

Derleme Makale/Review Article

Nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarına etkisi

Necip Altay Eren ¹

¹Gaziantep Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 27310, Gaziantep, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Geopolimer
Nano-malzemeler
Termal davranış

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 24.12.2022
Kabul Tarihi: 13.09.2023

Öz: Bu araştırma kapsamında geopolimer beton karışımında kullanılan nano-malzemeler ve bu malzemelerin geopolimer betonun termal davranışları üzerine etkileri konusunda yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir. Geopolimer çevre dostu, ekonomik ve dayanıklı bir malzemedir. Son yıllarda, geopolimer betonun termal davranışları üzerinde yapılan çalışmalar artmaktadır. Yapılan çalışmalarda geopolimer betonun termal davranışlarını geliştirmek amacıyla geopolimer beton karışımlarda çeşitli nano-malzemeler kullanılmıştır. Bu nano-malzemelerin bazıları endüstriyel atık malzemesidir. Bu malzemeler geopolimer karışımlarda kullanıldığı için bu malzemelerin depolanma sorunu ve bu malzemelerden kaynaklı oluşacak çevre sorunlarının çözümüne katkı sağlamaktadır. Geopolimerde kullanılan nano-malzemenin türü, kullanım oranı, kütleme şartları, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve maruz kalma süresi geopolimerin termal davranışını etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda genellikle kullanılan bu nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışlarını geliştirdiği tespit edilmiştir.

Atıf için/To Cite:

Eren N.A. Nano-malzemelerin Geopolimer Betonun Termal Davranışlarına Etkisi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 15(2), 80-94, 2023.

The Effects of nanomaterials on the thermal behavior of geopolymer concrete

Keywords

Geopolymer
Nano-materials
Thermal behaviour

Article history:

Received: 24.12.2022
Accepted: 13.09.2023

Abstract: Within the scope of this research, studies on nano-materials used in geopolymer concrete mixtures and their effects on the thermal behavior of geopolymer concrete are reviewed and summarized. Geopolymer is an environmentally friendly, economical and durable material. In recent years, studies on the thermal behavior of geopolymer concrete have been increasing. In these studies, various nano-materials were used in the geopolymer concrete matrix to improve the thermal behavior of geopolymer concrete. In addition, some of these nano-materials are industrial waste materials. Since these materials are used in geopolymer mixtures, it contributes to the solution of the storage problem of materials and environmental problems that may arise from these materials. The type of nano-material used in the geopolymer, its ratio, curing conditions, temperature and exposure time affect the thermal behavior of the geopolymer. In the studies conducted, it has been determined that these nano-materials generally improve the thermal behavior of geopolymer concrete.

1. Giriş

Beton, dünyada sudan sonra en çok kullanılan ikinci malzeme olup, inşaat sektöründe büyük miktarlarda ve her geçen gün daha fazla miktarda kullanılmaya devam edilmektedir [1]. Çimento üretim süreçlerinden biri de karbonun kalkerden ayrılmasıdır. Bu işlem nedeniyle havaya önemli miktarda sera gazı (CO₂ vb.) salınması, kirliliğin artmasına ve küresel ısınma sorununun artmasına neden olmaktadır. Emisyon analizleri, CO₂

salınımının artmasında çimento üretiminin (kalsinasyon yoluyla %54 ve yakıt tüketerek %46) önemli etkisi olduğunu göstermiştir [2]. Günümüzde sera gazı salınımı, çevre kirliliğinin en ciddi sebeplerinden biridir. Bu nedenle inşaat sektöründe çimento kullanımının azaltılması gerekmektedir. CO₂ salınımlarını azaltmak için inşaat sektöründe çevre dostu malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yeni alternatif malzemeler araştırılmaktadır.

* İlgili yazar/Corresponding author: altayeren@gantep.edu.tr

Metakaolin, cüruf, uçucu kül ve alkali çözeltisi gibi zengin alümin silikat malzemelerden elde edilebilen çevre dostu bir beton olan Geopolimer beton inşaat sektörü için alternatif malzemelerden biridir. Geopolimer beton son yıllarda ilgi görmüş ve Portland çimentosuna bir alternatif olarak değerlendirilebilir [3,4,5]. Geopolimer kompozitlerin üretimi daha düşük karbon ayak izine sahiptir ve Portland çimentosu üretiminden daha az enerji kullanır. Son zamanlarda, kompozitin özelliklerini iyileştirilmiş performanslarla geliştirmek için geopolimer kompozitlere farklı tipte nano-malzemenin dahil edilmesi için çaba sarf edilmektedir. Nano-teknoloji, özellikle son yirmi yılda giderek dikkat çeken yeni bilim ve değerli uygulamalara sahip en aktif araştırma alanlarından biridir [6].

Geopolimerlerle ilgili makalelerin katlanarak artması, geopolimerlerin geleneksel çimentoya önemli bir alternatif olarak uygulanabilirliğinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. Geopolimer, termal stabilite ve yangın direncinde gelişmiş performanslar sergilediği tespit edilen son teknoloji ürünü inorganik bir malzemedir.

Günümüzün önemli ekolojik sorunlarından biri de endüstriyel atık ürün malzemelerinin düzenli depolama, doğal kaynak tüketimi ile çevreye yük oluşturmada ve çevre kirliliğini arttırmaktadır. Bu atık ürünlerin bazıları örneğin silika dumani, uçucu kül ve cüruf gibi beton teknolojisi uygulamalarında yeniden kullanılabilir ve bu sayede çevre kirliliğinin azaltılmasında yardım eder ve atık sorunlarının yönetilmesine katkıda bulunur. Bazı endüstriyel yan ürünler, araştırmacılar tarafından çimentoya alternatif olarak kullanılmıştır [7]. Ayrıca bu yan ürünler betonun akışkanlığını, işlenebilirliğini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılır [8-11]. %100 öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külün betonun mekanik özellikleri, ekonomi ve çevre üzerinde olumlu etkileri vardır [12, 13].

Nano-teknoloji, inşaat mühendisliği alanında henüz başlangıç aşamasında olan yenilikçi ve gelişen bir bilim dalıdır. Nano-malzemeler kullanılarak geleneksel çimentolu betonun performansını artırmak için kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar, nano-malzemenin geopolimer betonun geopolimerizasyonu ve mikro yapıyı geliştirdiğini göstermiştir [14]. Sonuç olarak, olağanüstü özellikleri sayesinde betonun mikro yapısını iyileştirdiği, çimento betonunun taze ve sertleşmiş özelliklerini iyileştirdiği bilinen nano-malzemeler, çimentolu malzemelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Nano-malzemelerin geopolimer beton karışımlarına dahil edilmesinin geopolimerizasyon reaksiyonu ve geopolimer betonun termal davranışları üzerindeki

etkilerini anlamak için şimdiye kadar bazı çalışma yapılmıştır.

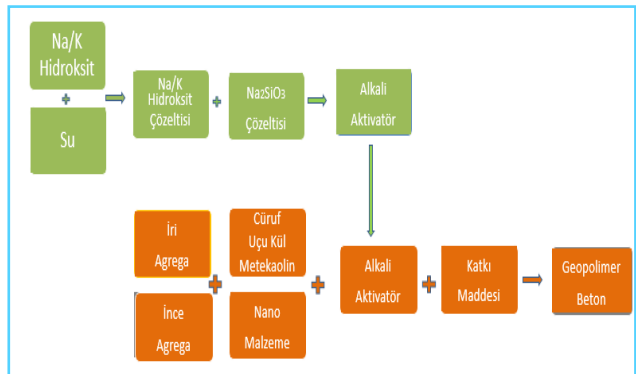
Günümüzde sera gazı salınımı, çevre kirliliğinin en ciddi sebeplerinden biridir. Çimento üretimi havaya önemli miktarda sera gazı (CO₂ vb.) salınması, kirliliğin artmasına ve küresel ısınma sorununu arttırmaktadır. Ayrıca, çevre kirliliğine neden olan bir diğer durumda saniyede yan ürün olarak ortaya çıkan malzemelerdir.

