

Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Tipinin Harcın Reolojik, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması

Tayfun UYGUNOĞLU¹, Sevcan BARLAS ÖZGÜVEN^{2*}

^{1,2}Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 03030, Afyonkarahisar

¹<https://orcid.org/0000-0003-4382-8257>

²<https://orcid.org/0000-0002-1242-5642>

*Sorumlu yazar: svcnbrls@gmail.com

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 17.01.2025

Kabul tarihi: 11.05.2025

Online Yayınlanma: 15.12.2025

Anahtar Kelimeler:

Faz değiştiren malzeme tipleri

Nano-kapsül

Çimento esaslı harç

ÖZ

Yaşadığımız evrende iklim değişikliğine sebep olan sera gazlarının çevresel etkilerinin azaltılması için enerji verimli yapıların üretilmesi kaçınılmaz olmaktadır. Enerji tüketiminin büyük çoğunluğunu teşkil eden yapıların üretiminde kullanılan yapı malzemelerinde, binaların ısıtma ve soğutma yükünün azaltarak termal enerji depolamak için faz değiştiren malzeme kullanımı öne çıkmaktadır. Faz değiştiren malzemeler kapsüllenmiş ya da kapsülsüz olarak yapı malzemelerinin yalıtım ve ısı aktarım özelliklerini geliştirmek için kullanılabilir. Bu çalışmada farklı tip faz değiştiren malzeme kullanım etkisini gözlemleyebilmek için belirli oranlarda (%0, %2,5, %5) nano-kapsüllenmiş ve kapsülsüz olmak üzere faz değiştiren malzemenin (FDM) iki farklı tipi çimento esaslı harca dahil edilerek etkisi araştırılmıştır. FDM katkılı harçların taze halde çökme-yayılmaları ve viskoziteleri belirlenirken, sertleşmiş harçlarda ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç, basınç ve eğilme dayanımı değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, faz değiştiren malzemenin harçlarda kullanılmasıyla fiziksel ve mekanik özelliklerde azalma görülmüş olup, bu azalma kapsüllü FDM kullanılan harçlarda daha fazladır.

Investigation of the Effect of Phase Change Material Type on Rheological, Physical and Mechanical Properties of Cement Based Mortars

Research Article

Article History:

Received: 17.01.2025

Accepted: 11.05.2025

Published online: 15.12.2025

Keywords:

Types of phase change materials

Nanocapsules

Cementitious mortar

ABSTRACT

In order to reduce the environmental effects of greenhouse gases that cause climate change in the universe we live in, it is inevitable to produce energy-efficient structures. In the construction materials used in the production of structures that constitute the vast majority of energy consumption, the use of phase-changing materials to store thermal energy by reducing the heating and cooling load of buildings stands out. Phase-changing materials can be used to improve the insulation and heat transfer properties of construction materials, either encapsulated or unencapsulated. In this study, in order to observe the effect of using different types of phase-changing materials, two different types of phase-changing materials (PCM) were added to cement-based mortars at certain rates (%0, %2.5, %5), nano-encapsulated and unencapsulated, and their effects were investigated. While the slump-spreading and viscosities of PCM-added mortars were determined in the fresh state, changes in ultrasound transmission speed, electrical resistivity, pressure and bending strength were investigated in hardened mortars. According to the findings, a decrease in physical and mechanical properties was observed with the use of phase-changing materials in mortars, and this decrease was greater in mortars using encapsulated PCM.

To Cite: Uygunoğlu T., Barlas Özgüven S. Çimento Esaslı Harçlarda Faz Değiştiren Malzeme Tipinin Harcın Reolojik, Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 2025; 8(5): 2057-2078.

1. Giriş

Barınma ihtiyacının ortaya çıkması ile şekillenmeye başlayan yapı sektörünün temel taşı yapı malzemelerinin gelişme süreci, her geçen gün bilimsel çalışmalarla desteklenmekte ve son teknolojilerle birlikte hız kazanmaktadır. Bu gelişme sürecine ise iklim krizinin etkilerinin gittikçe artması sonucu yenilebilir enerji kaynakları için gerekli enerji depolama sistemlerini geliştirme çalışmaları yön vermektedir (Anisur ve ark., 2013; Lin ve ark., 2018). Enerji depolama sistemleri sadece arz üzerindeki iklim değişikliğini etkilemekle kalmayıp aynı zamanda performans artırıcı etki eder (Albdour ve ark., 2022; Kumar ve ark., 2023; Marani ve ark., 2023).

