



TÜRKÇİMENTO

**YENİ NESİL
ÇİMENTOLAR**

TÜRKÇİMENTO
2021

Hazırlayanlar:

Serkan Türk, TÜRKÇİMENTO AR-GE Enstitüsü Müdürü
Yasin Engin, TÜRKÇİMENTO Danışmanı

Bu kitabın yayın ve dağıtım hakkı TÜRKÇİMENTO'ya aittir. Tamamı veya herhangi bir bölümü TÜRKÇİMENTO'nun yazılı izni olmadan fotokopi dahil mekanik ve elektronik ortamda transfer edilemez, çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.



İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	1
2. YENİ NESİL ÇİMENTOLAR VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Klinkerli Çimentolar	3
2.1.1. Reaktif Belit Çimentosu	3
2.1.2. Kalsiyum Sülfoalüminat Çimentosu	4
2.1.3. Karbonatlı Kalsiyum Silikat Çimentosu	4
2.1.4. Kalsiyum Hidrosilikat Çimentosu	4
2.1.5. Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu	5
2.2. Magnezyum Esaslı Çimentolar	6
2.2.1. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu	6
2.2.2. Magnezyum Fosfat Çimentosu	7
2.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Çimentolar	7
2.3.1. Alkali ile Aktive Edilmiş Uçucu Kül Çimentosu	8
2.3.2. Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu	8
2.3.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Cam Çimentosu	9
2.4. Karşılaştırma	9
3. YENİ NESİL ÇİMENTOLARIN KULLANIMI	11
3.1. Tasarım	11
3.1.1. Dayanım	11
3.1.2. İşlenebilirlik	11
3.1.3. Agregalar	12
3.1.4. Kimyasal Katkılar	12
3.1.5. Geçirimlilik	12
3.1.6. Donma-Çözülme	12
3.2. Üretim ve Uygulama	13
4. SONUÇ	14
KAYNAKLAR	15

KISALTMALAR

AAFA: Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül / Alkali activated fly ash

AAG: Alkali ile aktive edilmiş cam / Alkali activated glass

AAS: Alkali ile aktive edilmiş cüruf / Alkali activated slag

ASR: Alkali silika reaksiyonu / Alkali silica reaction

CCSC: Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu / Carbonated calcium silicate cement

CSAC: Kalsiyum sülfoalüminat çimentosu / Calcium sulfoaluminate cement

CHSC: Kalsiyum hidrosilikat çimentosu / Calcium hidrosilicate cement

GHG: Sera gazları / Greenhouse gas

LC³: Kireçtaşı kalsine kil çimentosu / Limestone calcined clay cement

MAPC: Magnezyum amonyum fosfat çimentosu / Magnesium ammonium phosphate cement

MKPC: Magnezyum potasyum fosfat çimentosu / Magnesium potassium phosphate cement

MOC: Magnezyum oksiklorür çimentosu / Magnesium oxychloride cement

MOS: Magnezyum oksisülfat çimentosu / Magnesium oxysulfate cement

MPC: Magnezyum fosfat çimentosu / Magnesium phosphate cement

PÇ: Portland çimentosu

PÇB: Portland çimentosu betonu

RBC: Reaktif belit çimentosu / Reactive belite cement

YDM: Yaşam döngüsü maliyeti

1. GİRİŞ

Portland çimentosu betonu (PÇB); kolay ve yaygın üretilebilirlik, çok yönlülük ve dayanıklılık söz konusu olduğunda neredeyse alternatifi olmayan, dünyada sudan sonra en çok kullanılan insan yapımı malzemedir. Yollar, köprüler, su kanalları, barajlar, endüstriyel yapılar, konutlar ve gökdelenler dahil olmak üzere sayısız yapının inşaatında beton kullanılmaktadır. Yaklaşık iki yüz yıllık deneyim, PÇB'nin nasıl çalıştığına dair güvenilir ve pratik bir anlayış oluşmasını sağlamıştır. Uygulayıcılar, doğru karışım tasarımı ve uygun malzemeler ile toplumun ihtiyaçlarını kolayca karşılayacak bilgi ve tecrübe seviyesine ulaşmıştır.

Portland çimentosuna (PÇ) alternatif olması hedeflenen çimentolara literatürde genellikle alternatif çimento, yenilikçi çimento, inovatif çimento, özel çimento ve yeşil çimento gibi isimler verilmektedir. Bu yayının da ismi olan "yeni nesil çimentolar" tabiri; sadece bu çimentoları farklı fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri ile değil geliştirilmelerinde ve uygulanmalarındaki yeni bakış açısını belirtmek için çok daha yerinde görülmektedir. Yeni nesil çimentolar bir anlamda çimento dünyasındaki paradigma değişikliğini temsil ederken, gelecekteki çimentonun nasıl olması gerektiğine dair çalışmaların bir sonucudur. Her ne kadar bazı yeni nesil çimentoların literatüre girişi 50-60 yıl öncesine dayansa da son yıllarda bu çimentolar özellikle karbon emisyonu açısından faydaları ile öne çıkmış ve daha fazla araştırmaya konu olmuştur.

Mühendisler, mimarlar ve müteahhitler; tasarım ve uygulamada mümkün olanın sınırlarını zorlamaya devam ederken, yeni nesil çimentoların devreye girdiği çözümlerin de gelişmesi son yıllarda hız kazanmıştır. Portland çimentosuna alternatif olacak bir bağlayıcı teknolojisinin çevresel etki, yaşam döngüsü maliyeti (YDM) ve performans gibi faktörler göz önüne alındığında somut ve kanıtlanabilir iyileştirmeler sunması gerekmektedir. Alternatif bir yeni nesil çimento kullanımı, aşağıdaki üç ana etkenden biri veya daha fazlası tarafından desteklenmelidir:

1. Daha düşük maliyet (toplam yaşam döngüsü maliyeti)
2. Daha düşük çevresel etki
3. PÇB ile elde edilemeyen belirli özelliklere duyulan ihtiyaç

Sürdürülebilir inşaatı geliştirmek, yeni nesil çimentolu beton teknolojilerinin ortaya çıkmasını sağlayan nedenlerden birisidir. Yapılı çevrede giderek artan bir şekilde başlangıç maliyetine ek olarak tam yaşam döngüsü maliyeti öne çıkmakta ve bu nedenle daha düşük yaşam döngüsü maliyetli ve çevreci alternatif malzemelere odaklanılmaktadır. Yaşam döngüsü maliyetinin belirlenmesi söz konusu olduğunda endüstri, PÇB ile önemli bir deneyime sahiptir. Bazı alternatif çimentolar için endüstrinin hala bu deneyimi geliştirmesi ve yaşam döngüsü maliyetleri oluşturması gerekmektedir. Bir yaşam döngüsü maliyeti, malzemenin işlevsel performansı ile güçlü bir şekilde iç içedir ve ayrılmaz bir şekilde dayanıklılığı ile bağlantılıdır. Son gelişmeler göz önüne alındığında, tüm yeni nesil çimentolar için uzun vadeli dayanıklılık verileri henüz yeterli seviyede ya da mevcut değildir.

Tüm üretim süreçlerinde olduğu gibi, Portland çimentosu üretiminin de topluma maliyeti olan çevresel etkileri vardır. Bunlar:

- 1) Portland çimentosu üretiminin enerji yoğun olması,
- 2) Üretim sürecinde sera gazı (GHG, Greenhouse Gas) emisyonlarının yüksek olmasıdır.

Yeni nesil çimentoların üretiminin önemli avantajlarından bir tanesi, Portland çimentosuna kıyasla çevresel etkide önemli bir azaltıma neden olmalarıdır. Bu olumlu çevresel performans farklı yeni nesil çimento teknolojileri arasında değişiklik göstermektedir. Alternatif çimento üretiminin eşit kütlerde Portland çimentosu üretimi ile ilişkili CO₂ salımına (emisyonuna) oranla %44-%84 arasında azaltıma imkân verdiği belirtilmektedir [1].

Sürdürülebilirlik hususlarının yanı sıra bazı uygulamalarda yeni nesil çimentolu beton, PÇB ile karşılaştırıldığında gelişmiş fonksiyonel performans sunabilir ve bu durumlarda yeni nesil çimentolu betonunun piyasa değeri PÇB'nin piyasa değerinin üzerine çıkabilmektedir. Bununla birlikte çoğu durumda alternatif çimentonun başlangıç maliyetinin benzer olması beklenmektedir. Daha da önemlisi PÇB'nin yerini alacak yeni nesil çimentolar için beton tasarımının ve inşaat ortamının ampirik doğası gereği fonksiyonel eş değerlik gerekmektedir. PÇB yerine yeni nesil çimentolu beton kullanıldığında can güvenliği hususlarının karşılandığından emin olmak için hem laboratuvarında hem de uygulamada gerekli test ve kontrollerin yapılması gerekmektedir. Bazı yeni nesil çimentolarda performans kontrol süreci için açık bir test protokolünün ve hatta uygulanabilir testlerin olmaması üreticiler açısından zorluk oluşturmaktadır.