Bu çalışmada geopolimer betonun özelliklerini geliştirmek için kullanılan nano-malzemenin bazıları sanayiden elde edilen atık malzemelerdir. Bu malzemeler geopolimer beton karışımlarında kullanılarak hem geopolimer betonun geliştirilmesine hem de bu malzemelerin depolanma sorununa ve depolandığında çevreye vereceği zarar önlenmiş olacaktır. Bu makalenin amacı; çeşitli nano-malzemelerin geopolimer betonun termal davranışı üzerine etkilerini belirlemek için yapılan çalışmaların kapsamlı bir incelemesini sunmaktır.

2. Malzemeler

2.1 Geopolimer

Geopolimer, kovalent bağlarla bağlı mineral molekül ağları ile karakterize edilen inorganik seramik malzemelerdir. Geopolimer elde etmek için alüminosilikate ve aktif alkali bağlayıcıya ihtiyaç vardır. Silika ve alümina açısından zengindirler ve alkali çözelti ile reaksiyona girerler ve beton için bağlayıcı malzeme görevi gören alümin silikat jel üretirler. Aşağıdaki Şekil-1'de Geopolimer üretim prosedürü şema olarak verilmiştir.



Şekil 1. Geopolimer Beton Üretim Şeması

2.2 Geopolimerizasyon Süreci

Polimerizasyon aslında Şekil-2'de görüldüğü gibi küçük moleküllerin büyük zincir şeklinde veya üç boyutlu makro moleküller ürettiği bir dizi kimyasal reaksiyondur. Aynı zamanda, tüm bu reaksiyonlar ekzotermiktir. Bazı araştırmacılara göre, bu malzeme

gerçekten de zeolittir, ancak geopolimer ve zeolitin ana ayırt edici özelliği moleküler yapılarıdır. Geopolimerler amorf veya yarı kristal moleküler yapıya sahipken, zeolitler ters kristal yapıya sahiptir ancak sentez yöntemleri aynıdır. Geopolimerizasyon üç ana adımda özetlenebilir [16]:

- Alkalın bir çözeltinin etkisi altında alümin silikatların çözeltisi
- Yeniden yönlendirme
- Katılaşma



Şekil-2 Tipik Geopolimerizasyonun şematik taslağı[17]

3. Bağlayıcılar

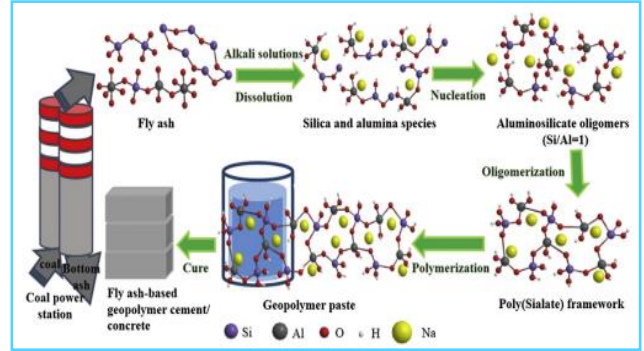
Geopolimer betonun termal davranışları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde; alümin silikat kaynak malzemesi olarak Uçucu Kül, Cüruf ve Metakaolin kullanıldığı tespit edilmiştir.

3.1 Uçucu Kül

Uçucu kül, kömürlü termik santrallerin bacalarından gazlar ile kazandan dışarı atılan ince partiküllerden oluşan katı atık bir malzemedir. Yakılan kömürün kaynağına bağlı olarak, uçucu külün bileşenleri önemli ölçüde değişir. Genel olarak, uçucu külün bileşenleri tipik olarak amorf ve kristal oksitler veya çeşitli mineral formunda bulunan SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve Fe_2O_3 'ü içerir. "American Society for Testing and Materials" standardı C618'e (ASTM C618-12a, 2012) göre uçucu kül, kalsiyum oksit içeriklerine göre C Sınıfı ve F Sınıfı olarak sınıflandırılabilir.

Şekil-3'te uçucu kül bazlı geopolimer betona geçiş sürecinin şematik gösterimi verilmektedir. Uçucu kül esaslı geopolimer beton iki malzemeden elde edilmektedir: Uçucu kül ve alkali aktivatör. Genel olarak, uçucu kül santralden elde edildiği gibi başka bir işleme gerek olmadan kullanılmaktadır. Karışımda alkali aktivatör olarak kullanılan sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri sanayide üretilebilmektedir. Uçucu kül, bir alkali aktivatörün etkisi altında depolimerize olabilen çok sayıda amorf silika alüminyum yapılardan

oluşur ve geopolimerler gibi belirli koşullar altında inorganik jel malzemeleri üretmek için kullanılabilir [18]. Ayrıca, uçucu kül bazlı geopolimerlerin hazırlanması ve uygulanması önemli ekonomik ve çevresel faydalara sahiptir. Uçucu kül, sentetik geopolimerler için bir hammadde olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geopolimer betona, uçucu kül kullanıldığı zaman betonun yapısal dayanımını ve tekdüzeliğini önemli ölçüde artırır [19]. Geopolimerizasyon sırasında sodyum alümin silikat jeli üretmek için alkali çözelti uçucu küldeki SiO_2 ve Al_2O_3 ile reaksiyona girer [20,21].



Şekil-3 Uçucu kül bazlı geopolimer betona geçiş sürecinin şematik gösterimi [22]

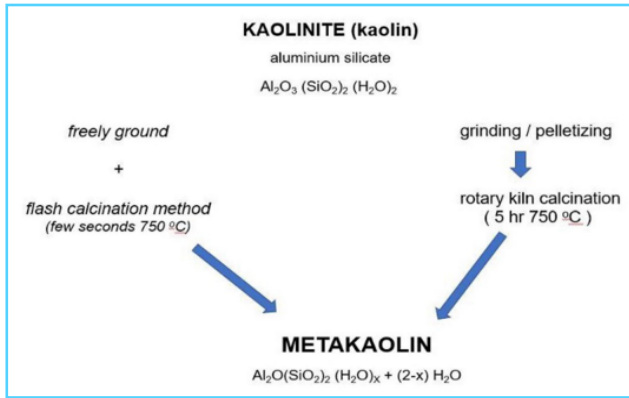
3.2 Cüruf

ASTM'ye göre, cüruf, demir fırında erimiş halde iken elde edilen bir yan üründür. Aynı zamanda, cüruf silikatlar ve kalsiyum gibi metalik olmayan bazların alümina silikatlarından oluşan bir ürün olarak tarif edilebilir. Yüksek fırın cürufu iki türdür: havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu ve granüle yüksek fırın cürufu. Cüruf yüksek kalsiyuma sahiptir, çimento hidratasyonu sırasında meydana gelen benzer kalsiyum silikat hidrat jeli (C-S-H) oluşmaktadır. Cüruf esaslı geopolimer beton, çimento esaslı betona göre asit ve diğer kimyasallara daha dayanıklıdır. Bunun sebebi, cüruf esaslı geopolimer beton kür ve aktivatör şartlarına bağlı olarak, 1000-1200 °C sıcaklığa maruz kalsa bile içyapısında bozulmalar göstermemektedir [23]. Bundan dolayı, agrega genişlemesi az, sülfat, korozyon ve donma-çözülme dayanıklılığı yüksek geopolimerler üretmek mümkündür. Geopolimer betonlardaki Si:Al oranına bağlı olarak dayanımda ve elastik modülünde farklılıklar oluşmaktadır. Örneğin; basınç dayanımı 100 MPa varan veya 4 saatte oda sıcaklığında 20 MPa basınç dayanıma ulaşan örnekler vardır. Ayrıca, bazı geopolimer betonlar oda sıcaklığında priz alabilir ve dayanım kazanabilir. Ayrıca, geopolimer betonların çimentolu betonların basınç dayanımlarına ulaşabilmesi için literatürde birçok çalışma mevcuttur [23].