Yapı sektörünün enerji tüketimi iç mekanlardaki yüksek kullanım nedeniyle %30'luk bir paya karşılık gelmektedir (Cui ve ark., 2015; Muraleedharan ve Nadir, 2021; Rebelo ve ark., 2022). Bu nedenle, binanın termal performansını iyileştirmek için termal enerji depolama (TES) en iyi yöntemlerden biridir (Zastawna-Ruminand ve Nowak, 2015; Das ve ark., 2022; Guardia ve ark., 2022; Baccega ve ark., 2023). Yapı ve yapı malzemelerinde termal enerji depolama sistemi için teknolojik tasarımlar ile oluşturulan akıllı yenilikçi malzemelerden biri de faz değiştiren malzemelerdir (Waqas ve Ud Din, 2013; Dutil ve ark., 2014). Akıllı yenilikçi malzemelerden olan faz değiştiren malzemeler (FDM), katıdan sıvıya ya da sıvıdan katıya faz değişimi yaparken çok fazla miktarda termal enerjinin gizli ısı olarak depolanmasına imkan sağlamaktadır (Kumar ve ark., 2011; Hattan ve ark., 2021; Frahat ve ark., 2023; Peng ve ark., 2023). FDM'ler ısı için kullanıldığında kullanım amacına göre döngü stabilitesi değişeceği için faz ayrımı ana sorunlardan biri olmaktadır. FDM birkaç bileşenden oluştuğunda, döngü sonrası farklı bileşimlere sahip fazlar meydana gelebilmektedir (Zhu ve ark., 2009; Shahzad ve ark., 2021). Faz ayrımı sonrası oluşan farklı bileşime sahip fazlar ısı depolama için optimize edilmezlerse, daha sonra önemli ölçüde düşük ısı depolama kapasitesi gösterebilmektedir (Goia ve ark., 2014; Yuan ve Zhang, 2014). FDM olarak tercih edilecek malzeme dikkate alınması gereken en önemli özellik, ısıl enerji depolama kapasitesinin yüksek olması ve genel olarak inorganiklerin organiklerden daha yüksek olmasıdır (Yahay ve Ahmad, 2011; Vicente ve Silva, 2014; Hao ve ark., 2022; Yu ve ark., 2023). Ancak faz değiştiren malzemelerin yapı malzemelerinde kullanılmasında nano-FDM'lerin yapı malzemeleri ile etkileşime girmesi sonucu yapısı ve özelliklerinin değişebileceği (Agyenim ve ark., 2010; Biwan ve ark., 2015; Ramakrishnan ve ark., 2015; Yu ve ark., 2022), yapı servis ömrü boyunca sızıntı olabileceği göz ardı edilmeyerek bu sorunları çözmek için mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemeler, konveksiyonel yapı malzemelerine entegre edilmektedir (Tyagi ve ark., 2016; Alsaadawi ve ark., 2022; Bondareva ve Sheremet, 2022; Marani ve ark., 2023; Yan ve ark., 2023; Zhu ve ark., 2023).

Kapsüllemeler genellikle boyutlarına göre makro (Yu ve Tao, 2023) ve mikrokapsülleme olarak sınıflandırılmaktadır (Illampas ve ark., 2021; Cheng ve ark., 2023). Mikrokapsülleme, mikronize malzemelerin (hem sıvı hem de katı) boyutları 1 µm'den büyük 300 µm'den küçük değerler arasında

değişen kapsüller şeklinde paketlenme işlemidir (Tseng ve ark., 2005; Rao ve ark., 2007; Sarcinella ve ark., 2023). Mikrokapsülleme de çekirdek malzeme, kaplanacak spesifik malzeme olarak tanımlanır ve sıcaklığa bağlı olarak sıvı veya katı halde olabilmektedir (Schossig ve ark., 2005; Boh ve Simuga, 2008; Cabeza ve ark., 2011; Whang ve ark., 2013; Ma ve ark., 2014). Kapsülün içindeki öz malzemenin kütlece oranı genellikle %20 ile %95 değerleri arasındadır. Mikrokapsüller, tek bir partikül veya partikül kümelerinden meydana gelebilmektedir (Tan ve ark., 2009; Zhang ve ark., 2012; Qiu ve ark., 2014; Jacob ve Bruno, 2015). Mikrokapsülleme verimliliği, çekirdek-kaplama oranı, emülsifiye etme süresi ve çapraz bağlama maddesi miktarı gibi işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Kapsüllemenin yüzeyi, ısı transfer yüzeyi olarak işlev görmekte ayrıca bazı durumlarda, kapsülleme malzemeye bir yapı elemanı olarak mekanik stabilite katmaktadır (Zhang ve ark., 2004; Hunger ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2010; You ve ark., 2011). Zhao ve Zhang (2011) yaptıkları çalışmada termal enerji depolamada mikrokapsüllemiş FDM kullandıkları bir sistem geliştirmişlerdir. Çalışma sonucunda mikrokapsüllemiş faz değiştiren malzemenin FDM'ye göre artan bir ısı transfer alanına sahip olduğu ve FDM'lerin reaktivitesini azaltarak dış ortam ve depolama malzeme hacmindeki değişiklikleri kontrol altında tutabildiği belirlenmiştir (Zhao ve Zhang, 2011). FDM'ler, dar bir sıcaklık aralığında yüksek enerji depolama yoğunluğundan yararlanan fonksiyonel bir malzeme olduğu için uygulamanın yapılacağı ana iklim bölgeleri ve enlem aralıkları da dikkate alınmalıdır. FDM'lerin uygulama etkileri olarak binalarda termal performansı iyileştirme, enerji tasarrufu ve karbondioksit emisyonunun azaltılması için farklı iklim bölgelerinde incelenmesi gerekmektedir (Baetens ve ark., 2010; Raj ve Velaj, 2010; Kylili ve ark., 2016). Cui vd. (2017), FDM'lerin uygulama türlerini ve FDM termal-fiziksel özelliklerini baz alarak farklı iklimsel bölgelerde malzeme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırma alanları için ağırlıklı olarak 25°-60° kuzey enlemi ve 25°-40° güney enlemi üzerine yoğunlaşmışlardır. Çalışma sonuçları incelendiğinde tüm bölgelerde en yaygın kullanıma sahip olan parafinin maksimum kullanım sıklığı %87,5'e kadar çıkmaktadır. Organik faz değiştiren malzeme için, erime sıcaklığı ve füzyon ısısı sırasıyla 19°C-29°C ve 120 kJ/kg-280 kJ/kg arasında değişmektedir. Bulunan en iyi faz değiştiren malzeme uygulaması etkisi ile odadaki hava sıcaklığında 4,2°C'lik bir azalma meydana geldiği görülmüştür (Cui ve ark., 2017).