İşlevsellik performansının bir başka yönü de inşa edilebilirliktir. İstenilen sertleşmiş beton özelliklerini elde etmek için betonun sahada uygun şekilde yerleştirilmesi ve kürlenmesi gerekmektedir. Bu durum, CO₂ açısından zengin bir kürlenme ortamı veya yüksek sıcaklıklar gibi atmosferik olmayan spesifik kürlenme rejimleri gerektiren bazı yeni nesil çimentoların uygulanmasını sınırlamaktadır. Bazı yeni nesil çimentoların PÇB'ye kıyasla hızlı priz alma ve dayanım kazanma özelliği bu çimentoların temel katma değerli yönleridir. İnşa edilebilirlik, istenen performansı elde etmek için hem beton tasarımında hem de uygulamasında bilgili kişilerin bulunmasına da bağlı olmaktadır. Bu nedenle bu yeni malzemeler ile karışım tasarımı yapabilen, test edebilen, üretebilen, yerleştirebilen ve geliştirebilen eğitimli bir iş gücüne sahip olmak gerekmektedir.

Son yıllarda 3 boyutlu yazıcıların inşaat sektöründe kullanımıyla ilgili gelişmeler hızlanmaktadır. 3 boyutlu yazıcı ile üretimde normal betona/harca göre reolojik özellikleri farklı tasarım ihtiyacı bulunmaktadır. Priz ve dayanım kazanma hızı açısından avantajlı olan yeni nesil çimentoların bu alanda da değerlendirildiği görülmektedir.

2. YENİ NESİL ÇİMENTOLAR VE ÖZELLİKLERİ

Yeni nesil çimento teknolojileri benzer üretim faktörleri dikkate alınarak Tablo 1'deki şekilde gruplandırılmıştır. Yeni nesil klinkerli çimentolarda, Portland çimentosuna benzer ancak ürünün çevresel ayak izini etkileyen farklı ham maddeler ve üretim sıcaklıkları kullanılmaktadır. Genellikle bu farklı üretim süreçleri, maliyet veya performansla birlikte bu çimentolar ile üretilen betonların özelliklerini de etkilemektedir.

Tablo 1. Yeni nesil çimentolar

Klinkerli Çimentolar	Reaktif Belit Çimentosu Kalsiyum Sülfat Çimentosu Karbonatlı Kalsiyum Silikat Çimentosu Kalsiyum Hidrosilikat Çimentosu Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu
Magnezyum Esaslı Çimentolar	Magnezyum Oksiklorür Çimentosu Magnezyum Fosfat Çimentosu
Alkali ile Aktive Edilmiş Çimentolar	Alkali ile Aktive Edilmiş Uçucu Kül Çimentosu Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu Alkali ile Aktive Edilmiş Cam Çimentosu

Klinkerli çimentoların bazıları Portland çimentosu ham maddelerine benzer malzemelerle üretilirken, bazılarında ise alternatif ham maddeler kullanılmaktadır. Fırın çalışma sıcaklıkları gibi üretim teknolojisi açısından Portland çimentosundan farklılık göstermektedirler. Alkali ile aktive edilmiş çimentolar genellikle endüstriyel yan ürünleri öncü malzeme olarak kullanmakta ve aktive edici bir çözeltilerin kullanılmasını gerektirmektedir.

2.1. Klinkerli Çimentolar

Klinkerli çimentolar, Portland çimentosu imalatında kullanılanlara benzer üretim teknolojileri kullanılarak üretilmektedir. Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu dışında, malzemelerin tümü hidrasyon yoluyla reaksiyona girer. Bu nedenle hidrolik çimento grubunda yer alırlar. Bununla birlikte bu çimentolar, Portland çimentosundan önemli ölçüde farklı olan kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bazı durumlarda uygulamaya yönelik tamamen farklı yaklaşımlar (farklı kür yöntemleri gibi) gerekmektedir.

2.1.1. Reaktif Belit Çimentosu

Reaktif belit çimentosu (RBC), hiç alit fazı (C_3S) ihtiva etmeyen veya önemli ölçüde daha düşük alit içeriğine ve daha yüksek bir belit fazı (C_2S) içeriğine sahip olan modifiye edilmiş bir Portland çimentosu klinkerinden üretilmektedir. Bu çimentolar kendi başına hidrolik çimento olarak kullanıldığında erken dayanımın düşük olması ancak 28 gün ve daha sonraki yaşlardaki dayanımın kabul edilebilir düzeyde olması beklenmektedir [2]. RBC'nin avantajı, üretimde daha düşük bir fırın sıcaklığının kullanılabilmesi ve bunun sonucunda daha az yakıt tüketimi, daha az ham madde kullanımı (örneğin, kireçtaşı) ve daha düşük CO_2 ve NO_x emisyonları oluşmasıdır. Düşük erken dayanım nedeniyle RBC, erken dayanımı geliştirecek bazı iyileştirmeler yapılmadan nadiren kullanılmaktadır. Bünyesinde alit minerali içermediği için Portland çimentosuna göre daha düşük hidrasyon ısısına sahip olması nedeni ile özellikle kütle beton uygulamalarında kullanılabilirler.

2.1.2. Kalsiyum Sülfoalüminat Çimentosu

RBC'nin erken dayanımını arttırmaya yönelik bir yaklaşım, kalsiyum sülfoalüminat gibi reaktif bir bileşen eklemektir [3]. Kalsiyum sülfoalüminat çimentoları (CSAC) yeni geliştirilmiş bir çimento tipi değildir. Birincil faz olarak ye'elimit (çimento kimyası notasyonunda $Ca_4Al_6SO_{16}$ veya C_4A_3S) içeren CSAC, Alexander Klein tarafından 1960'larda Portland çimentosuna bir katkı maddesi olarak genleştirici çimento oluşturmak için kullanılmış ve bu nedenle "Klein Bileşiği" olarak da adlandırılmıştır [4]. Bu çimentolar PÇ'ye oranla daha hızlı priz alma, daha hızlı dayanım kazanma, daha az hacim büzülmesi ve daha düşük çevresel etki özelliklerine sahiptir. Pratikte bu özellikler, çimentonun bileşimini manipüle ederek ve kimyasal geciktiricilerin eklenmesiyle kontrol edilebilmektedir.

CSAC kullanılarak yapılan betonlar genellikle mükemmel sülfat ve asit direnci göstermektedir [3]. Doğal ve hızlandırılmış koşullar altında, benzer karışım tasarımları kullanılarak yapılan PÇB ile karşılaştırıldığında, CSAC betonunda karbonatlaşma oranı yüksektir [3]. Bu nedenle donatı korozyonu, CSAC kullanılarak yapılan beton için bir sorun olabilmektedir. Bununla birlikte, uygun su azaltıcı katkıların kullanılmasıyla karbonatlaşma oranı düşürülebilmektedir. CSAC betonunun mekanik özellikleri ve dayanıklılığının Portland çimentosuna rakip olduğu rapor edilmiştir ancak uzun vadeli performansı tam olarak incelemek için daha fazla saha deneyimi gerekmektedir [3].

CSAC; hızlı dayanım gelişiminin gerekli olduğu köprüler, havaalanı pistleri, yol yamaları, tüneller, kaldırımlar vb. birçok uygulamada kullanılabilir. Ayrıca, CSAC çimentoları Portland çimentosu ile karıştırılarak rötreyi (büzülme) azaltmak için de kullanılmaktadır. Portland çimentosuna oranla üretiminde daha az enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır.

Kalsiyum sülfoalüminat çimentosunun prekast ve soğuk hava uygulamalarında kullanımı özellikle hızlı dayanım performansı nedeniyle uygundur [5].

2.1.3. Karbonatlı Kalsiyum Silikat Çimentosu

Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu (CCSC), hidrolik olmayan bir çimentodur. Adından da anlaşılacağı gibi, kullanılan katılaştırma işlemi karbonatlaşma reaksiyonu ile gerçekleştirilmektedir. Proseste bir miktar su kullanılır ancak kullanılan su Portland çimentosu hidratasyonunda olduğu gibi sertleşmiş çimento hamurunun yapısında yer almamaktadır. Başka bir deyişle su ile çimento arasında kimyasal bir reaksiyon gerçekleşmemektedir. Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu klinkeri, Portland çimentosu klinkeri üretiminde kullanılan aynı ham maddeler ve döner fırınlar kullanılarak üretilmekte ancak fırın daha düşük bir sıcaklıkta çalıştırılmaktadır. Elde edilen klinker, Portland çimentosu klinkerine kıyasla bileşim olarak farklıdır. CCSC klinkeri üretimi, CO_2 emisyonunda ve gömülü enerjide önemli miktarda düşüşlere neden olmaktadır. Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu henüz tam olarak ticarileştirilmemiş ve gelişmekte olan bir teknolojidir. CCSC daha çok prekast üretiminde kullanılmaktadır.