Kalsiyum içeriği az olan örneklerde geopolimer olarak tanımlanırken, yüksek kalsiyum içeriğine sahip cüruf gibi örnekler alkali aktive olarak tanımlanmaktadır. Ancak farklı türlerde metal cüruf, asit çözeltileri veya farklı aktivatörler içeren geopolimerlerde vardır [23].

3.3 Metakaolin

Şekil-4'te üretim şeması verilen Metakaolin kaolinden elde edilen ve betonda kullanılan çok etkili puzolanik ve bir tür susuz alüminosilikat malzemedir. Metakaolin, diğer tamamlayıcı çimentomu malzemelerin aksine, endüstriyel bir yan ürün değildir. Doğal olarak oluşan minerallerden elde edilir ve renk, yüksek derecede saflık ile parçacık boyutu ve puzolanik reaktivite gibi fiziksel özelliklerini iyileştirmek için dikkatle kontrol edilen koşullar altında üretilir. Metakaolin, zengin bir Al_2O_3 kaynağıdır ve SiO_2 , alkanin aktivatörlerle yüksek reaktivite gösterir ve bu nedenle geopolimerizasyon sürecini hızlandırır. Metakaolin bazı geopolimerinin basınç dayanımı ve mikro yapısının gelişimi büyük ölçüde Si:Al ve Na:Al molar oranlarına bağlıdır [24-26]. Metakaolinin geopolimerizasyon reaksiyonu, farklı deneysel teknikler ile birçok çalışmada kullanılmıştır.



Şekil-4 Metakaolin Üretim Şeması [27]

4. Nano-Malzemeler

Nano teknolojik malzemelerin betonun özelliklerini önemli ölçüde artırması inşaat sektörünü geliştirmiştir. Ultra ince parçacık boyutlarından dolayı nano-malzemeler benzersizdir ve fiziksel ve kimyasal özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmiştir. Nano-partiküller, homojen bir şekilde dağılma yeteneklerinden dolayı bağlayıcı harcın mikro yapısını ve mukavemet özelliklerini iyileştirir. Şekil-5'te gösterildiği gibi Nano-silika (nano- SiO_2), nano-alümina (nano- Al_2O_3), nano-titanyum dioksit (nano- TiO_2), nano-ZnO ve nano-kil genellikle geleneksel çimento betonunda performans artırıcı olarak kullanılır. Genel olarak, nano-malzeme içeren betonlar, nano-malzeme içermeyen betonlara göre kıyasla önemli ölçüde daha iyi dayanım özellikleri gösterir. Özelliklerdeki iyileşmenin nedenleri şunlar olabilir: nano-parçacıklar

mükemmel bir dolgu maddesi olarak işlev gördüğünden, beton matris yapısını nano düzeyde manipüle ederler ve daha yoğun bir yapıya sahip mikro yapılar oluşmasına neden olurlar. Yapılan araştırmalar incelendiğinde; alümin silikat kaynak malzemelerinin bileşimi ve çeşitli çalışmalarda kullanılan nano-malzemelerin kimyasal birleşenleri Tablo-1'de, incelenen çalışmalarda kullanılan veriler ve elde edilen termal davranış sonuçları Tablo-2'de verilmiştir.



Şekil-5 Termal Kararlılık İçin Geopolimer Karışımlarda Kullanılan Nano-Malzemeler

4.1 Nano-Silika

Nano-silika, reaktif puzolanlar ve gözenek doldurma etkisi nedeniyle betonun özelliklerini iyileştirmek için yaygın geopolimerlerde en yaygın kullanılan nano-malzemedir [41, 42]. Kristal ve amorf formlarda silikon dioksitten (SiO_2) oluşur. Nano silika parçacıklarının boyutu, çeşitli silika bazlı nanomalzeme ürünleri türleri için 5-658 nm arasında değişmektedir [43, 44]. Nanosilika ilavesi sadece polimerizasyon reaksiyonunu hızlandırmakla kalmaz, aynı zamanda doğal puzolan bazlı polimerlerde kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) ve sodyum alüminosilikat hidratların (N-A-S-H) gelişimini de destekler [45]. H.M. Khater, Alaa M. Rashad, Kang Gao, Z. Zidi, M.F. Zawrah ve T. Revathi yaptıkları çalışmalarda; geopolimer karışıma belirli miktarda nano-silika eklenmesi, nano-silika karışımın gözenek yapısını azaldığı için karışımın termal davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğunu tespit edilmiştir [28-33].

4.2 Nano-Kil

Nano-killer, katmanlı mineral silikatların nano-parçacıklarıdır. Kimyasal bileşime ve nanoparçacık morfolojisine bağlı olarak, nano-killer montmorillonit, bentonit, kaolinit, hektorit ve halloysit gibi birkaç sınıfa ayrılır.

Nano-malzemeler, polimerizasyon işleminin yoğunluğunu ve hidrasyonunu artırarak geopolimer

matrislerindeki hibrit uçucu kül/cürufun basınç mukavemetini geliştirir. Nano-kil, kontrol karışımından daha düşük gözenekliliğe ve su içeriğine sahip daha yoğun bir karışım üretir. Araştırmacılar Nano-kil parçacıklarının bağlayıcı taneler ile kullanımını ve puzolanik reaksiyona etkisini incelediler. Nano-kil, yüksek yüzey alanı/hacim oranı ve dikkate değer kimyasal reaktivite gösterme kapasitesi nedeniyle çimento matrisinin boyutunu ve gözenekliliğini azaltarak mekanik performansı artırır. Geopolimer matrisine nano-kil ilavesi polimerizasyonu artırabilir. Optimum nano-kil içeriği, artan polimerizasyonla sonuçlanırken, daha fazla nano-kil konsantrasyonu, daha fazla gelişme olmaksızın aktif olmayan bir duruma neden olur. Yapılan araştırmalar; geopolimer betonda nano-kilin mikro-dağılımdan dolayı polimerizasyona olumlu katkı sağladığı sonucuna varıldı [46]. H.Assaedi'nin ve H.M.Khater'ın yaptıkları çalışmalarda; nano kilin geopolimer betona eklenmesinin geopolimer betonun mekanik ve termal özelliklerini iyileştirdiğini gösterdi [34,35].

4.3 Nano-ZnO

Karışıma nano-ZnO kullanılması, iyi sıkıştırılmış geopolimer beton üretmek için kullanılır. Aynı zamanda düşük maliyeti ve geniş uygulama yelpazesinin yanı sıra birçok polimeri iyileştirme etkisine sahiptir [46, 47]. Seramik uygulamalarında faydalı olan, ZnO yüksek ısı kapasitesi, düşük ısıl genleşmesi ve yüksek erime sıcaklığı özelliklerine sahiptir. Nano-çinko'nun geopolimer matrisine eklenmesi, geopolimer matrisinin homojenliğini artırır. Geopolimerde az miktarda nano-çinko eklemek uygundur, çünkü elde edilen kompozitler, sıradan betonun basınç dayanımına hemen hemen eşdeğer bir basınç dayanımına sahiptir [48-50]. Z.Zidi'nin ve YaChaoWang'un yapmış oldukları çalışmalarda; nano-ZnO'nun belli oranda kullanıldığında geopolimer betonun termal davranışı üzerine pozitif katkısı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [35,36].