FDM'lerin duvarlara, tavana ve zemine dahil edilmesi binaların doğrudan güneş enerjisini yakalamasına ve önemli miktarda depolamasına imkan sağlamaktadır (Mandilaras ve ark., 2013; Soares ve ark., 2013). Büyük yapısal kütleye ihtiyaç duyulmadan iç ortamdaki hava sıcaklığı dalgalanma sıklığını azaltması ve sıcaklığı daha uzun bir süre boyunca istenen değere yakın tutması nedeniyle yapı ve yapı malzemelerinde organik, inorganik ve ötektik FDM kullanımı gittikçe artmaktadır (Weinlader ve ark., 2005; Barreneche, 2013; Evola ve ark., 2013; Kong ve ark., 2014). Lee vd. (2000), sıradan beton blokların termal depolama performansını karşılaştırmak için iki farklı malzeme olan Butil Stearat (Emerest 2326) ve Parafin (Unicere 55) ile empenye edilmiş FDM'leri yalnız FDM'yle karşılaştırarak makro ölçekli test sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca, ısı depolama ve tahliye oranlarının kontrolü açısından hava hızının etkisi incelemiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde iki farklı malzeme

ile emprenye edilmiş FDM'nin gizli ısıların yanı sıra betonun hissedilir ısını depolayabilen bloklar üretmek için uygun olduğu ve depolamanın daha pratik olarak yapılabildiği sonucuna varılmıştır (Lee ve ark., 2000).

Dora ve Mini (2023), nano silika ve hindistan cevizi lifi kombinasyonları içeren organik bir FDM'yi çimento harçlı karışımlara dahil ederek bir çalışma yapmışlardır. Başlangıçta, geliştirilen FDM'nin birincil özellikleri olan mekanik davranış, mikro yapı gözlemleri ve termal etkileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Uygulama sahasında kapasitesini tahmin etmek için, FDM kompozit harç levhaları geliştirilmiş ve fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir. Bu testlerin sonuçlarına dayanarak, FDM varlığının harç levhaların termal özelliklerini iyileştirdiği ve nano silika ve lif ilavesinin harç levhaların fiziksel ve mekanik mukavemetini arttırdığı sonucuna varılmıştır. Harcın karakterizasyonu ile ilgili olarak da eğilme mukavemetinde % 8,06 artış elde edilirken, klorür difüzyonunda % 10,24, su emmede % 17, kılcal su emme katsayısında % 8,56 ve ultrasonik darbe hızında azalma olduğu gözlenmiştir. SEM ve EDS test sonuçlarına göre, nano silika ve hindistan cevizi lifine ek olarak %5 FDM ile değiştirilen ince agrega, gözeneklerden etkili bir şekilde nüfuz ederek harçla daha iyi uyum sağladığı belirlenmiştir. TGA değerlendirmesi, önerilen FDM kompozit çimento harç levhasının mükemmel termal dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur (Dora ve Mini, 2023).