Karbonatlı kalsiyum silikat çimentosu, CO_2 açısından zengin bir ortamda kürlenmeyi gerektirir ve bu nedenle kürlenme için özel ekipman gerekmektedir. Portland çimentosundaki hidratasyon reaksiyonlarının aksine, CCSC'deki karbonatlaşma reaksiyonu nispeten hızlı bir süreçtir. CCSC esaslı betonun tam kürlenmesi üretilen malzemenin kalınlığına bağlı olarak 10 ila 24 saatten daha kısa sürede gerçekleşebilmektedir [6].

2.1.4. Kalsiyum Hidrosilikat Çimentosu

Kalsiyum hidrosilikat çimentosu (CHSC), yeni bir hidrolik özellikli çimentodur. Malzemeler ve üretim süreci Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü (KIT) tarafından geliştirilmiştir. Bu çimentonun

ham maddeleri, karıştırılması ve sertleşmesi Portland çimentosuna benzemektedir [7]. CHSC üretimi için karbonatlar (örn. kireçtaşı) ve silikatlar (örn. cüruf, kum ve uçucu kül) uygun ham maddelerdir. Kalsinasyon procesten önce gerçekleşir. CHSC'de karbonat içeriği yaklaşık %70 olan PÇ'ye kıyasla daha az olup %40-50 aralığındadır. CaO/SiO₂ oranı 1 ile 2 arasındadır.

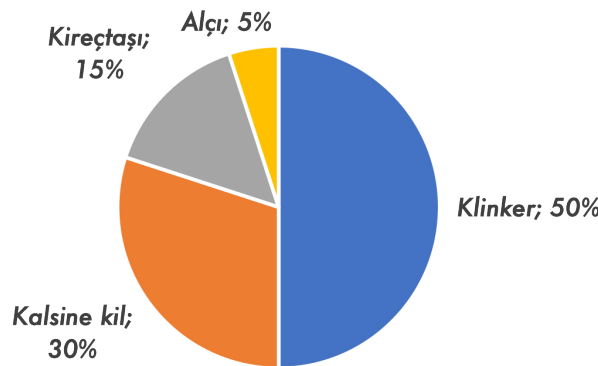
Ham maddelerin işlenmesi iki aşama gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada, ham maddeler yaklaşık 150–200°C'de ve doymuş buhar basıncında bir otoklav kullanılarak hidrotermal olarak işlenmektedir. Bu işlem, hidratlı kalsiyum silikat bileşiği (α -C₂SH) üretmektedir. İkinci aşamada, sentezlenen kalsiyum silikat hidrat daha sonra harmanlanarak amorf kalsiyum hidrosilikatlar üreten silikat bileşenleri ile birlikte öğütülmektedirler [8]. Termal işlem, PÇ'ye (1450°C) kıyasla çok daha düşük sıcaklıkta (150–200°C) gerçekleşmektedir. Enerji tüketimindeki azalma, CO₂ emisyonlarını %50'ye kadar azaltan karışımdaki karbonat içeriğinin azaltılmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca 28 günlük harç numunesi için 80 MPa'ya kadar basınç dayanımı elde edilebilmektedir [9]. CSHC üretim süreci, PÇ üretimine kıyasla birçok işlem adımı nedeniyle karmaşıktır.

Bu yaklaşım hala laboratuvar geliştirme aşamasında olduğundan endüstriyel açıdan genel enerji verimliliği ve CO₂ emisyonları ile ilgili somut veriler bulunmamaktadır [10].

2.1.5. Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu

Kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC³); klinker, kireçtaşı, kalsine kil ve alçıtaşı karışımından oluşmaktadır. Şekil 1, LC³ çimentosunun bileşimini göstermektedir. %30 kalsine kil ve %15 kireçtaşı içeren bu çimentonun Portland çimentosuna bir alternatif olduğu ve hatta dayanıklılık performansının daha yüksek olduğu mevcut çalışmalara ait raporlarda belirtilmektedir. Son yıllarda ticarileşme aşamasına gelen bu çimento özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül arzının gelecekte azalması senaryosuna karşın iddialı bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.

LC³ üretiminde kil (kaolinitik kil) döner fırınlarda 700°C–850°C arasında kalsine edilmektedir. Bu kil daha sonra gerekli oranda klinker ve diğer bileşenlerle birlikte öğütülmektedir [11]. LC³ üretiminde klinkerin sadece %50'si gerektiğinden kireçtaşının kimyasal dönüşümünden kaynaklanan CO₂ emisyonu daha düşük olmaktadır.



Şekil 1. Kireçtaşı kalsine kil çimentosu içeriği

Kaolinitik kilin kalsinasyonu, klinker üretimine kıyasla çok daha düşük bir sıcaklıkta gerçekleşir, bu da daha az yakıt kullanımı anlamına gelmektedir. Kalsine killer PÇ klinkerine

kıyasla nispeten yumuşaktır, bu nedenle öğütmede daha az enerji gerektirmektedir. Bu nedenle LC³ üretimi, PÇ'den yaklaşık %30 daha düşük CO₂ emisyonuna yol açmaktadır [12].

LC³ çimentosunun üretimi herhangi bir ek karmaşık ekipman gerektirmez. Yaş işlemede kullanılan eski döner fırınlar veya kalsinasyon için kullanılan fırınlar gibi çimento fabrikalarında halihazırda mevcut olan ekipmanlar, killerin kalsinasyonu için kullanılabilir. Flaş kalsinasyon, akışkan yatak teknolojisi veya statik kalsinasyon gibi çeşitli başka teknikler de kullanılabilir [11]. Örneğin, Küba'da daha önce yaş işlemede kullanılan eski fırınlar artık killerin kalsinasyonu için kullanılmaktadır. Kil madenlerine de kalsinatörler monte edilebilir. Kilin sahada kurutulması ile yaklaşık %15 rutubet azaltılmakta ve bu da eşdeğer miktarda kilin ilave olarak taşınmasına izin vermektedir.

Hindistan ve Küba'daki pilot projeler, LC³ kullanılarak üretilen betonun PÇ betonu ile benzer fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir [11].

2.2. Magnezyum Esaslı Çimentolar

Magnezyum esaslı çimentolar, üretim teknolojisi açısından Portland çimentosundan farklılık gösterir ve Portland çimentosu üretiminde kullanılmayan ham maddelerden üretilmektedir. Magnezyum esaslı çimentolar, kalsine manyezit bileşen ile birleştirildiğinde katılmış bir bağlayıcı matris oluşturmak üzere reaksiyona giren bir çapraz bağlama maddesinin kombinasyonudur.

2.2.1. Magnezyum Oksiklorür Çimentosu

Magnezyum oksiklorür çimentosu (MOC), 1867'de Stanislas Sorel tarafından geliştirilmiştir ve aynı zamanda Sorel veya manyezit çimentosu olarak da adlandırılmaktadır [13]. Magnezyum oksiklorür çimentosu hidrolik bir çimento değildir.

Magnezyum oksiklorür çimentoları (MOC); öncü molar oranlarına, sıcaklığa ve magnezyum reaktivitesine yüksek oranda bağımlı olan çeşitli fazlar oluşturan MgO ve MgCl₂ arasındaki sulu reaksiyona dayanır.

Sorel çimentosu klinkeri ile magnezyum klorür (MgCl₂·6H₂O) çözeltisinin testere unu veya herhangi bir mineral agrega ile karıştırılmasıyla elde edilen hidrolik bağlayıcı bir malzemedir. Sorel çimentosunun klinkeri, magnezyum karbonat veya başka bir magnezyum bileşiğinin yüksek sıcaklıkta kızdırılması sonucu elde edilen MgO'tir.

İlk kürlenme sırasında, MOC su ile uzun süreli temas halinde stabil değildir. Magnezyum klorürün sızması, reaksiyonun tersine dönmesi ve güç kaybı ile sonuçlanabilmektedir [14]. Belirli bir süre boyunca atmosferik CO₂, liç işlemi yavaşlatan bir yüzey tabakası oluşturmak için magnezyum oksiklorür ile reaksiyona girmektedir. Sonunda, ilave liç, çözünmeyen ve çimentonun yapısal bütünlüğünü korumasını sağlayan hidromanyezit oluşmaktadır [15]. MOC için erken yaşlarda su penetrasyonunu önemli ölçüde yavaşlatacak veya bloke edecek veya hidromanyezit oluşumunu hızlandıracak çeşitli katkı maddeleri geliştirilmiştir.