4.4 Nano-TiO₂

Nano-TiO₂, Portland çimentosunun erken yaş hidrasyonunu hızlandırır, basınç dayanımını ve eğilme dayanımını iyileştirir ve betonda aşınma direncini artırır. Nano-TiO₂'nin karışıma dâhil edilmesi, geopolimer betonun mikro yapısını geliştirir ve daha az kırılmaya neden olur. Ayrıca, Nano-TiO₂ karbonatlaşma direncini artırır iken, büzülme azaltır. Aynı zamanda, Nano-TiO₂ basınç dayanımını pozitif etkilemektedir [52, 53]. M. Sivasakth'nin yaptığı çalışmada; nano-TiO₂'nin geopolimer beton karışımların termal davranışlarını olumlu etkilediği sonucuna ulaşılmıştır [38].

4.5 Nano-Alümina (Nano-Al₂O₃)

Alümina, yüksek sertlik, yüksek stabilite, yüksek yalıtım ve şeffaflık özelliklerine sahiptir [54]. Nano-Al₂O₃, bir alümina kütlesinden nano boyutlu küresel parçacıklardır. Alümina nanopartiküller, piroliz, püskürtme, sol jel ve en yaygın olarak tercih edilen teknik lazer ablasyonu dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle elde edilebilir [55]. Nano-alümina yüksek saflıkta ve daha yüksek incelikte, çimento-kum arasındaki yüzey geçiş bölgesini ve matristeki kılcallığı doldurarak betonun mekanik özelliklerini geliştirir [56-59] ve böylece bağlayıcı malzemenin özelliklerini iyileştirir. Z.Zidi'nin çalışmasında; geopolimer karışıma nano-Al₂O₃ eklenmesi geopolimer'in mikro yapısını geliştirdiği için, karışımın termal davranışını geliştirdiği sonucuna varmıştır [39].

4.6 Nano-Metakaolin

Metakaolin kaolinden elde edilen kaolinin bir türevidir. Kaolin 600°C ile 800°C arasındaki sıcaklıklarda ısıtılır [61] ve kaolin dehidroksilasyondan sonra, oktahedral alüminanın çoğu daha aktif tetra koordineli ve penta koordineli birimlere dönüştürülür [62]. Kristal yapı tamamen veya kısmen kırıldığında veya kaolinit tabakaları arasındaki bağlar koptuğunda faz değişimli metakaolin oluşur [63-67]. Nano-metakaolin, oluşan metakaolinleri nano boyutlar elde edilinceye kadar öğütülmesiyle elde edilir. El NagarAM'ın yapmış olduğu çalışmada; geopolimer matrisde nano-metakaolin kullanılması, matrisin termal davranışını geliştirdiği sonucuna varılmıştır [40].

5. Termal Davranış

Mevcut literatürün gözden geçirilmesinden anlaşıldığı üzere genel olarak Geopolimer betonda nano-malzemelerin kullanılması termal davranışa olumlu katkıları olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışma kapsamında incelenen nano-malzemeler; nano-silika, nano-kil, nano-ZnO, nano-TiO₂, nano-alümina ve nano-metakaolindir. İncelenen çalışmalardan elde edilen veriler Tablo-2'de verilmiştir.

H.M. Khater ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada metakaolinli geopolimer betonlarda %0, %1, %3, %5 ve %7 oranlarında nano-silika dumanı kullanılmış ve bu numuneler 25°C, 500°C, 700°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç testleri sonucunda en yüksek basınç dayanımı 700°C'de %5 nano-silika dumanı içeren karışımda sırasıyla yaklaşık 43.1, 46.4, 48.6, 40.9 ve 36 MPa, en düşük basınç dayanımını da 25°C'de sırasıyla yaklaşık 17.8, 20.6, 31.6 32.2 ve 32.9 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda kütle kaybı 25°C, 500°C, 700°C, 800°C ve 1000°C için sırasıyla %5.63, %2.09, %1.29, %0.86 ve %0.55 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlar, nano-silika

dumunu'nun metakaolinli geopolimerlerin fizikomekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. En iyi sonuç 700°C 'de %5 nano-silika dumanı içeren karışımda elde edilmiştir. Bunun nedeni; nano-malzemenin matrisin mikro yapısını güçlendirdiği için termal davranışı iyileştirmiştir

Alaa M. Rashad ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada metakaolinli geopolimer betonlara %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında nano-silika ilave edilmiş ve bu numuneler 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda en yüksek basınç dayanımı %0.5 nano-silikalı karışımlardan elde edilmiştir ve yaklaşık sırasıyla 95.6, 101, 111 ve 126 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda sırasıyla %2.66, %1.21, %0.78 ve %0.58 kütle kayıpları olmuştur. Yapılan testler sonucunda, %0.5 nano-silika'nın karışıma dahil edilmesi, metakaolin bazlı geopolimerin basınç dayanımını ve yangın direncini artırırken, ekstra miktarlarda nano-silika'nın dahil edilmesi olumsuz etkilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bunun nedeni; nano-silikanın matrisdeki boşluk yapısını azaltmasıdır.

Kang Gao ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimerde katı/sıvı oranı 0.97, 1.03, 1.10 ve 1.19 olan karışımlara %1, %2 ve %3 oranlarında nano-silika eklenerek 1, 28 ve 60 günlük kütleme zamanlarında eğilme dayanımın testi yapılmış ve ayrıca 50°C, 350°C, 550°C ve 690°C'de termo-gravimetrik analiz testi yapılmış. Yapılan eğilme testi sonucunda en yüksek değer %1 nano-silikalı ve katı/sıvı oranının 1.03 olduğu karışımda elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda en az kütle kaybı katı/sıvı oranının 1.19, 28 günlük kütleme ve %1 oranında nano-silika içeren karışımda elde edilmiştir. Bunun nedeni, nano-SiO₂ geopolimer matriste boşluk yapısını azaltmasıdır.

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada sıvı/katı oranı 0.55 ve 10 M NaOH çözeltili metakaolin bazlı geopolimere %1, %2, %3, %5, %7 ve %10 oranlarında nano-silika kullanarak 30°C, 200°C, 550°C ve 450°C'de termo-gravimetrik analiz testi ve 30°C'de numunelere basınç dayanımı testi yapılmıştır. Yapılan testlerde en yüksek basınç dayanımı ve en az kütle kaybı 100°C'ye kadar %5 nano-silika içeren karışımdan elde edilmiştir. Bunun sebebi, gözenek yapısındaki iyileşmedir.

M.F. Zawrah ve arkadaşlarını yaptığı çalışmada metakaolin bazlı geopolimere %2.5, %5 ve %7.5 oranlarında nano-silika ekleyerek 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri

yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testi sonucunda 800°C'de %2.5, %5 ve %7.5 oranları için sırasıyla 55.6, 25.2 ve 23.5 MPa değerleri elde edilirken 1000°C için sırasıyla 95.6, 43.92 ve 40 MPa değerleri elde edilmiştir. %2.5 nano-silika karışımı için yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda 1000°C'de kütle kaybı toplam %13.61 olarak bulunmuştur. Yapılan testler sonucunda en yüksek basınç dayanımı ve en az kütle kaybı %2.5 nano-silikalı karışımda elde edilmiştir. %2.5'tan fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya neden olduğu için en olumlu sonuçlar %2.5 oranında elde edilmiştir. Karışımda %2.5'den fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya sebep olduğu için negatif etkilemektedir.

T.Revathi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada uçucu kül ve cüruf bazlı geopolimere %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5 ve %3 oranlarında nano-silika kullanılarak 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç testi sonucunda en yüksek değerler 200°C'de %2 nano-silikalı karışımdan yaklaşık 55MPa olarak elde edilmiştir. Termo-gravimetrik analiz sonuçlarına göre %2.5'lük nano-silika içeren karışımda 1000 °C'de kütle kaybı %8.45'tir. Nano-silika'nın %2.5 dan fazla kullanılması karışımda homojen dağılıma sorunu oluşturmaktadır.