Moustapha vd. (2023), yüksek fırın cürufu ve metakaolin kombinasyonuna dayalı jeopolimer harçların ve portland çimento bazlı harçların sodyum klorür iyonu taşıma özelliklerine MFDM ilavesinin etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda on iki farklı harç (üç çimento bazlı ve dokuz jeopolimer bazlı), MFDM içeriği sırasıyla %0, %5 ve %10 olarak değiştirilerek iki harç tipinde incelenmiştir. Çalışma sonucunda MFDM ilavesinin toplam gözenekliliği arttırdığını, bunun da kılcal su emilimini arttırdığını ve elektrik direncini azalttığını belirlemiştir. Buna ek olarak MFDM ilavesi, aglomerasyon etkisinden dolayı kritik çapı ve gözenek bağlantısını da azaltmıştır. Ayrıca MFDM'lerin klorür iyonu bağlama kapasitesini de arttırdığı gözlenmiştir. Her iki etki de durağan durum geçiş katsayısının düşmesine neden olmuştur (Moustapha ve ark., 2023). Gbekou vd. (2022) ise %100 biyo-bazlı ince çekirdek-kabuk parçacıklarının sulu bir dağılımından oluşan mikrokapsüllü faz değişim malzemeleri (MFDM'ler) içeren çimento harçlarının mekanik ve termofiziksel performansını araştırmışlardır. Homojen bir partikül dağılımı sağlayan ve mikrokapsül sızıntısını önleyen harç numuneleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Harca MFDM'lerin eklenmesi hem yoğunluğun azalmasına, gözenekliliğin artmasına hem de önemli ölçüde mekanik dayanım kaybına neden olmuştur. Bununla birlikte sıcak disk karakterizasyonu, termal performansta büyük bir gelişme göstermiştir. Ağırlıkça %8 MFDM içeren harç harışımların, mekanik ve termal özellikleri arasında iyi bir denge sergilediği sonucuna varmışlardır (Gbekou ve ark., 2022).

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde, faz değiştiren malzemelerin özellikle çimento hamuru içerisindeki etkilerinin genellikle termal performans açısından gerçekleştirildiği görülmektedir. Çimentolu kompozitlerde farklı tipte FDM kullanımının reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi üzerine çok az sayıda araştırmalar yapılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada kapsüllü ve kapsülsüz olarak

faz değiştiren malzemelerin imento lu kompozitlerde kullanıldıklarında reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılarak karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel alışmalar imento esaslı harç karışımlar ile yapılmış olup, imento olarak Afyon imento Sanayi Fabrikasının retimi olan CEM I 42,5N Portland imento kullanılmıştır. Kullanılan imentonun özgül ağırlığı 3,1 ve özgül yüzey alanı 3320 cm²/g'dır. Portland imentonun kimyasal ve fiziksel zellikleri Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Çimento esaslı harç üretiminde özgül ağırlığı 2,64 olan 0,5-400 mikron aralığında silis kumu ve kimyasal katkı olarak da yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı Sika-Master Glenium 51 kullanılmıştır. Çimento esaslı harç karışımların üretiminde özel bir standart olmadığı için şehir şebeke suyu tercih edilmiştir.

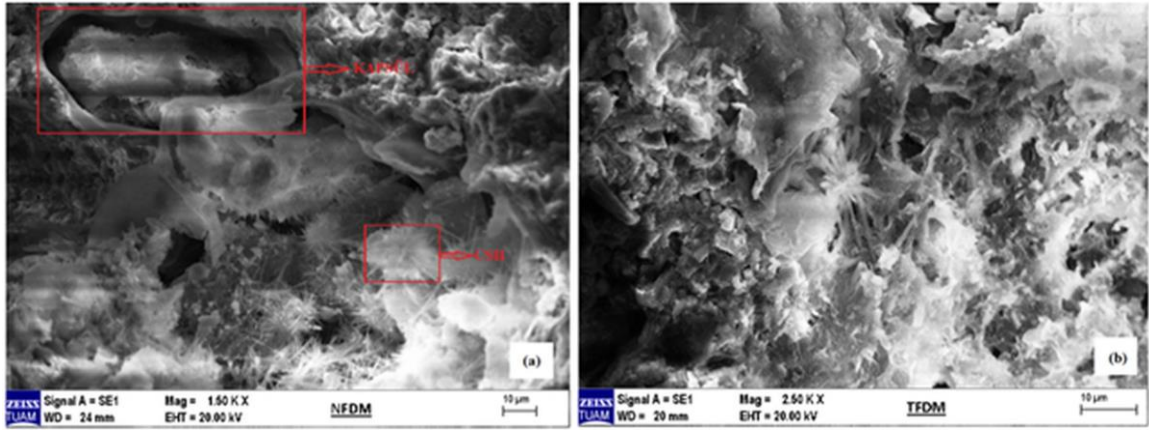
Tablo 1. Portland imentonun kimyasal zellikleri

Kimyasal Analiz	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
CEM I 42.5(%)	63,56	19,3	5,57	3,46	0,86	2,96	0,80	0,13

Tablo 2. Portland imentonun fiziksel özellikleri

Çimento Tipi	zgl Ağırlık	İncelik (cm ² /g)
CEM I 42.5N	3,10	3320

Deneysel çalışmalarda kullanılan FDM'ler 10 μm boyutu büyüklüğünde nano kapsüllenmiş halde olup, FDM'ler poliüretanla nano kapsüllenmiştir. Nano-kapsüller, arayüzey polimerizasyonu ile sentezlenerek oluşturulmuştur. Deneyslerde kullanılan numunelerin isimleri faz değiştiren malzeme tipine göre belirlenmiş olup kapsülsüz faz değiştiren malzemeler KPSLZ ile; nano-kapsüllü faz değiştiren malzemeler ise Nano-KPSL ile ifade edilmiştir. Nano-KPSL ve KPSLZ katkılı imento esaslı harçların SEM analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde LEO 1430 VP model SEM cihazında yapılmış olup, SEM görüntüleri şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. (a): Nano-KPSL ve (b): KPSLZ katkılı çimento esaslı harçların SEM görüntüleri