Saf MOC hamuru için priz süresi birkaç saatten 48 saate kadar değişebilmektedir [16]. Kürlenme; sıcaklık, hava akışı ve nem koşullarından etkilenmektedir. Isıtma, sertleşme oranını artırabilirken malzemenin çatlamaması için betonun aşırı ısınmamasına özen gösterilmesi gerekmektedir [17]. Sertleştikten sonra başka kür işlemine gerek duyulmamaktadır.

MOC hamuru önemli miktarda reaksiyon ısısı açığa çıkarmaktadır. Bu nedenle karışımlar 60°C-80°C'ye kadar sıcaklık geliştirebilmektedir. Bazı durumlarda 100°C üzerinde sıcaklıklar rapor edilmiştir. Yüzeyler ile formların termal hasarını ve kişisel yaralanmaları

önlemek için saf karışım kullanılırken dikkatli olunması önem arz etmektedir. Hamura dolgu maddeleri/agregalar eklendiğinde sıcaklık değişimi önemli ölçüde azalmaktadır. Bu da malzemenin işlenmesi ve yerleştirilmesi adına güvenli bir karışım imkânı sağlamaktadır. Ayrıca, malzemenin yüksek sıcaklık iletkenliği nedeniyle oluşan ısı hızla dağılmaktadır.

MOC ile hazırlanan beton karışımları, uygun şekilde formüle edildiğinde 48 saat içinde 55 ila 69 MPa arasında yüksek basınç dayanımına sahip olabilmektedir. MOC ile üretilen beton ısınmaya, donma ve çözülme döngülerine karşı çok kararlı olup dayanıklılığı artırmak için hava sürüklenmesine ihtiyaç duymamaktadır [18].

MOC kullanan beton zamanla dayanımını kaybetmemektedir. Ancak bu çimentolar erken yaşlarda suya çok dayanıklı değildir. Magnezyum oksiklorür çimentosu en çok iç yapı kullanımları için uygundur ve suyla uzun süreli teması olan uygulamaları için önerilmemektedir. Renkli beton uygulamalarında suya maruz kalmaktan dolayı beneklenme veya renk bozulması meydana gelebilmektedir. Bu sorun koruyucu kaplamaların uygulanmasıyla önlenir veya en aza indirilebilmektedir.

2.2.2. Magnezyum Fosfat Çimentosu

Magnezyum fosfat çimentoları (MPC), MgO ile çözünür bir asit fosfat (tipik olarak amonyum veya potasyum fosfat) arasındaki asit-baz reaksiyonu yoluyla oluştur ve çimento özelliklerine sahip magnezyum fosfat tuzu oluşturur [19].

Magnezyum fosfat çimentoları çeşitli ihtiyaçları karşılamak için geliştirilmiştir [20].

- Sorel çimentolarının su direncinin arttırılması
- Yüksek erken dayanımlı beton üretimi
- MgO bazlı refrakter beton üretimi
- Tamir harçları

Magnezyumun çözünür fosfatlarla reaksiyona sokulmasıyla üretilen magnezyum fosfat çimentoları, suya ve donma-çözülme döngülerine karşı geliştirilmiş dirence ve Sorel çimentolarına göre daha iyi hacim kararlılığına sahiptir. Hızlı priz alırlar ve sıklıkla priz geciktiricilere ihtiyaç duyarlar [20].

Magnezyum fosfat çimentosunun ana uygulama alanı, beton zeminlerdeki çukurların onarımı gibi hızlı onarım işleri için harç veya beton karışımlarıdır. Buradaki avantajlardan biri, magnezyum fosfat çimento karışımlarının Portland çimentosu bazlı eski betona iyi bağlanmasıdır. 4 MPa'yı aşan bağ mukavemetleri elde edilebilir. MPC; ayrıca kabul edilebilir bir aşınma direncine, iyi donma-çözülme direncine ve PÇ karışımına benzer bir termal genleşme katsayısına sahiptir. MPC karışımlarının reolojik özellikleri, Portland çimentosuna benzemektedir [21].

Magnezyum fosfat çimentosu (MPC) ve magnezyum oksisülfat çimentosu (MOS), magnezyum oksidi reaksiyona sokmak için farklı asitlerin kullanıldığı MOC varyasyonlarıdır. Magnezyum amonyum fosfat çimentosu (MAPC), MgO'nun monoamonyum dihidrojen fosfat (ADP) ile reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Magnezyum potasyum fosfat çimentosu (MKPC), MgO'nun monopotasyum fosfat (MKP) ile reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Her iki reaksiyon da çok hızlı ve oldukça ekzotermiktir.

2.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Çimentolar

Alkali ile aktive edilmiş çimentolar (AAC), yaygın olarak endüstriyel bir prosesin atık ürünleri veya yan ürünlerini kullanılmaktadır. Bu ürünler genellikle silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3) ve kalsiyum oksidin (CaO) bazı kombinasyonlarından oluşan amorf fazların (camsı fazlar)

önemli bir kısmını içermektedir. Örnekler arasında uçucu kül, kalsine kil, yüksek fırın cürufu ve öğütülmüş cam yer almaktadırlar. Bu malzemelerden sertleştirilmiş bir çimento hamuru oluşturmak için fonksiyonel bir katkı veya aktivatör solüsyonu gerekmektedir. Aktivatör solüsyonunun cinsi, kullanılan ham maddenin ve istenen reaksiyonun tipine bağlı olarak değişmektedir. Aktivatörler genellikle sodyum hidroksit solüsyonu veya sodyum silikattir.

Genel olarak oluşturulan çimentolu malzeme, kullanılan malzemelerin bileşimine ve kombinasyonuna bağlıdır. Baskın faktör, ham maddedeki kalsiyum oksit içeriğidir. Cüruf veya C sınıfı uçucu kül gibi kalsiyum açısından zengin fazlar içeren malzemeler, suya maruz kaldıklarında Portland çimentosuna benzer hidrasyon reaksiyonları göstermektedirler. F sınıfı uçucu kül, kalsine kil ve öğütülmüş cam gibi ağırlıklı olarak silika ve alümina bakımından zengin malzemeler, toplu olarak jeopolimerizasyon olarak adlandırılan ve sonuçta ortaya çıkan bağlayıcının bir jeopolimer olarak bilindiği farklı bir dizi reaksiyona girmektedir.

AAC'lerin yaygın olarak benimsenmesinin önündeki ana engellerden biri standartlarının olmamasıdır. Son zamanlarda BS PAS 8820 standardı, bu engeli kaldırmak ve inşaat sektöründe AAC'lerin kullanımını teşvik etmek için İngiltere'de geliştirilmiştir. Yeni standart, performans ve dayanıklılık gereksinimlerini belirlemekte ve üreticiler için önemli bir rehber görevi görmektedir. AB standartlarının yakın gelecekte bu yaklaşımı izleyip izlemeyeceğine dair net bir gösterge yoktur.

2.3.1. Alkali ile Aktive Edilmiş Uçucu Kül Çimentosu

Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül (AAFA) betonu; uçucu kül, su ve alkali aktivatör içermektedir. Aktivatör, uçucu kül parçacıklarının çözünmesini sağlar ve çimentolu reaksiyon ürünlerinin çökmesine yol açan kimyasal reaksiyonları başlatmaktadır. Reaksiyon ürünlerinin bileşimi, uçucu külün bileşimine ve kullanılan aktivatöre bağlı olarak değişmektedir [22]. Uçucu külün heterojen yapısı nedeniyle, alkali ile aktive edildiğinde tüm uçucu küller benzer şekilde performans göstermemektedirler. Özellikle uçucu külün kalsiyum oksit içeriği, oluşan fazlar üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, karışımın aktivatör ve kür şartlarını değiştirebilmektedir (örneğin düşük kalsiyum oksit içeren küller için tipik olarak daha yüksek bir kür sıcaklığı gereklidir). Bu nedenle, AAFA çimentosu ile beton yapılırken uçucu külün bileşimini bilmek gerekmektedir.

Uçucu kül taneciklerinin küresel yapısı, bu yeni nesil çimento sisteminde avantaj sağlamaktadır. Küresel tanecikler serbestçe hareket eder ve bu "bilyeli yatak etkisi", su içeriğinde bir artış olmaksızın bir karışımın işlenebilirliğini arttırmaktadır. Gerektiğinde, yüksek oranda su azaltıcıların kullanımı karışımın işlenebilirliğini daha da geliştirmede faydalı olmaktadır [23]. PÇB gibi, AAFA betonunun su/bağlayıcı oranı önemlidir. Daha yüksek su içeriği tipik olarak daha düşük dayanımla sonuçlanmaktadır [22,24].

Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül betonları, özellikle ısıyla kürlemeye tabi tutulan aktive edilmiş düşük kalsiyumlu kül kullanıldığında, genellikle yüksek erken dayanım performansı sergilemektedir [25,26,27]. Dayanımın büyük bir kısmı ilk 24 saat içinde kazanılmaktadır. Basınç, eğilme ve çekme dayanımı arasındaki benzer ilişkiler, elastisite modülü ve yoğunluk özellikleri Portland çimentosu betonunda olduğu gibi görülmektedir. Genel olarak, AAFA betonu PÇB'ye benzer şekilde performans göstermektedir.

2.3.2. Alkali ile Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu Çimentosu

Alkali ile aktive edilmiş cüruf (AAS) betonu; öğütülmüş yüksek fırın cürufu, su ve alkali aktivatörden oluşmaktadır. Aktivatör, cüruf taneciklerinin çözünmesini sağlar ve Portland çimentosuna benzer şekilde kalsiyum-alümino-silikat hidrat (C-A-S-H) fazlarının

çökmesine yol açan kimyasal reaksiyonları başlatmaktadır. Alkali ile aktive edilmiş cüruf sistemleri, alkali ile aktive edilmiş çimentolar olarak da bilinmektedir [28].

Alkali ile aktive edilmiş cüruf betonları, PÇB ile karşılaştırıldığında rekabetçi maliyetleri ve üstün özellikleri nedeniyle umut vaat etmektedirler. Bu özellikler arasında bir yılda 130 MPa kadar yüksek dayanım kazanımı [29,30,31,32], özellikle ısıyla kürlenmiş AAS için hızlı dayanım kazanımı [31,33,34], yangına karşı yüksek direnç, su ve klorür penetrasyonuna direnç [30,35,36] ve sülfat atağına karşı dayanıklılık yer almaktadır [37].

Ortam sıcaklığında kürlenmiş aktive edilmiş cüruf betonları tipik olarak düşük erken dayanım sergiler, genellikle bir günde 10 MPa dayanım değerini geçmemektedir [32,38,39,40,41]. Erken dayanımın iyileştirilmesi, yüksek konsantrasyonlu aktivatörler veya yüksek sıcaklıklarda kürlenme kullanılarak elde edilebilmektedir [39,40]. Aktive edilmiş cürufun ileri yaştaki dayanımı esas olarak aktivatör tipi ve miktarı ile belirlenmektedir [39,42,43,44].

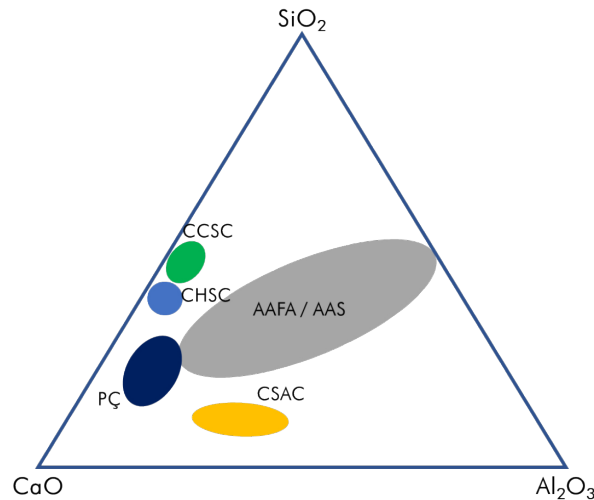
AAS betonlarının inşaat sektörü tarafından benimsenmesinin önündeki temel engeller; büzülme çatlaklarına, karbonatlaşma kaynaklı korozyona ve alkali-agrega reaksiyonuna karşı dayanıklılık sorunlarıdır [34]. Çok sayıda çalışma aktive edilmiş cüruf betonunda aşırı miktarda kuruma büzülmesi meydana geldiğini bildirmektedir [45,46,47]. Ayrıca alkali aktivasyonunun bir sonucu olarak boşluk çözeltilerinin yüksek alkalinitesinden dolayı alkali-agrega reaksiyonuna doğal olarak duyarlılık göstermektedir [48,49,50,51].

2.3.3. Alkali ile Aktive Edilmiş Cam Çimentosu

Alkali ile aktive edilmiş cam (AAG), camdaki düşük kalsiyum oksit içeriği nedeniyle bir jeopolimer çimento olarak kabul edilmektedir. Jeopolimer üretiminde kullanılabilmesi için, çok düşük alümina içeriğine sahip olması nedeni ile suda yeterli stabiliteyi sağlamak amacı ile ek bir alümina kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır [52,53]. Alkali ile aktive edilmiş cam, küresel atık cam sorunsalı nedeniyle ilgi çekicidir ancak bugüne kadar ticari olarak temin edilebilen bir ürün olarak gelişmemiştir.

2.4. Karşılaştırma

Şekil 2'de yeni nesil çimentoların kimyasal kompozisyonu üçlü faz diyagramında karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. Yeni nesil çimentoların kimyasal kompozisyonu

Tablo 2 ve Tablo 3 ticari ya da araştırma aşamasında bulunan mevcut yeni nesil çimentoları ve temel özelliklerinin özetini sunmaktadır.

Tablo 2. Yeni nesil çimentolar [54]

	PÇ'ye göre priz süresi	Dayanım	Dayanıklılık	Olası sorunlar/riskler
CSAC	Çok hızlı	Hızlı erken dayanım Yavaş geç dayanım	İyi sülfat direnci Hızlı karbonatlaşma	Korozyon direncini etkileyen karbonatlaşma performansı ve olası tomasit riski
MOC	Aynı ya da daha uzun	Yüksek erken dayanım İyi düzeyde geç dayanım	İyi yangın, aşınma ve donma-çözülme direnci	Erken yaşlarda suya maruz kalındığında dayanım kaybı ve yüksek ısı oluşumu
MPC	Çok hızlı	Düşük erken dayanım Orta düzeyde geç dayanım	İyi yangın direnci Stabil sülfat direnci	Yüksek ısı oluşumu
AAFA	Çok hızlı	Yüksek erken dayanım İyi düzeyde geç dayanım	İyi sülfat, aşınma, alkali silika ve yangın direnci	Uçucu kül kaynağına bağlı performans değişimi
AAS	Aynı ya da daha hızlı	Düşük erken dayanım İyi düzeyde geç dayanım	İyi sülfat, korozyon, aşınma, alkali silika ve yangın direnci	Cüruf kaynağına bağlı performans değişimi

Tablo 3. Yeni nesil çimentoların geleneksel Portland çimentosuna kıyasla özellikleri [55]

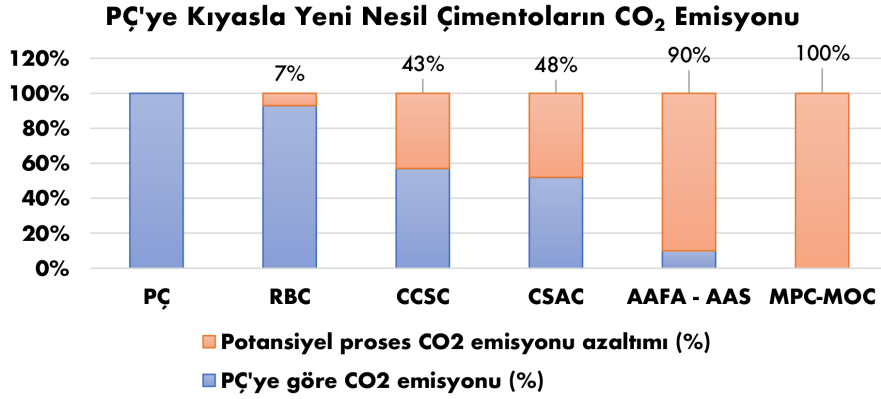
Teknoloji	CO ₂ azaltma potansiyeli	Ham maddenin bulunabilirliği	Enerji ihtiyacı	Su ihtiyacı
AAFA / AAS	>90%	değişken	değişken	düşük
CCSC	>70%	yüksek	düşük	düşük
CHSC	>50%	yüksek	düşük	-
CSAC	~50%	limitli	düşük	düşük
LC ³	>30%	değişken	düşük	değişken
MPC-MOC	>100%	değişken	-	-
RBC	~10%	yüksek	düşük	düşük

Her bir yeni nesil çimento için uygulamala alanları büyük ölçüde değişmektedir. Tablo 4'te yeni nesil çimentoların literatüre geçmiş uygulama alanları belirtilmiştir.

Tablo 4. Yeni nesil çimentoların rapor edilmiş uygulama alanları [54]

Yeni Nesil Çimentolar	Uygulama Alanları
Kalsiyum sülfat çimentosu	Yapısal betonlar, prekast beton, soğuk havada beton uygulamaları
Magnezyum oksiklorür çimentosu	Onarım uygulamaları, duvar panelleri
Magnezyum fosfat çimentosu	Nükleer atık katılaştırma, hızlı onarım uygulamaları, yangına dirençli kaplamalar
Alkali ile aktive edilmiş uçucu kül çimentosu	PÇ ile aynı
Alkali ile aktive edilmiş yüksek fırın cürufu çimentosu	PÇ ile aynı

Şekil 3'te yeni nesil çimentoların PÇ'ye kıyasla CO₂ emisyonu performansı görülmektedir. Az ya da çok tüm alternatif çimentoların karbon ayak izi PÇ'ye oranla daha düşüktür.