H.Assaedi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada uçucu kül bazlı geopolimere %1, %2 ve %3 oranlarında nano-kil kullanılarak 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C ve 800°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testi 20°C'de %2 nano-kil içeren karışımda 45.9MPa olarak bulunmuştur. Termo-gravimetrik analiz testlerine göre en az kütle kaybı %2 oranına sahip numunede 800°C'de %11.6, en fazla kütle kaybı nano-kil içermeyen karışımda % 28.5 oranında gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; nano-kilin hem mikro yapıyı iyileştirmesi, hem de geopolimerik reaksiyonu kolaylaştırmasıdır

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimerde %0.3, %0.5 ve %0.7 oranlarında nano-ZnO kullanılarak 100°C, 200°C, 300°C, 400°C ve 500°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan çalışmada geopolimer karışıma az miktarda %0.5 eklenmesi basınç dayanımını üzerinde olumlu etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Yapılan termo-gravimetrik analiz göre 70°C'ye kadar %2, 200°C'de yaklaşık %5.5 ve 450°C'de yaklaşık %4 oranında kütle kaybı gerçekleşmiştir. Yapılan çalışma sonucunda nano-ZnO'nun kullanılması termal kararlılık üzerinde olumlu etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun

sebebi; nano-ZnO geopolimer matris ve nanopartiküller arasındaki bağı güçlendirmesidir.

YaChaoWang ve arkadaşları yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimer karışımlarda %0.19, %0.47, %0.76 ve %1.4 oranlarında nano-ZnO kullanarak 200°C, 400°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, nano-ZnO'nun %0.47 oranında kullanıldığında en iyi termal performansı göstermektedir. Bunun sebebi, ZnO seramik benzeri Si/C/P oluşumuna neden olmasıdır.

M.Sivasakth ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada uçucu kül bazlı geopolimere %2 oranında nano-TiO₂ ekleyerek 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de basınç dayanımı ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan 7 ve 14 günlük basınç dayanım testleri sonucunda %2 oranında nano-TiO₂ içeren karışım tüm sıcaklıklar da en yüksek değerlerini vermiştir. 14 günlük basınç dayanımları 20MPa, 30MPa, 26MPa, 23MPa ve 28MPa'dır. En yüksek basınç dayanımı 200°C'de 30MPa olarak bulunmuştur. Yapılan termo-gravimetrik analizi sonucunda maksimum kütle kaybı 800°C'de nano-TiO₂'siz karışımda %12, minimum kütle kaybı 200°C'de %2 nano-TiO₂'li karışımda %4 olmuştur. Yapılan testler %2 nano-TiO₂ kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nano-TiO₂ matrisdeki boşlukları doldurmasıdır.

Z.Zidi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada metakaolin bazlı geopolimer karışımlara %1, %2 ve %3 oranlarında nano-alumina ekleyerek 100°C, 200°C, 300°C ve 450°C'de termo-gravimetrik analiz ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testlerine göre en yüksek değer %2'lik nano-alumina içeren karışımdan 39MPa, en düşük değer ise nano-aluminasız karışımdan 30MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analiz sonucunda yaklaşık 130°C'ye kadar %2'lik nano-alumina içeren karışım için kütle kaybı yaklaşık %4 olmuş, kütle kaybını azaltmıştır. Ancak, 130°C'den sonra kütle kaybı nano-alümina içermeyen karışıma göre kütle kaybı daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; nano-alümina geopolimerin gel yapısını geliştirdiği ve daha homojen bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Yapılan çalışma sonucunda nano-alümina'nın optimum oranı %2 olarak belirlenmiştir.

El.NagarAM ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada %50, %20 ve %0 kaolin, ve %50, %80 ve %100 cüruf bazlı geopolimer karışımlara %3 nano-metakaolin ekleyerek 300°C, 500°C, 600°C, 800°C ve 1000°C'de basınç dayanım ve termo-gravimetrik analiz testleri yapılmıştır. Yapılan basınç dayanımı testlerinde en yüksek değer 500°C'de %100 cüruf bazlı geopolimer karışımdan elde edilirken, en düşük değer %50

kaolin %50 cüruf içeren karışımlardan elde edilmiştir. Yapılan termo-gravimetrik analizlerde en az kütle kaybı %100 cüruf karışımdan 0°C, 500°C ve 1000°C için sırasıyla %11.68, %3.30 ve %0.81 olmuştur. Bu sonuç, geopolimer aktivasyonunu artıran ve böylece reaksiyon verimini artıran cüruftaki camsı bileşen ile ilgilidir.

İncelemeler sonucunda geopolimer karışımlarda kullanılan nano-malzemenin türü, oranı, kütleme şartları, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve maruz kalma süresi geopolimerin termal davranışları üzerinde olumlu ya da olumsuz etkilere sahiptir. Kütle kaybı ilk başta geopolimer jeldeki ve karışımdaki yapısal suyun buharlaşmasından kaynaklanmaktadır [31]. Daha fazla artan sıcaklık büzölmeye neden olur ve sonunda geopolimer yapıya zarar verir [70].

6. Sonuçlar

Son zamanlarda araştırmalar, nano-malzemeler içeren geopolimerin davranışını anlamaya odaklanmıştır. Bu çalışma, geopolimer betonlarda kullanılan nano-malzemelerin termal davranış özelliğine etkisi ile ilgili yayınlanan makalelerin kapsamlı bir incelemesini sunmaktadır. Geopolimer beton içinde kullanılan nano-malzemeler geopolimer üzerinde olumlu etkileri olmaktadır. Ayrıca, alkali gibi aktivatörler ve kütleme rejimi, geopolimer özelliklerinde önemli rol oynar. Yayınlanan araştırmalar incelendiğinde, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- I. Nano-silika kullanılarak yapılan çalışmalarda en iyi termal davranışın elde edildiği oranlar %5, %2.5, %1 ve %0.5'dir. Nano-silika matrisin boşluk yapısını azaltmaktadır. Bu nedenle, geopolimer betonun termal kararlılığını artırmaktadır.
- II. Nano-ZnO içeren karışımlar ile yapılan çalışmalarda %0.47 ve %0.5 oranlarda en iyi termal davranış göstermiştir. Nano-ZnO karışımda kullanılan malzemelerin arasındaki etkileşimi arttırmaktadır. Bundan dolayı, geopolimer betonun termal kararlılığına olumlu etkilemektedir.
- III. Nano-kil kullanılarak yapılan çalışmada en iyi termal davranış %2 oranındaki karışımda elde edilmiştir. Nano-kil karışımın amorf yapısını ve geopolimerizasyonun artmasına neden olur. Bu nedenle, geopolimer matrisin boşluk yapısının azalmasına sebep olur. Böylece geopolimer betonun termal kararlılığının artmasına sebep olur.