2.2. Harç Üretimleri

FDM'lerin çimentolu kompozitlerde kullanımına ilişkin yapılan çalışmalarda genellikle dayanım kayıpları da dikkate alındığında en fazla %5 oranında kullanılmıştır (Hunger ve ark., 2009; Ramakrishnan ve ark., 2015). Bu nedenle, deneysel çalışmalar çimento ağırlığının %0, %2,5 ve %5 oranında Nano-KPSL ve KPSLZ FDM katkılı harçlar üzerinde yapılmıştır. Harç karışım oranları ve bileşen miktarları Tablo 3'te gösterilmiştir. FDM katkı karışımlarda silis kumu yerine ikame edilmiştir. Harç karışımları %0,5 oranında yüksek oranda su azaltıcı süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak, 0,5 su/çimento oranında hazırlanmıştır.

Tablo 3. Harç karışım oranları ve bileşen miktarları

Karışım	Katkı oranı (%)	Çimento (gr)	Silis kumu (gr)	FDM (gr)	Su (gr)	Kimyasal katkı (gr)
Kontrol	0	750	450	---	375	3,75
KPSLZ2.5	2,5	750	431,25	18,75	375	3,75
KPSLZ5	5	750	412,50	37,50	375	3,75
Nano-KPSL2.5	2,5	750	431,25	18,75	375	3,75
Nano-KPSL5	5	750	412,50	37,50	375	3,75

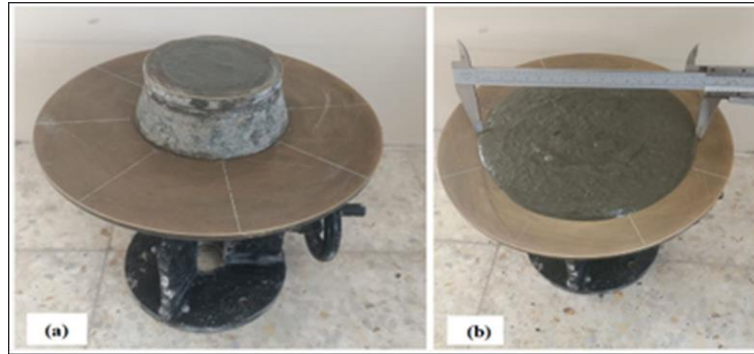
Karışımında yer alan tüm bileşenler laboratuvar tipi mekanik mikserde öncelikle kuru olarak karıştırılmıştır. Sonrasında kimyasal katkı karışım suyu içinde çözdürülerek kuru karışıma eklenmiş ve homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Deneysel çalışmalar için çimento esaslı FDM katkılı harç karışımların hazırlanması

2.3. Deneysel

Çalışma kapsamında harçların reolojik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için yayılma, viskozite, ultrases geçiş hızı ve elektriksel özdirenç deneyi; mekanik özellikleri belirlemek için de basınç ve eğilme deneyi yapılmıştır. İlk olarak taze harç karışımların yayılma deneyi TS EN-12350-6 (2010) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Harç karışımlar, yayılma tablası üzerine yerleştirilen koniye doldurulduktan sonra koninin yukarıya doğru çekilmesiyle harç tabla üzerine bırakılmıştır. Harç yayılma tablası üzerinde iken tabla kolu çevrilerek 15 vuruş yaptırılmıştır. Darbe sonrası yayılan harçların yayılma çapları ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 3).



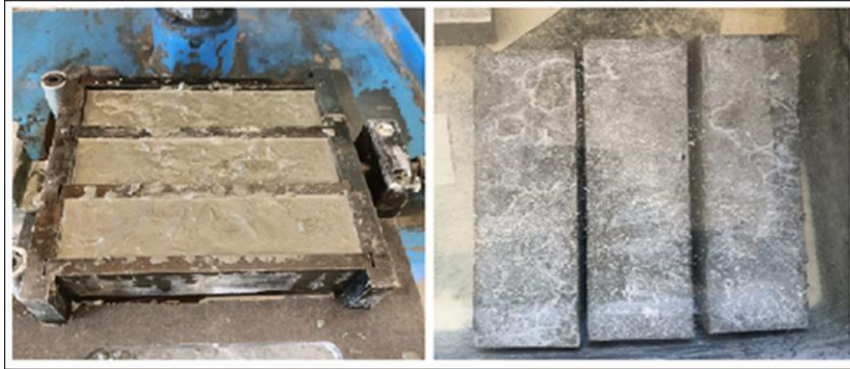
Şekil 3. (a): Mini koni içerisine harç yerleştirilmesi. (b): Harcın yayılma çapının ölçülmesi