Şekil 3. PÇ'ye kıyasla yeni nesil çimentoların CO₂ emisyonu [55]

3. YENİ NESİL ÇİMENTOLARIN KULLANIMI

Portland çimentosunun yerine yeni nesil çimentoları güvenli ve etkili bir şekilde kullanmak için bu yeni teknolojilerin geleneksel PÇB teknolojisinden ne kadar farklı olduğu dikkate alınmalıdır. Çoğu zaman bu farklılıklar küçüktür ve kolayca uyum sağlanabilmektedir. Yine de bazı durumlarda farklılıklar önemli olabilir ve inşaatta gecikmelere, maliyet aşımalarına, öngörülemez risklere ve kabul edilemez performans gibi daha ciddi endişelere neden olabilmektedir. En kötü durumda ise üretilen beton gerekli tasarım özelliklerini karşılamadığında can güvenliği sorunları ortaya çıkabilmektedir. Bu bölümde yeni nesil bir çimento kullanmadan, bu çimento ile beton tasarlamadan ve inşa etmeden önce dikkate alınması gereken önemli hususlar listelenmiştir. Bu liste, tüm soru ve endişeleri ele almasa da alternatif bir çimentoyu belirlemeden veya inşaatta alternatif bir çimento ile çalışmadan önce bilgili uzmanlarla bir diyalog kurmaya yardımcı olmak için faydalı olacağı düşünülmektedir. Kullanıcı ve/veya beton üreticisi, bu yeni çimentoların inşaatta kullanımında Portland çimentosu betonunu onaylarken yaptığı gibi temel özellikleri doğrulamak için test karışımları geliştirmelidir.

3.1. Tasarım

3.1.1. Dayanım

PÇB'de basınç dayanımı beton karışımının su/çimento oranına (w/c) doğrudan bağlıdır. Bazı yeni nesil çimentolarda su/çimento oranı ve dayanım arasında benzer bir ilişki vardır ancak bazılarında ise su sadece reaksiyon için bir ortam görevi görür ve dayanımı doğrudan etkilememektedir. Çoğu durumda nihai dayanım, yeni nesil çimentonun formülasyonu ile belirlenmektedir.

3.1.2. İşlenebilirlik

Dayanımın su/çimento oranına bağlı olması nedeniyle PÇB'de dayanım ve işlenebilirlik arasında dolaylı bir ilişki bulunmaktadır. Artan suyun yeni nesil çimento betonunun

işlenebilirliğini artıracakları anlaşılrsa da eklenebilecek toplam suyu sınırlayan başka faktörler de olabilir. Bazı durumlarda karışımın akışkanlığı çok yüksek olabilir ve bu nedenle azaltılmalıdır. Yeni nesil çimento betonu karışımının işlenebilirliğinin nasıl ayarlanacağını anlamak bir zorunluluktur.

İşlenebilirlik ile ilgili olarak aşağıdaki sorular cevaplanmalıdır:

- Su azaltıcı katkıları, seçilen yeni nesil çimento betonunda PÇB'deki gibi aynı etkiye mi sahip?
- Belirli su azaltıcıları ile yeni nesil çimento arasında uyum sorunları var mı?
- Yüksek oranda su azaltıcıları tavsiye ediliyor mu veya gerekli mi?
- Akışkanlığı azaltmanın herhangi bir yolu var mı?
- İşlenebilirlik yeni nesil çimento formülasyonu tarafından belirleniyorsa, gerekli işlenebilirlik nasıl belirlenir? Portland çimentosu betonundaki gibi yayılma ve çökme testleri kullanılıyor mu?
- Belirli bir işlenebilirlik, PÇB'deki kıvam koruma gibi, ne kadar süreyle korunabilir? Betonun yerleştirme, sıkıştırma ve bitirme süresi katkı maddeleri veya başka yollarla uzatılabilir mi?
- Çevre şartları kullanılan yeni nesil çimentonun kullanımı için uygun mu? (sıcaklık, nem vb...)

3.1.3. Agregalar

Genellikle yeni nesil çimentolar doğal agregalar ile uyumludur. Yapay agrega üretmek için bu çimentolar da kullanılabilir. Agreganın performansının test karışımları yoluyla doğrulanması önemlidir. En önemli potansiyel sorun, dayanım ve geçirgenliği etkileyebilecek yeni nesil çimento hamuru ve agreganın kalitesidir. Bir diğer potansiyel sorun ise alternatif çimentonun alkali-silika reaksiyonu (ASR) açısından performansdır. Eğer eş değer alkali içeriği yüksek ise reaktif agregalardan kaçınılması gerekmektedir.

3.1.4. Kimyasal Katkılar

Yeni nesil çimentolar ve kimyasal katkıları arasındaki uyumluluk karışım performansı açısından incelenmesi gereken bir konudur. Çoğu durumda bilindik kimyasal katkıları, Portland çimentosu betonunda olduğu gibi yeni nesil çimentolarda da aynı işlevi görür. Yine de bu konuda üretici ile görüşülmeli ve test karışımları ile performansı kontrol edilmelidir.

3.1.5. Geçirimsizlik

Portland çimentosu betonunda geçirimsizlik, su/çimento oranından güçlü bir şekilde etkilenir. Bu ilişki yeni nesil bir çimento için de geçerli midir? Değilse, kullanıcı geçirgenliği nasıl değerlendirmelidir? Genel olarak, alternatif çimentolu betondaki geçirgenliği PÇB ile nasıl karşılaştırılır? Geçirgenlik, kılcal su emme veya hızlı klorür penetrasyon testi gibi geleneksel testlerle ölçülebilir mi? Tüm bu soruları doğru bir şekilde cevaplamak için kullanıcı çimento üreticisine danışmalıdır.

3.1.6. Donma-Çözülme

Genelde yeni nesil çimento karışımları Portland çimentosu karışımlarına göre daha az geçirgendir. Geçirimin düşük olması betonun donma ve çözölmeye karşı daha dirençli olmasını sağlar. Diğer özelliklerde olduğu gibi bu durum gerekli testler ile doğrulanmalıdır. Mevcut PÇB testleri bazı yeni nesil çimentoların farklı kür yöntemleri olması nedeniyle

uygulanabilir olmayabilir. Ayrıca, testler çoğu zaman gerçek koşulları tam olarak karşılamayabilir. Beton endüstrisi, test sonuçları ile gerçek saha performanslarını ilişkilendirme deneyimine sahiptir. Alternatif çimentolu betonlarda aynı düzeyde deneyim mevcut değildir. Bu nedenle, donma ve çözülmeye karşı direnç en iyi şekilde saha testi ile belirlenebilir. Karışımın donma ve çözülmeye karşı direncini belirlemek için üreticiye danışmak veya diğer uygulamaları incelemek gerekmektedir.

Başka bir soru, hava sürüklenmesi ihtiyacına odaklanır. Hamurun geçirgenliği önemli ölçüde düşükse, hava sürüklenmesi gerekli midir? Donma ve çözülmeye karşı direncin önemli olduğu çoğu yapıda hava içeriği belirtilir. Hava sürüklenmesi gerekiyorsa, hangi hava sürükleyici katkıların etkili olduğunu ve varsa hangilerinin etkili olmadığını belirlemek önemlidir. Donma ve çözülmeye karşı direnç, yeni nesil çimentolu beton karışımlarının fonksiyonel performansının daha fazla araştırılması gereken bir alandır.

3.2. Üretim ve Uygulama

Yeni nesil çimentolu betonun priz süresi PÇB'ye oranla önemli ölçüde farklı olabilir. Bu nedenle karıştırılabilecek ve yerleştirilebilecek beton harmanının (tek seferde üretilen hacim) miktarı da farklı olabilir. Betonun yerleştirmek, sıkıştırmak ve bitirmek için gerekli zaman limitine uygun bir şekilde maksimum harman miktarını belirlemek önemlidir. Bu nedenle gerekli karıştırma süresini ve prosedürlerini anlamak ve faktörleri belirlemek gerekmektedir. Bu faktörler, PÇB'ye kıyasla yeni nesil çimento betonunun üretim oranlarını etkilemektedir.