- IV. Nano-TiO₂ ile yapılan çalışmada %2'lik nano-TiO₂ içeren numuneden elde edilmiştir. Nano-TiO₂ matrisdeki boşluk yapısını azalttığı için geopolimer betonun termal kararlılığının artmasına neden olmaktadır.
- V. Nano-alümina içeren karışım için yapılan çalışmada en iyi termal sonuçlar %2'lik nano-alümina içeren karışımdan elde edilmiştir. Nano-alümina karışımın boşluk yapısını azalttığı için geopolimer betonun termal kararlılığı artmaktadır.
- VI. Nano-metakaolin kullanılarak yapılan çalışmada en iyi termal davranış sonuçları %3 nano-metakaolin içeren numunelerde elde edilmiştir. Nano-metakaolin karışımındaki boşlukları doldurduğu için termal davranışı olumlu etkilemektedir.
- VII. Kullanılan nano-malzemeler yetersiz çözünme ve malzemelerin olası topaklaşması nedeniyle geopolimerin daha düşük bir polikondenzasyon seviyesine yol açar, bu da malzemenin termal davranışı üzerinde olumsuz etkilere sebep olur.
- VIII. Nano-malzemelerin çok ince puzolanik malzemeler olduğu için, daha yüksek hidrasyon derecesi elde etmek için son derece yüksek reaktiviteleri sayesinde geopolimerin termal davranışını geliştirebilir.
- IX. Nano-malzeme içeren geopolimerler, sıkıştırılmış ve daha homojen bir mikro yapı sergilemiştir. Ayrıca, nano-malzemelerin geopolimerlere katılmasıyla geopolimerizasyon oranı artmıştır.
- X. Kullanılan nano-malzemelerin bazıları yan ürün olarak üretilen endüstriyel atık malzemelerdir. Geopolimer, bu atık malzemelerin yönetimi için iyi bir çözüm sunmaktadır.

Tablo 1. Alüminosilikat kaynak malzemelerinin bileşimi ve çeşitli çalışmalarda kullanılan nano-malzemeler

Referaslar	Malzeme	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	BaO	ZnO	ZrO ₂
H.M. Khater ve arkadaşları [28]	Metakaolin	62.37	31.6	1.47	0.26	0.01		0.15	0.12	0.01	2.6	0.01			
	Nano Silika														
A M. Rashad ve arkadaşları [29]	Metakaolin	58.52	35.54	1.15	1.24	0.19		0.05	0.25			0.06			
	Nano-Silika	98.6	0.01	0.01	0.01			0.045	0.21			0.46			
Kang Gao ve arkadaşları [30]	Metakaolin	54.6	38	1.3	0.24			0.32	0.04			0.04			
	Nano-Silika														
Z. Zidi ve arkadaşları [31]	Metakaolin	54.66	22.27	11.44	1.1			2.66	0.26						
	Nano-Silika														
M.F. Zawrah ve arkadaşları [32]	Metakaolin	56.03	38.81	0.538	0.098					3.039	0.156	0.012			0.34
	Nano-Silika	98.8	0.44	0.04	0.26					0.03	0.04	0.1			0.01
T. Revathi ve arkadaşları [33]	Uçucu Kül	47.55	33.45	8.17	2.099	0.505		1.65	0.015						
	Cüruf	21.6	14.9	1.78	55.3	2.6		0.48	0.05						
	Nano-Silika	98.78	0.453	0.007	0.087			0.04	0.38						
H. Assaedi ve arkadaşları [34]	Uçu Kül	63.13	24.88	3.07	2.58	0.61	0.05	2.01	0.71	0.17	0.96	0.18	0.07		
	Nano-Kil														
H. M. Khater ve arkadaşları [35]	Cüruf	36.95	10.01	1.48	33.07	6.43	3.52	0.74	1.39	0.1	0.52	3.52			
	Nano-Kil														
Z. Zidi ve arkadaşları [36]	Metakaolin	54.6	22.27	11.44	1.1	2.27		2.66	0.26			0.19			
	Nano-ZnO	51.56	18.64						5.58					0.04	
YaChaoWang ve arkadaşları [37]	Metakaolin														
	Nano-ZnO														
M. Sivasakth ve arkadaşları [38]	Uçu Kül	55	26	10.17	2.09	0.8		1.65	0.4						
	Nano-TiO ₂														
Z. Zidi ve arkadaşları [39]	Metakaolin	54.6	22.27	11.44	1.1	2.27		2.66	0.26			0.19		0.01	
	Nano-Alümina														
El NagarAM ve arkadaşları [40]	Cüruf	36.59	10.01	1.48	33.07	6.53	3.44	0.74	1.39	0.1	0.52	3.52			
	Kaolin	49.86	34.1	0.3	0.09	0.26	0.01	0.02	0.03	0.35	0.88	0.59			
	Nano-Metakaolin	56.14	38.21	0.38	0.07	0.37	0	0	0.02	0.26	1.14	0.18			

Tablo 2. İncelenen çalışmada kullanılan veriler ve elde edilen termal davranış sonuçları

Referanslar	Bağlayıcı	Nanomalzeme		Sıcaklık- °C	Kullanılan Method	Termal Davranış Bulguları
		Tür	Oran			
H.M. Khater ve arkadaşları [28]	Metakaolin	Nano Silika Dumanı	%1 %3 %5 %7	500-700- 800-1000	Termogravimetrik Analiz Basınç Dayanımı Testi	Yapılan testler sonucunda %5 nano-silika dumanlı numune en iyi termal davranış göstermiştir. Bunun nedeni; nano-malzemenin matrisin mikro yapısını güçlendirdiği için termal davranışı iyileştirmiştir.
Alaa M. Rashad ve arkadaşları [29]	Metakaolin	Nano Silika	%0.5 %1 %2 %3 %4	400-1000		Yapılan testler %0.5 nano-silika kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nanosilikanın matrisdeki boşluk yapısını azaltmasıdır.
Kang Gao ve arkadaşları [30]	Metakaolin	Nano Silika	%1 %2 %3	50-700	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışmada, karışımda nano-silikanın %1 oranında kullanılması en iyi termal davranışı göstermektedir. Bunun nedeni, nano-SiO ₂ geopolimer matriste boşluk yapısını azaltmasıdır.
Z. Zidi ve arkadaşları [31]	Metakaolin	Nano Silika	%5	0-500	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler sonucunda, en yüksek termal kararlılık karışımda %5 nano-silika içerenlerde görüldü. Bunun sebebi, gözenek yapısındaki iyileşme nedeniyledir.
M.F. Zawrah ve arkadaşları [32]	Metakaolin	Nano Silika	%2.5 %5 %7.5	0-1000	Termogravimetrik Analiz	Yapılan araştırma sonucunda; en iyi termal kararlılık %2.5 nano-silika kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Karışımda %2.5'dan fazla nano-silika kullanılması topaklaşmaya sebep olduğu için negatif etkilemektedir.
T. Revathi ve arkadaşları [33]	Uçucu Kül Cüruf	Nano Silika	%0.5 %1 %1.5 %2 %2.5 %3	0-900	Termogravimetrik Analiz	Yapılan araştırma sonucunda; en iyi termal kararlılık %2.5 nano-silika kullanılması sonucunda elde edilmiştir. Nano-silika'nın %2.5 dan fazla kullanılması karışımda dağılma sorunu oluşturmaktadır.
H. Assaedi ve arkadaşları [34]	Uçu Kül	Nano Kil	%1 %2 %3	100-800	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler sonucunda nano-kilin %2 kullanımında en iyi termal davranış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; nano-kilin hem mikro yapıyı iyileştirmesi, hem de geopolimerik reaksiyonu kolaylaştırmasıdır.
H.M.Khater ve arkadaşları [35]	Cüruf	Nano Kil	%0.5 %1 %1.5 %3 %5 %7	0-800	Isıl İletkenlik	Yapılan çalışma; geopolimer nano-kil'in %1-1.5 oranında kullanılması termal özellikleri iyileştirdiğini göstermiştir. Bunun nedeninin nano-kilin geopolimerin mikro yapısını geliştirmesidir.