Çimento esaslı, %0, %2,5 ve %5 oranında faz değiştiren malzeme katkılı harç karışımların viskozite ölçümleri Brookfield RV-II Pro marka viskozite cihazı ile yapılmış olup, V-73 nolu kanat şeklindeki uç kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Çimento esaslı FDM katkılı harçların viskozitelerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında yapılacak her bir deney için üçer adet numune hazırlamak amacıyla 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik kalıpların iç yüzeylerinin yağlanması işlemi yapılmıştır. Harçların masa tipi vibrasyon makinesi ile prizmatik kalıplar içerisine yerleştirilmesi sağlandıktan sonra 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. 24 saat sonunda numuneler kalıplarından çıkartılıp dayanım kazanması için sıcaklığın 20 ± 2 °C olduğu ortamdaki su havuzunda (3,7, 28 gün) boyunca standart kür işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 5). İlgili deney günlerinde sertleşmiş harçlar üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş olup, deneylerden elde edilen verilerin ortalaması sonuç olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5. Harç karışımların kalıplanması ve kür edilmesi

Ultrases geçiş hızı deneyinde kullanılacak prizmatik numunelerin yüzeyleri temizlendikten sonra problemler ile numune yüzeyi arasında boşluk oluşmasını engellemek için jel sürülmüştür. Numunelerde ultrases deneyi direkt ölçüm yöntemiyle yapılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Ultrases cihazı ile ölçümlerin yapılması

Deney numunelerinin ASTM C 1760 (2012) standardına göre elektriksel özdirenç değeri (R), 0.1,1,10 ve 100 kHz frekans değerleri için iki plaka yöntemine göre ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 7). Harç numunelerinin elde edilen direnç değerleri ile

$$\delta = (R * A)/L \quad (1)$$

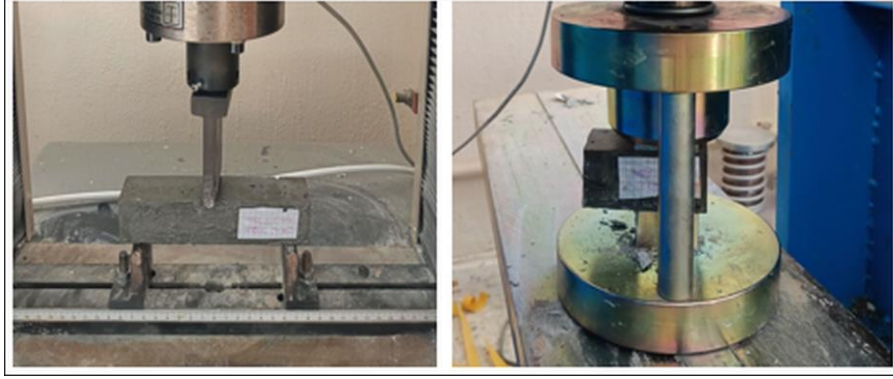
Elektriksel özdirenç değerleri hesaplanırken bağıntı (1) kullanılmıştır. Bağıntıda, δ , elektriksel özdirenç (kohm.m); R,direnç (kohm); ve L, plakalar arası mesafeyi (m) ve A, numune yüzey alanı (m²) ile gösterilmektedir.



Şekil 7. Elektriksel direnç ölçümü

Deney numunelerinin eğilmede çekme dayanımları TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak Mitech marka cihazda, mesnet açıklığı 120 mm'ye ayarlanarak 40x40x160 mm boyutlu numunelerde orta noktadan yükleme yöntemi ile belirlenmiştir. TS EN 12390-3 (2010) standardına göre

gerçekleştirilen basınç deneyleri için eğilmede çekme dayanımı deneyi sonrası ortadan ikiye bölünen numuneler kullanılmıştır (Şekil 8).



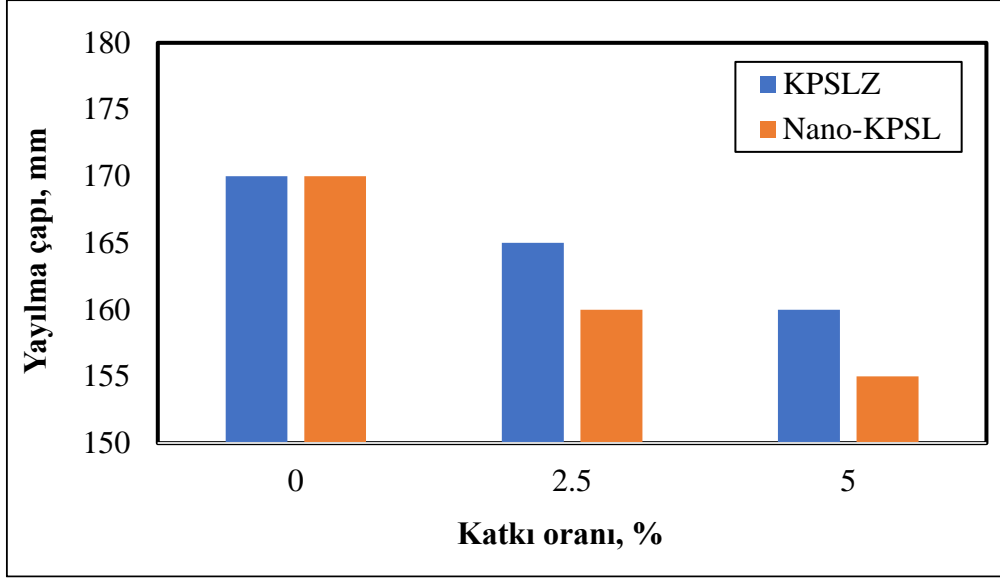
Şekil 8. Deney numunelerinde eğilme ve basınç dayanımı

