarak yeni ve umut vadeden beton karışımları önerdi. Bu tahminleri laboratuvar testleriyle doğruladık ve sonuçları, sonraki yinelemeler için yapay zekâyı iyileştirmek amacıyla kullandık. Yapay zekâ hattımız, temel veri oluşturma, bir yapay zekâ modeli eğitme, bu modeli yeni hipotezler geliştirmek ve doğrulamak için kullanma ve ardından temel verileri ve yapay zekâ eğitimini iyileştirme iş akışından oluşur.

İlk yapay zekâ hattını uygularken, basınç dayanımı, kürlenme hızı, çökme ve sürdürülebilirlik gibi birkaç temel metriğe odaklandık. Bunları, beton karışımının karbon ayak izini temsil eden bir kriter kullanarak ölçtük. Betonun basınç dayanımı, hem uzun vadeli yapısal bütünlüğünü (genellikle 28 günlük basınç dayanımı olarak belirtilir) hem de dökümden sonraki bir, üç ve beş günlük dayanım gibi belirli dayanım gerekliliklerine ulaşmak için gereken süre olarak belirtilen kısa vadeli kürlenme hızını belirlemek için çok önemlidir. Yoğun örneklenmiş x günlük dayanım verileri mevcut olduğunda, bir dayanım eğrisi oluşturulabilir.

Bu özellikler, laboratuvar da beton silindri üzerinde test edilebilir ve bu da yapay zekânın eğitimi için gerekli olan hızlı ve sistematik veri üretimini sağlar. Yinelemeli testler yoluyla keşfedilen yeni formüller beton uzmanları tarafından incelendikten sonra daha büyük ölçekli testler yapılabilir. Araş-

tırma ve geliştirmeyi aşamalı olarak yürüterek, yapay zekâyı kritik metriklere odaklayabilir ve ilerlemeyi hızlandırabiliriz. Sonuç olarak ortaya çıkan yapay zekâ hattı aşağıda gösterilmiştir:

Adaptive experimentation using AI



Bir yapay zekâ hattını uygulamak için uyarlanabilir deney adımları Zaman içinde, bu yapay zekâ hattı, yapay zekâ eğitimi ve geliştirmesi için yüzlerce benzersiz beton karışımı, kapsamlı x günlük basınç dayanımı verileri ve küresel ısınma potansiyeli (GWP, metreküp başına kilogram CO₂ cinsinden ölçülür) içeren yüksek kaliteli veriler üretmiştir.

Endüstriyel yeşil beton için bir yapay zekâ hattı geliştirme 2024 yılında, Meta'nın yapay zekâsının beton endüstrisinde nasıl ölçeklenebilir bir şekilde kullanılabileceğini keşfetmek için Amrize ile iş birliği yapmaya başladık.

Amrize, Meta'nın açık kaynak yaklaşımını destekleyen temel beton performans verilerini paylaştı. St. Paul, MN yakınlarındaki beton santrallerinde bir yapay zekâ hattı geliştirerek keşif ve test sürecini genişletti.

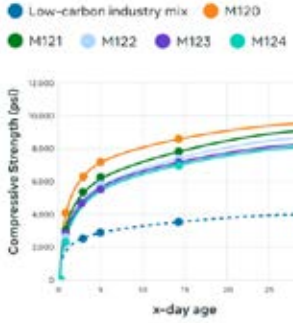
Veri merkezleri için kritik öneme sahip olan, sunucuların ve ilgili güç ve soğutma ekipmanlarının konuşlandırılması için yüzey görevi gören beton kaplamalardır. Veri merkezi döşemelerinin, üzerinde bulunan ekipmanların güvenilir bir şekilde bakımının yapılabilmesi için düz, dengeli, pürüzsüz ve dayanıklı olması gerekir. Bu nedenle, beton formüllerinin ek yüksek gereksinimleri karşılaması gerekir.

Kaliteli yüzey kalitesi gereksinimleri

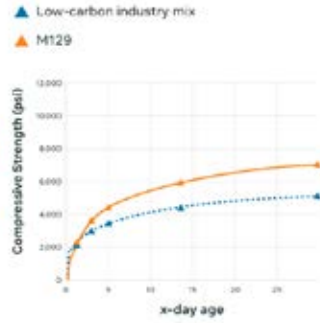
Yapay zekâ algoritmalarımız, belirli su-bağlayıcı oranlarını ve hacimsel malzeme kısıtlamalarını bir araya getirerek, daha hızlı kürlenme ve daha düşük GWP değerlerine sahip, daha katı gereksinimleri karşılayan yüksek performanslı formüller keşfeder.

Döşemeler için uygun formüller ile diğer uygulamalar için daha uygun olanları ayırt ederek, performanslarını endüstri standardı formüllerle karşılaştırabiliriz (aşağıda). İki yinelemede ve küçük insan ayarlamalarıyla, yapay zekâ hattı, mukavemet, hız ve sürdürülebilirlik açısından standart düşük karbonlu endüstri formüllerini aşan formüller keşfetti.