Z. Zidi ve arkadaşları [36]	Metakaolin	Nano ZnO	%0.3 %0.5 %0.7	25-450 70-200	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler %0.5 nano-çinko kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun sebebi; nano-çinko geopolimer matris ve nanopartiküller arasındaki bağı güçlendirmesidir.
YaChaoWang ve arkadaşları [37]	Metakaolin	Nano ZnO	%0.19 %0.47 %0.76 %1.1	70-1000	Termogravimetrik Analiz	Sonuçlar, nano-ZnO' nun %0.47 oranında kullanıldığında en iyi termal performansı göstermektedir. Bunun sebebi, ZnO seramik benzeri Si/C/P oluşumuna neden olmasıdır.
M. Sivasakth ve arkadaşları [38]	Uçu Küllü	Nano TiO ₂	%2	30-1200	Termogravimetrik Analiz	Yapılan testler %2 nano-TiO ₂ kullanıldığında en iyi termal davranış sonucunu vermiştir. Bunun nedeni; nano-TiO ₂ matrisdeki boşlukları doldurmasıdır.
Z. Zidi ve arkadaşları [39]	Metakaolin	Nano Alümina	%1 %2 %3 %5 %7 %10	25-450	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışma sonucunda, nano-alüminanın kullanılması 150°C'ye kadar kütle kaybını azaltmış, ancak 150°C'den sonra kütle kaybını arttırmıştır.
El NagarAM ve arkadaşları [40]	Cüruf Kaolin	Nano Metakaolin	%3	0-1000	Termogravimetrik Analiz	Yapılan çalışma sonucunda; nano-metakaolin'li %50 cüruf, %50 kaolin olan karışım en düşük termal davranış göstermiştir. Bu sonuç, geopolimer aktivasyonunu artıran ve böylece reaksiyon ürününün verimini artıran cüruftaki camı bileşen ile ilgilidir.

Kaynaklar

- [1] Javeed M.A., Kumar M.V., Narendra H. Studies on Mix Design of Sustainable Geo-Polymer Concrete. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management (IJIREM)*. ISSN: 2350-0557, Volume-2, Issue-4, 2015.
- [2] Karthik, A; Sudalaimani, K; Kumar V., C.T. Investigation on mechanical properties of fly ash-ground granulated blast furnace slag based self curing bio-geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, Volume: 149, pages 338-349, 2017.
- [3] Bernal S.A., Rodri'guez E.D., Gutie'rrez R.M., Gordillo M., Provis J.L. Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science*, volume 46, pages 5477–5486, 2011.
- [4] Davidovits J. Geopolymers and geopolymeric materials. *Journal of thermal analysis* volume 35, pages 429–441, 1989.
- [5] Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., van Deventer J.S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete'. *Cement and Concrete Research*, 37 1590–1597, 2007.
- [6] Hemn U. A., Azad A. M., Ahmed S. M. The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, Volume 49, 15 May 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104062>
- [7] Ahmed M.F., Nuruddin M.F., Shafiq N. Compressive Strength and Workability Characteristics of Low-Calcium Fly ash-based Self-Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering* Vol:5, No:2, 2011.
- [8] Najim K.B., Hall M.R. A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and Building Materials*, Vol 24, 2043–2051, 2010.
- [9] Xie J., Wang J., Rao R., Wang C., Fang C. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Compos. Part B Eng.* 164,179–190 2019.
- [10] Noushini A., Aslani F., Castel A., Gilbert R.I., Uy B., Foster S. Compressive stress-strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 73, 136–146, 2016.
- [11] Kurtoğlu A.E., Alzeebaree R., Aljumaili O., Niş A., Gülşan M.E., Humur G., Çevik A. Mechanical and durability properties of fly ash and slag based geopolymer concrete. *Adv. Concr. Constr.* 6, 2018. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.345>
- [12] Zhang P., Zheng Y., Wang K., Zhang J. A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar. *Compos. Part B Eng.* 152, 79–95, 2018.
- [13] Khaloo A., Raisi E.M., Hosseini P., Tahsiri H.. Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.*, 51, 179–186, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.054>
- [14] Ravitheja A., Kumar N.L.N.K. A study on the effect of nano clay and GGBS on the strength properties of fly ash based geopolymers. Volume 19, Part-2, Pages: 273-276, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.761>
- [15] Bharat B.J., Rahul S. The effect of nanomaterials on properties of geopolymers derived from industrial by-products: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, Volume: 252, 119028, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119028>
- [16] Mehrzad M. Nano Silica and Micro Silica Effect on Mechanical Attributes of Ferrochrome Slag Based Geopolymer. *Düzce University Journal of Science & Technology*, 8, 347-362, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.587321>
- [17] Jian H. *Synthesis and Characterization of Geopolymers for Infrastructural Applications*. PhD. Thesis, The Department of Civil and Environmental Engineering, Louisiana State University, Louisiana, USA, 2012.
- [18] Wang Y., Zhang Y., Xu D. Study on alkali-activated silica fume and fly ash based geopolymer. *Bull Chin Ceramic Soc.*; 30(1):50–4, 2011.
- [19] Szostak B., Golewski G.L. Effect of Nano Admixture of CSH on selected strength parameters of concrete including fly ash. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; p. 416012105 (6pp.), 2018.
- [20] Fu Q., Xu W., Zhao X., Bu M., Yuan Q., Niu D. The microstructure and durability of fly ash-based geopolymer concrete: a review. *Ceram Int.*; 47(21):29550–66, 2021.
- [21] Catauro M, Tranquillo E., Barrino F., Dal P.G., Blanco I., Cicala G., et al. Mechanical and thermal properties of fly ash filled geopolymers. *Therm Anal Calorim.*; 138(5):3267, 2019.

- [22] Xiao Y.Z., Chen L., Komarneni S., Zhou C.H., Tong D.S., Yang H.M., Yu W.H., Wang H. Fly ash-based geopolimer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, Vol: 125, Pages 253-267, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>
- [23] Gümüş A. *Geopolimer Beton Özelliklerine Termal Kür Prosesinin Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon, Turkey, 2016.
- [24] Duxson P., Provis J.L., Lukey G.C., Mallicoat S.W., Kriven W.M., Van Deventer J.S.J. Understanding the relationship between geopolimer composition, microstructure and mechanical properties. *Colloids Surf, A* 269(1-3):47-58, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
- [25] Rowles M., O'Connor B. Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesised by sodium silicate activation of metakaolinite. *J Mater Chem.*, 2003. <https://doi.org/10.1039/b212629j>
- [26] Stevenson M., Sagoe-Crentsil K. Relationship between composition, structure and strength of inorganic polymers: part 1—metakaolin-derived inorganic polymers. *J Mater Sci* 40(8):2023-2036, 2005.
- [27] Jindal B. B., Alomayri T., Assaedi H., Cyriaque R.K. Geopolimer concrete with metakaolin for sustainability: a comprehensive review on raw material's properties, synthesis, performance, and potential application. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17849-w>
- [28] Khater H.M., Gharieb M. Synergetic effect of nano-silica fume for enhancing physico-mechanical properties and thermal behavior of MK-geopolimer composites. *Constr. Build. Mater.*, Vol:350, 128879,2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128879>
- [29] Alaa M.R., Ahmed S.O. Thermal resistance of alkali-activated metakaolin pastes containing nano-silica particles. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*,136:609-620,2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7657-1>
- [30] Gao K., Lin K.-L., Wang D., Hwang C.-L., Tuan B.L.A., Shiu H.-S., Cheng T.-W. Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of metakaolin-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 48, 441-447, 2013.
- [31] Zidi Z., Ltifi M., Zafar I. Characterization of Nano-Silica Local Metakaolin Based-Geopolimer: Microstructure and Mechanical Properties. *Open Journal of Civil Engineering*, 10, 143-161, 2020. <https://doi.org/10.4236/ojce.2020.102013>
- [32] Zawrah M.F., Abo Sawan S.E., Khattab R.M., Abdel-Shaf A.A. Effect of nano sand on the properties of metakaolin-based geopolimer: Study on its low rate sintering. *Construction and Building Materials*, Vol: 246,118486,2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118486>
- [33] Revathi T., Jeyalakshmi R., Rajamane N.P. Study on the role of n-SiO₂ incorporation in thermo-mechanical and microstructural properties of ambient cured FA-GGBS geopolimer matrix. *Applied Surface Science*, Volume 449, Pages 322-331, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.01.281>
- [34] Assaedi H., Shaikh F.U.A., I.M. Low. Effect of nano-clay on mechanical and thermal properties of geopolimer. *Journal of Asian Ceramic Societies* 4, 19-28,2016. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2015.10.004>
- [35] Khater H.M., El-Sabbagh B.A., Fanny M., Ezzat M., Lottfy M. and El Nagar A.M. Effect of Nano-Clay on Alkali Activated WaterCooled Slag Geopolimer. *British Journal of Applied Science & Technology*, 3(4): 764-776, 2013.
- [36] Zidi Z., Ltifib M., Ayadi Z.B., El Mir L. and Nóvoa X.R. Effect of nano-ZnO on mechanical and thermal properties of geopolimer. *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 8, No. 1, 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1080/21870764.2019.1693682>
- [37] Wang Y., Xu M., Zhao J., Xin A. Nano-ZnO modified geopolimer composite coatings for flame-retarding plywood. *Construction and Building Materials*, 338, 127649, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127649>
- [38] Sivasakthi M., Jeyalakshmi R., and Rajamane N.P. Investigation of Microstructure and Thermomechanical Properties of Nano-TiO₂ Admixed Geopolimer for Thermal Resistance Applications. *JMEPEG*, 30:3642-3653, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05708-1>
- [39] Zidi Z., Ltifi M., Ayadi Z.B. & El Mir L. Synthesis of nano-alumina and their effect on structure, mechanical and thermal properties of geopolimer. *Journal of Asian Ceramic Societies*, Vol. 7, No. 4, 524-535,2019. <https://doi.org/10.1080/21870764.2019.1676498>
- [40] El Nagar AM, Khater HM. Development of High Thermal Stability Geopolimer Composites Enhanced by Nano Metakaolin. *J. Build. Mater. Struct.* 6: 10-19, 2019. DOI : 10.5281/zenodo.2604753