3. Bulgular ve Tartışma

Çimento harçlarının içerisine nano-kapsüllü FDM (Nano-KPSL) ve kapsülsüz FDM (KPSLZ) ilave edilmesiyle elde edilen numuneler ile kontrol numunesi üzerinde yapılan deneysel çalışmaların verileri toplandıktan sonra gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

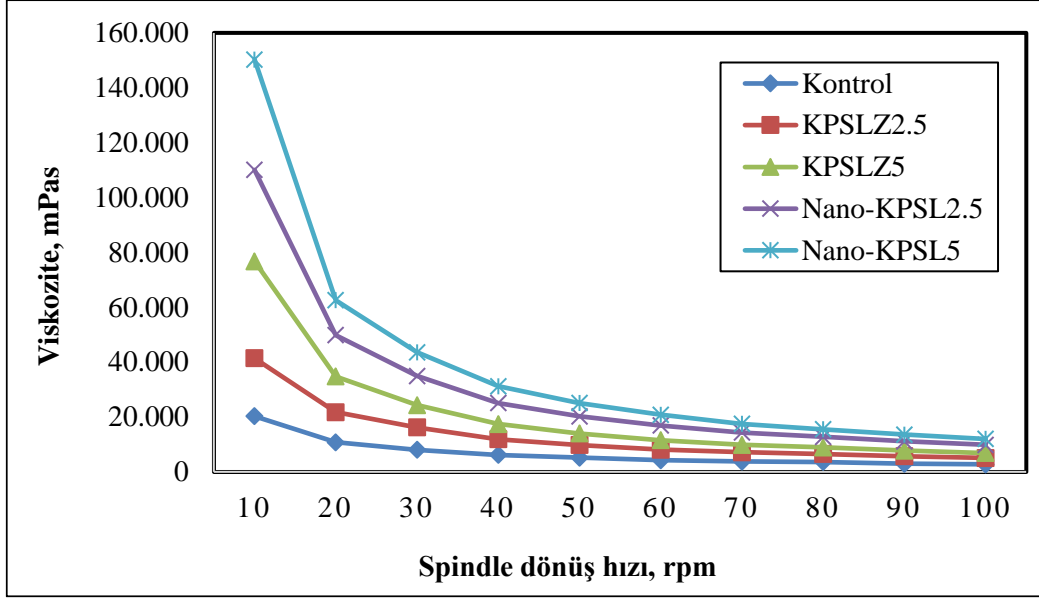
3.1. Taze Harç Üretimleri

Çimento esaslı harçlarının içerisine %0, %2,5 ve %5 Nano-KPSL ve KPSLZ katkıların eklenmesiyle hazırlanan numunelerin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 9'da verilmektedir. Çimento esaslı faz değiştiren malzeme katkılı harçlarda, her iki FDM tipi için kullanım oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Cabeza vd. (2007) bu sonucu faz değiştiren malzemenin harçlarda katkı olarak kullanılması ile karışımdaki granüler dağılımın değişmesine bağlamışlardır (Cabeza ve ark., 2007). Kontrol harcına göre %2,5 ve %5 oranında KPSLZ harç için yayılma çapındaki azalma oranı %3 ve %6; Nano-KPSL harç için ise %6 ve %9'dur. KPSLZ katkılı çimento esaslı harçlarda Nano-KPSL katkı içeren harçlara göre %3 oranında daha yüksek yayılma çapı değerleri elde edilmiştir. Kapsülsüz kullanılan faz değiştiren malzemenin çimento esaslı karışıma ilave edilirken doğrudan sıvı halde kullanılması, harcın işlenebilirliğinin kapsüllenmiş faz değiştiren malzeme katkı kullanımına göre kısmen artırmasına neden olmuştur. Pires vd. (2013) kapsüllenmiş FDM'lerin hidrofilik akrilik kabuğu tarafından suyun emilmesi nedeniyle yayılma çapının azalabileceğini belirterek bu sonuçları desteklemişlerdir (Pires ve ark.,2013).