Yeni nesil çimento hamurunun, Portland çimentosu hamurundan farklı bir viskoziteye sahip olması muhtemeldir ve bu nedenle, üreticiye agrega ayrışmasının (segregasyon) gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini sormak önem arz etmektedir. Üretici bu alanda rehberlik yapmalıdır. Diğer katkılarda olduğu gibi, viskozite ayarlayıcı katkıların performansı kullanımdan önce değerlendirilmelidir. Yeni nesil çimento betonunun vibrasyona (titreşime) karşı nasıl davrandığı önemli bir konudur. Newton tipi olmayan bir akışkan olan beton, kayma hızı ve kayma gerilimi arasında doğrusal olmayan bir ilişkiye sahiptir. Bir betonun çimento fraksiyonunun özelliklerini değiştirmek, titreşime tepkiyi önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, yerleşimini etkileyebilecek veya ayrışmaya yol açabilecek herhangi bir konsolidasyon yöntemini belirlemek için önceden test yapılmalıdır.

Derzlerin kesilmesi dahil betonun bitirilmesinde doğru zamanlama önemlidir. Yeni nesil çimentolar için gözlemlenen priz süreleri göz önüne alındığında beton üretim hızını ve betonun yerleştirme operasyonunu etkileyecek olan bitirme süreci aralığı belirlenmelidir.

Portland çimentosu reaksiyonları gibi, yeni nesil çimento reaksiyonları da ekzotermiktir yani ısı oluştururlar. Bazı durumlarda alternatif çimentolardaki ısı gelişimi temas eden kişilerde yanıklara neden olabilir. Benzer şekilde, alkali ile aktive edilmiş malzemeler, oldukça yakıcı olan ve ciddi kimyasal yanıklara neden olabilecek aktivatörler içerebilir. Bu malzemelerle çalışmak için uygun güvenlik ekipmanı gereklidir ve uygun güvenlik önlemleri uygulanmalıdır.

Kür sürecinin, kaliteli PÇB üretiminde kritik bir adım olduğu iyi bilinmektedir. Yeni nesil çimentolu betonda da uygun kürlenme gereklidir. Ancak, PÇB'den farklı olarak yeni nesil çimentolu betonunun kür koşulları çeşitli zorluklara neden olabilir. Bazı alternatif çimentolar, PÇB'ye benzer şekilde su kürü gerektirse de bazıları ise ısı kürü ve/veya muhtemelen CO₂ ile kür gerektirmektedir. Özel ekipmanlarla gerekli ısıyı sağlamak için buhar gerekebilir.

Diğer bir faktör de kür süresidir. PÇB için 7 günlük su kürü yeterli olabilmektedir. Bazı yeni nesil çimentolu betonlarda kür süresi bir gün veya daha az olabilir. Bu olumlu bir etkidir, çünkü kısa kür süresi üretim ve inşaat sürecini hızlandırır. Kür süreci projeyi olumlu veya olumsuz bir şekilde etkileyebileceğinden dolayı yeni nesil çimento ile üretilen betonu belirlemeden önce tam olarak anlaşılması gereken en önemli faktörlerden biridir.

Dayanım gelişimi kür süreci ile ilişkilidir. Dayanım gelişimi özellikle hareketli kalıpların kullanıldığı projelerde kritik bir konudur. Yeni nesil çimentoların çoğu, Portland çimentosuna göre hızlı dayanım gelişimi oranı ile karakterize edilir. Bu, gerekli testler ile doğrulanacak bir performans faktörüdür.

Dayanım gelişimi ile ilgili ortam sıcaklığının etkisini anlamak önemlidir. Hem sıcak hem de soğuk havadaki uygulamalar tüm çimentolu sistemlerde sınırlamalara neden olmaktadır. Beton aşırı sıcak ve soğuk koşullara veya her ikisine birden sahip bir iklimde kullanılıyorsa en yüksek ve en düşük karışım sıcaklıkları belirlenmelidir.

4. SONUÇ

Yeni nesil çimentolar, inşaat sektörü için heyecan verici fırsatlar sunmaktadır. Bu çimentolar, Portland çimentosundan daha düşük karbon ayak izine ve gömülü enerjiye sahiptirler. Bu nedenle, sürdürülebilirlik açısından değerlendirildikleri zaman daha avantajlı oldukları görülmektedir. Ayrıca, bazı durumlarda Portland çimentosuna göre daha iyi performans sağlamaktadırlar. Günümüzde çok sayıda yeni nesil çimento teknolojisi mevcuttur. Bazıları ticarileşmiş ve inşaat sektöründe kullanılmaya başlamıştır. Bazıları ise hala gelişme aşamasındadır. Yeni nesil çimentolu betonun kullanımında bu malzemenin PÇB ile karşılaştırılıp incelenmesi gerekmektedir. Yani işlevsel eş değerlik kurulmalıdır. Bazı uygulamalarda, alternatif çimentolu beton PÇB yerine doğrudan kullanılabilir. Uzun süreli dayanıklılığın gerekli olduğu zorlu uygulamalarda, kullanıcının tasarım veya yapımdan önce yeterli miktarda test yapması gerekmektedir. Bazı yeni nesil çimentolar, PÇB'ye kıyasla oldukça yenidir ve çok az saha uygulaması örneği bulunmaktadır. Bu da uzun vadeli yeterli miktarda performans verisi bulmayı zorlaştırmaktadır. Zamanla daha fazla deneyimle gerekli tasarım bilgileri elde edilerek ve daha geniş bir uygulama yelpazesinde PÇB'ye alternatif olarak yeni nesil çimentolu beton giderek daha fazla kullanılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Burris, L.; Kurtis, K.; and Morton, T., 2015, "Novel Alternative Cementitious Materials for Development of the Next Generation of Sustainable Transportation Infrastructure," Federal Highway Administration, Washington, DC, 40 pp.
2. Chatterjee, A. K., 1996, "High Belite Cements-Present Status and Future Technological Options: Part I," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 8, pp. 1213-1225. doi: 10.1016/0008-8846(96)00099-3
3. Quillin, K., 2001, "Performance of Belite-Sulfoaluminate Cements," *Cement and Concrete Research*, V. 31, No. 9, pp. 1341- 1349. doi:10.1016/S0008-8846(01)00543-9
4. Klein, A., 1966, "Expansive and Shrinkage-Compensated Cements," U.S. Patent No. 3251701.
5. Su, M.; Wang, Y.; Zhang, L.; and Li, D., 1997, "Preliminary Study on the Durability Sulfo/Ferroaluminate Cements," 10 th International Congress on the Chemistry of Cement, Paper No. 4iv029, Gothenburg, Sweden, June 2-6, 12 pp.
6. DeCristofaro, N.; Meyer, V.; Sahu, S.; Bryant, J.; and Moro, F., 2017, "Environmental Impact of Carbonated Calcium Silicate Cement-Based Concrete," *Proceedings of the 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future*, Zadar, Croatia, Apr. 19-21, 9 pp.
7. Habert, G. Assessing the environmental impact of conventional and 'green' cement production. *Eco-Effic. Constr. Build. Mater.* 2014, 199–238.
8. Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. Sustainable cement production-present and future. *Cem. Concr. Res.* 2011, 41, 642–650.
9. Stemmermann, P.; Schweike, U.; Garbev, K.; Beuchle, G. Celitement—A sustainable prospect for the cement industry. *Cem. Int.* 2010, 8, 52–66.
10. Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cem. Concr. Res.* 2018.
11. Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S. & Maity, S., 2018. Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*.
12. Maity, D. S., Kumar, D. A. & Sharma, K., n.d. Environmental and Resource assessment for uptake of LC3 in India's cement mix.
13. Valek, J.; Hughes, J. J.; and Groot, C., eds., 2012, *Historic Mortars-Characterization, Assessment and Repair*, RILEM, Paris, France, Springer Science & Business Media.
14. Lu, H. P.; Wang, P. L.; and Jiang, N. X., 1994, "Design of Additives for Water-Resistant Magnesium Oxychloride Cement Using Pattern Recognition," *Materials Letters*, V. 20, No. 3-4, pp. 217-223. doi:10.1016/0167-577X(94)90090-6
15. Cole, W. F., and Demediuk, T., 1955, "X-Ray, Thermal and Dehydration Studies on Magnesium Oxychlorides," *Australian Journal of Chemistry*, V. 8, No. 2, pp. 234-251. doi:10.1071/CH9550234
16. Yadav, R. N.; Singh, U.; Gupta, P.; and Sharma, M., 2013, "Influence of Inert Filler on Cementing Properties of Magnesium Oxychloride Cement MOC With MOC Friendly Cement," *Indian Journal of Applied Research*, V. 3, No. 1, pp. 1-3.