AI designed mixes for non-critical applications

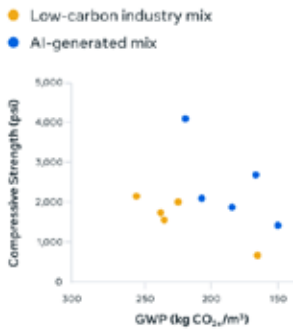


Critical (slab) application

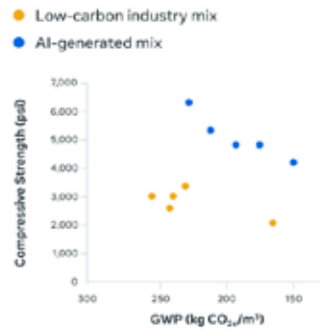


Standart endüstri düşük karbonlu formüllerin mukavemet eğrileri, yapay zekâ ile optimize edilmiş formüllerle karşılaştırıldı. Yapay zekâ ile optimize edilmiş formüller daha hızlı, daha güçlü ve daha düşük karbon emisyonlarına sahipti.

Compressive strength: 1-day



Compressive strength: 3-day



Amrize'nin yapay zekâ tarafından tasarlanan beton formülasyonunun Meta'nın Rosemount veri merkezinde uygulanması

Yapay zekâ ile oluşturulan formüllerin gerçek dünya uygulamalarında uygulanması için daha fazla teste ihtiyaç vardır. Bu nedenle, aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi, ilk yapay zekâ hattını ek adımlar ve ileri testler içerecek şekilde genişlettik.

Amrize, yeni formülün işlenebilirliğini ve bitirilebilirliğini test etmek için veri merkezimizin inşaatından sorumlu genel müteahhit Mortensen ile iş birliği yaptı. Başarılı döşeme testleri, Meta'nın Rosemount, MN veri merkezi projesindeki veri merkezi bina döşemelerinden birinin saha destek bölümünde ölçeklenebilir bir uygulamaya yol açtı.

Yapay zekâ ile üretilen beton formüllerini test etmek ve doğrulamak için geliştirme ve ölçeklendirme süreci. Uzmanlar, her aşamanın ve yinelemenin çıktılarını değerlendirir, yapay zekâyı ek kısıtlamalar içerecek şekilde iyileştirir ve/veya toplam bağlayıcı miktarı ve su-bağlayıcı oranı gibi bireysel kısıtlamaları ayarlar.

Resmi testler, ekibin uygulama için gereken iyi işlenebilirlik ve bitirme performansına ulaşırken tüm teknik gereksinimleri aştığını göstermektedir.

Meta'nın Rosemount veri merkezi proje sahasında yapılan prototip döşeme testi, yeni formülasyonun performansını doğrulamaktadır.

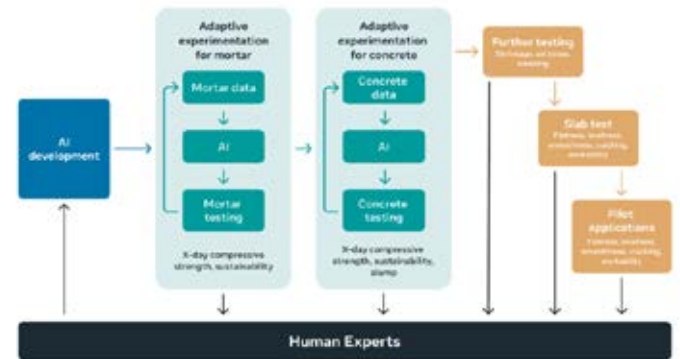
Daha sürdürülebilir inşaat için açık kaynak

Meta'da, yapay zekânın veri merkezleri gibi büyük inşaat projeleri için yüksek performanslı, düşük karbonlu beton karışımları üretebileceğine inanıyoruz. Açık kaynaklı yapay zekâ, inşaat şirketlerinden ve müteahhitlerden tedarikçilere, tedarikçilere, mimarlara ve elbette bina sahiplerine kadar inşaat sektörünün her kademesine fayda sağlayabilir.

Beton sektöründe yapay zekâ kullanımını daha da yaygınlaştırmak için Amrize ile iş birliğimizi sürdüreceğiz. Temel yapay zekâ çözümü, ticari ürünleştirme, uygulama ve AR-GE'nin daha da yaygınlaştırılmasını sağlamak için açık kaynaklı olacaktır.

Amacımız, veri merkezlerinde düşük karbonlu beton kullanımını yaygınlaştırmak ve minimum riskle performansa dayalı gereksinimlerin benimsenmesini teşvik etmektir. Meta, karbon emisyonlarını daha da azaltmak için düşük karbonlu beton formüllerini iş birliği içinde test etmek ve kanıtlamak üzere diğer hiper ölçekleyicilerle iş birliği yapmaya devam edecektir. Meta ayrıca, referans tasarımları, yapay zekâ destekli formülleri, vaka çalışmalarını ve en iyi uygulamaları yayınlamak için iMasons ve Open Compute Project gibi kuruluşlardan da yararlanacaktır.

AI-enabled concrete design and development



Kaynak: engineering.fb.com/2025/07/16/data-center-engineering/ai-make-lower-carbon-faster-curing-concrete