- [41] Zhang M.-H., Islam J., Peethamparan S. Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volumes of slag. *Cem. Concr. Compos.*;34:650–662, 2012. doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.005
- [42] Aggarwal P., Singh R.P., Aggarwal Y. Use of nano-silica in cement based materials—A review. *Cogent Eng.*;2:1078018, 2015. doi: 10.1080/23311916.2015.1078018
- [43] Quercia G., Hüsken G., Brouwers H.J.H. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste. *Cem. Concr. Res.*;42:344–357, 2012. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.10.008.
- [44] Givi A.N., Rashid S.A., Aziz F.N.A., Salleh M.A.M. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Compos. Part B Eng.*;41:673–677, 2010. doi: 10.1016/j.compositesb.2010.08.003.
- [45] Ibrahim M., Johari M.A.M., Maslehuddin M., Rahman M.K. Influence of nano-SiO₂ on the strength and microstructure of natural pozzolan based alkali activated concrete. *Constr. Build. Mater.*;173:573–585, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.051.
- [46] Fatheali A.S., Sharanabasava V.G., Veerabhadragouda B.P., Khan T.Y., Almakayee N. M. and Alghamdi S. Review on the Relationship between Nano Modifications of Geopolymer Concrete and Their Structural Characteristics. *Polymers*, 14, 1421, 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14071421>
- [47] Zheng Z, Mounsamy M, Lauth-de Viguier N, et al. Luminescent zinc oxide nanoparticles: from stabilization to slow digestion depending on the nature of polymer coating. *Polym Chem.*;10:145–154, 2019.
- [48] Ponnamma D, Cabibihan -J-, Rajan M, et al. Synthesis, optimization and applications of ZnO/polymer nanocomposites. *Mater Sci Eng C.*;98:1210–1240, 2019.
- [49] Chakradhara R. M., Nikhil K. V., Shailendra Kumar. Critical review on fly-ash based geopolymer concrete. *Structure Concrete*, Volume21, Issue3, 1013-1028, <https://doi.org/10.1002/suco.201900326>
- [50] Adak D., Sarkar M., Mandal S. Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, Vol:70, Pages:453-459. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.093>
- [51] José S. M., Belén C., Jesús S., Ramón T. Metakaolin-Nanosilver as Biocide Agent in Geopolymer. <https://doi.org/10.1002/9781118217542.ch1>
- [52] Sofi M., Deventer J.S.J.van, Mendis P.A., Lukey G.C. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 2, Pages 251-257. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008>
- [53] Wefers K. *Alumina chemicals: science and technology handbook*, Am. Ceram. Soc. Westerville, Ohio, USA. 13, 1990.
- [54] Reid C.B., Forrester J.S., Goodshaw H.J., Kisi E.H., Suaning G.J. A study in themechanical milling of alumina powder. *Ceram. Int.*, 34, 1551–1556, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.05.003>
- [55] Behfarnia K., Salemi N. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Constr. Build. Mater.*, 48, 580–584, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088>
- [56] Jo B.W., Kim C.H., Tae G., Park J.B. Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Constr. Build. Mater.*, 21, 1351–1355, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020>
- [57] Li W., Li X., Chen S.J., Long G., Liu Y.M., Duan W.H.. Effects of nanoalumina and graphene oxide on early-age hydration and mechanical properties of cementpaste. *J. Mater. Civ. Eng.*, 29, 4017087, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001926](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001926)
- [58] Li Z., Wang H., He S., Lu Y., Wang M. Investigations on the preparation and mechanical properties of the nano-alumina reinforced cement composite. *Mater. Lett.*, 60, 356–359, 2006 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2005.08.061>
- [59] Belver C., Vicente M.A. Porous Silica Gel by Acid Leaching of metakaolin. *Materials Syntheses, Springer*, Vienna, pp. 47–51, 2008.
- [60] Abo-El-Enein S.A., Heikal M., Amin M.S., et al. Reactivity of dealuminated kaolin and burnt kaolin using cement kiln dust or hydrated lime as activators. *Construct. Build. Mater.*, 47, 1451–1460, . 2013.
- [61] El-Gamal S.M.A., Amin M.S., Ramadan M. Hydration characteristics and compressive strength of hardened cement pastes containing nano-metakaolin. *HBRC J.*, 13, (1), 144-121, 2017.
- [62] Sayanam R.A., Kalsotra A.K., Mehta S.K., et al. Studies on thermal transformations and pozzolanic activities of clay from Jammu region (India). *J. Therm. Anal.*, 35, (1), 99–106, 1989.

- [63] Chen C.Y., Tuan W.H.. Evolution of mullite texture on firing tape-cast kaolin bodies. *J. Am. Ceram. Soc.*, 85, (5), 1121–1126, 2002.
- [64] Berodier E., Scrivener K.. Impact of Filler on Hydration kinetics. *32nd Cement and Concrete Science Conference*. Queen's University Belfast, pp. 1–4, 2012.
- [65] Sabir B.B., Wild S., Bai J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement Concr. Compos.*, 23, (6), 441–454, 2001.
- [66] Zhang D., Zhou C.H., Lin C.X., et al. Synthesis of clay minerals. *Appl. Clay Sci.*, 50, (1), 1–11, 2010.
- [67] Peng Zhang, Yuanxun Zheng, Kejin Wang, Jinping Zhang, A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar, *Composites B, Eng.* 152 (2018) 79–95.
- [68] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A.M. Mustafa Al Bakri, M. Bnhussain, M. Luqman, I. Khairul Nizar, Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin based geopolymers, *Constr. Build. Mater.* 35 (2012) 912–922.
- [69] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N.P.B. Rajamane, Rinu Joseb, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites, *J. Non-Cryst. Solids* 499 (2018) 117–130.
- [70] Zaharaki D, Komnitsas K, Perdikatsis V. Use of analytical techniques for identification of inorganic polymer gel composition. *J Mater Sci* 2010;45:2715–24.