17. Yadav, R. N.; Gupta, P.; Chandrawat, M. P. S.; Dagar, N.; and Yadav, R., 2012, "Effect of Temperature of Gauging Solution on Setting Characteristics and Moisture Ingress of Magnesium Oxychloride Cement - An Eco-Friendly Cement," *Journal of Current Chemical and Pharmaceutical Sciences*, V. 2, No. 3, pp. 149- 156.
18. Misra, A. K., and Mathur, R., 2007, "Magnesium Oxychloride Cement Concrete," *Bulletin of Materials Science*, V. 30, No. 3, pp. 239-246. doi: 10.1007/s 1 2034-007-0043-4
19. Walling, Sam & Provis, John. (2016). *Magnesia-Based Cements: A Journey of 150 Years, and Cements for the Future?*. *Chemical Reviews*. 116. 10.1021/acs.chemrev.5b00463.
20. Lea, F. M., In Hewlett, P. C., & In Liska, M. (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete*.
21. Odler, I. (2000). *Special Inorganic Cements*.
22. Van Jaarsveld, J. G. S.; Van Deventer, J. S. J.; and Lukey, G. C., 2003, "The Characterisation of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers," *Materials Letters*, V. 57, No. 7, pp. 1272- 1280. doi:10.1016/S0 167-577X(02)00971-0
23. Hardjito, D.; Wallah, D. M.; Sumajouw, J.; and Rangan, B. V., 2004, "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 101, No. 6, Nov.-Dec., pp. 467-472.
24. Diaz-Loya, E. 1.; Allouche, E. N.; and Vaidya, S., 2011, "Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 108, No. 3, pp. 300-306.
25. Wastiels, J.; Wu, X.; Faignet, S.; and Patfoort, G., 1994, "Mineral Polymer-Based on Fly Ash," *The Journal of Resource Management and Technology*, V. 22, pp. 135-141.
26. Fernandez-Jimenez, A., and Palomo, A., 2003, "Activating FLY-Ashes: Enlarging the Concept of Cementitious Material," *Role of Concrete in Sustainable Development - International Symposium Celebrating Concrete: People and Practice*, Dundee, UK, Thomas Telford Services Ltd., London.
27. Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, A.; and Lopez-Bombrados, C., 2006, "Engineering Properties of Alkali-Activated Fly Ash Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 103, No. 2, Mar.-Apr., pp. 106- 112.
28. Palomo, A., and Lopez dela Fuente, J. 1., 2003, "Alkali Activated Cementitious Materials: Alternative Matrices for the Immobilization of Hazardous Wastes-Part I, Stabilization of Boron," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 2, pp. 285-295.
29. Douglas, E., and Brandstetr, J., 1990, "A Preliminary Study on the Alkali Activation of Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Cement and Concrete Research*, V. 20, No. 5, pp. 746-756. doi:10.1016/0008-8846(90)90008-L
30. Wang, S., and Scrivener, K. L., 1995, "Hydration Products of Alkali-Activated Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, V. 25, No. 3, pp. 561-571. doi:10.1016/0008-8846(95)00045-E
31. Fernandez-Jimenez, A.; Palomo, J. G.; and Puertas, F., 1999, "Alkali-Activated Slag Mortars: Mechanical Strength Behaviour," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 8, pp. 1313- 1321. doi:10.1016/S0008-8846(99)00154-4

32. Brough, A. R., and Atkinson, A., 2002, "Sodium Silicate Based, Alkali-Activated Slag Mortars: Part I-Strength, Hydration and Microstructure," *Cement and Concrete Research*, V. 32, No. 6, pp. 865-879. doi:10.1016/S0008-8846(02)00717-2
33. Wang, S.; Scrivener, K. L.; and Pratt, P. L., 1994, "Factors Affecting the Strength of Alkali-Activated Slag," *Cement and Concrete Research*, V. 24, No. 6, pp. 1033-1043. doi:10.1016/0008-8846(94)90026-4
34. Shi, C.; Krivenko, P.; and Roy, D. M., 2006, *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis Group, Abingdon, UK.
35. Douglas, E.; Bilodeau, A.; and Malhotra, V. M., 1992, "Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 5, pp. 509-516.
36. Gifford, P. M., and Gillott, J. E., 1996, "Alkali-Silica Reaction (ASR) and Alkali-Carbonate Reaction (ACR) in Activated Blast Furnace Slag Cement (ABFSC) Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 1, pp. 21-26. doi:10.1016/0008-8846(95)00182-4
37. Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; and Cheng, Y. B., 2003, "Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Acid Attack," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 10, pp. 1607-1611. doi:10.1016/S0008-8846(03)00125-X
38. Shi, C., 1996, "Strength, Pore Structure and Permeability of Alkali-Activated Slag Mortars," *Cement and Concrete Research*, V. 26, No. 12, pp. 1789-1799. doi: 10.1016/S0008-8846(96)00174-3
39. Collins, F. G., and Sanjayan, J. G., 1999, "Workability and Mechanical Properties of Alkali-Activated Slag Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 3, pp. 455-458. doi:10.1016/S0008-8846(98)00236-1
40. Oh, J. E.; Monteiro, P. J. M.; Jun, S. S.; Choi, S.; and Clark, S. M., 2010, "The Evolution of Strength and Crystalline Phases for Alkali-Activated Ground Blast Furnace Slag and Fly Ash-Based Geopolymers," *Cement and Concrete Research*, V. 40, No. 2, pp. 189-196. doi:10.1016/j.cemconres.2009.10.010
41. Chi, M., 2012, "Effects of Dosage of Alkali-Activated Solution and Curing Conditions on the Properties and Durability of Alkali-Activated Slag Concrete," *Construction & Building Materials*, V. 35, pp. 240-245. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.005
42. Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; and Cheng, Y. B., 1999, "Effect of Elevated Temperature Curing on Properties of Alkali-Activated Slag Concrete," *Cement and Concrete Research*, V. 29, No. 10, pp. 1619-1625. doi:10.1016/S0008-8846(99)00143-X
43. Puertas, F.; Martinez-Ramirez, S.; Alonso, S.; and Vazquez, T., 2000, "Alkali-Activated Fly Ash/ Slag Cements: Strength Behaviour and Hydration Products," *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 10, pp. 1625-1632. doi:10.1016/S0008-8846(00)00298-2
44. Thomas, R. J.; Howe, A.; and Peethamparan, S., 2014, "Alkali-Activated Cement-Free Concrete: Development of Practical Mixtures for Construction," 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, Jan.12-16.
45. Collins, F. G., and Sanjayan, J. G., 2000, "Cracking Tendency of Alkali-Activated Slag Concrete Subjected to Restrained Shrinkage," *Cement and Concrete Research*, V. 30, No. 5, pp. 791-798. doi:10.1016/S0008-8846(00)00243-X

46. Melo Neto, A. A.; Cincotto, M. A.; and Repette, W., 2008, "Drying and Autogenous Shrinkage of Pastes and Mortars with Activated Slag Cement," *Cement and Concrete Research*, V. 38
47. Duran Atis, C.; Bilim, C.; Celik, O.; and Karahan, O., 2009, "Influence of Activator on the Strength and Drying Shrinkage of Alkali-Activated Slag Mortar," *Construction & Building Materials*, V. 23, No. 1, pp. 548-555. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.011
48. Gifford, P. M., and Gillott, J. E., 1996a, "Freeze-Thaw Durability of Activated Blast Furnace Slag Cement Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 93, No. 3, May-June, pp. 242-245.
49. Yang, C.; Pu, X.; and Wu, F., 1999, "Studies on Alkali Silica Reaction (ASR) Expansions of Alkali- Activated Slag Cement Mortars," 2nd International Conference on Alkaline Cements and Concretes, P. V. Krivenko, ed., Kiev, Ukraine, pp. 101-108.
50. Bakharev, T.; Sanjayan, J. G.; and Cheng, Y. B., 2001, "Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Alkali Aggregate Reaction," *Cement and Concrete Research*, V.31, No. 2, pp. 331-334. doi:10.1016/S0008-8846(00)00483-X
51. Lloyd, R. R.; Provis, J. L.; and van Deventer, J. S. J., 2010, "Pore Solution Composition and Alkali Diffusion in Inorganic Polymer Cement," *Cement and Concrete Research*, V. 40, No. 9, pp. 1386-1392. doi:10.1016/j.cemconres.2010.04.008
52. Christiansen, M. U., 2013, "An Investigation of Waste Glass-Based Geopolymers Supplemented with Alumina," PhD in Civil Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan Technological University.
53. Redden, R., and Neithalath, N., 2014, "Microstructure, Strength, and Moisture Stability of Alkali-Activated Glass Powder-Based Binders," *Cement and Concrete Composites*, V. 45, pp. 46-56. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.011
54. ACIITG-10R-18 Practitioner's Guide for Alternative Cements, Reported by ACI Innovation Task Group 10
55. Lehne, J., and Preston, F., 2018, Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete, The Royal Institute of International Affairs



TÜRKCİMENTO

Tepe Prime A Blok Kat: 18-19
Eskişehir Devlet Yolu
(Dumlupınar Bulvarı) 9. km
No: 266 06800 Ankara
T : 444 50 57 - F : 0 (312) 265 09 06-05
www.turkcimento.org.tr - info@turkcimento.org.tr



@turkcimento