Şekil 9. Harçların FDM katkısına bağlı yayılma çaplarındaki değişim

FDM'li harçların görünen viskozitelerindeki değişimler 10-100 dev/dk kayma hızı değerlerinde ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 10). Çimento esaslı harçların görünen viskozite değerlerinin olabildiğince düşük olması yüksek akışkanlığa sahip oldukları anlamına gelmektedir. Tüm harç karışımlarının görünen viskozite değerleri deformasyon hızının artırılmasıyla birlikte azalmaktadır. Hem Nano-KPSL hem de KPSLZ katkılı harçlarda tüm hız değerlerinde kontrol numuneye göre daha yüksek viskozite değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte KPSLZ katkılı numuneler Nano-KPSL katkılı numunelerle kıyaslandığında daha düşük viskozite değerinde olduğu görülmüştür. Yayılma değerlerinde olduğu gibi, KPSLZ sıvı halde karışıma ilave edildiğinden harcın akışkanlığa karşı direnci azalmış ve görünen viskozite değerlerinin katı partikül halinde olan Nano-KPSL katkısına göre daha yüksek olmasını sağlamıştır. Pilevhar vd. (2020) yaptıkları çalışmada akma gerilmesi ve plastik viskozitenin daha yüksek miktarda mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzeme (MEPCM) içeren harçlarda artmasını MEPCM yüzeyinin daha fazla su emmesinden olabileceğini belirtmişlerdir (Pilevhar ve ark., 2020).



Şekil 10. Deneysel numunelerin görünen viskozite değerleri

3.2. Ultrases Geçiş Hızı

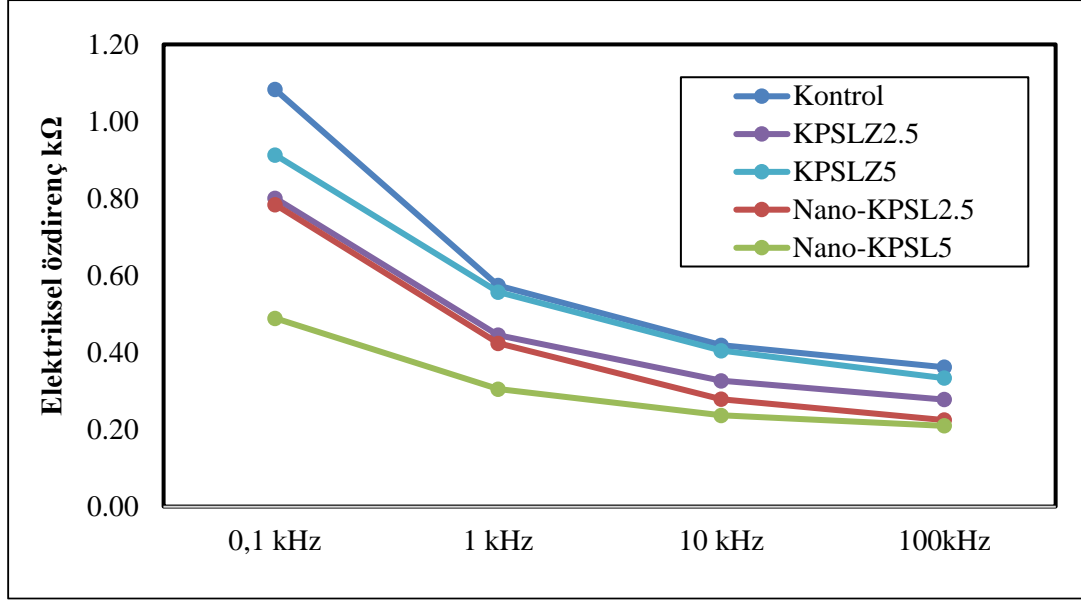
Ultrases geçirgenliğine bağlı olarak beton dayanımı açısından kalite değerlendirmesi yapılabilmektedir. Deneysel numuneleri üzerinde yapılan ultrases geçiş hızı (UPV) deney sonuçları incelendiğinde kontrol numune ile faz değiştiren malzeme katkıli numunelerin değerlerinde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir (Şekil 11). Tüm FDM katkıli harçların UPV değerleri kontrol harca göre az da olsa daha düşük değerlere sahiptir. Nano-KPSL katkıli numunelerde kontrol harca göre %19 oranında daha düşük UPV elde edilmiştir. FDM'li harçlar içerisinde en yüksek ultrases geçiş hızı %2,5 KPSLZ katkıli harçlarda, en düşük ultrases geçiş hızı %5 Nano-KPSL katkıli numunelerde elde edilmiştir. Nano-KPSL malzemeler polimerik malzemelerden üretilmeleri nedeniyle harç içerisinde sesin iletilmesini kısmen de olsa yavaşlatmış ve bundan dolayı da UPV değerlerinin diğer harçlara göre daha düşük olmasına neden olmuştur. Zebari vd. (2017) çimentolu kompozitlerin ultrases geçiş hızı değerleriyle dayanımları arasında ki etkileşim üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada verilen bilgilere göre, Nano-KPSL olan seriler orta dayanım sınıfındayken, KPSLZ olan serilerin kalitesi dayanım açısından iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 11. Deney numunelerinin ultras ses geçiş hızı

3.3. Elektriksel Özdirenç

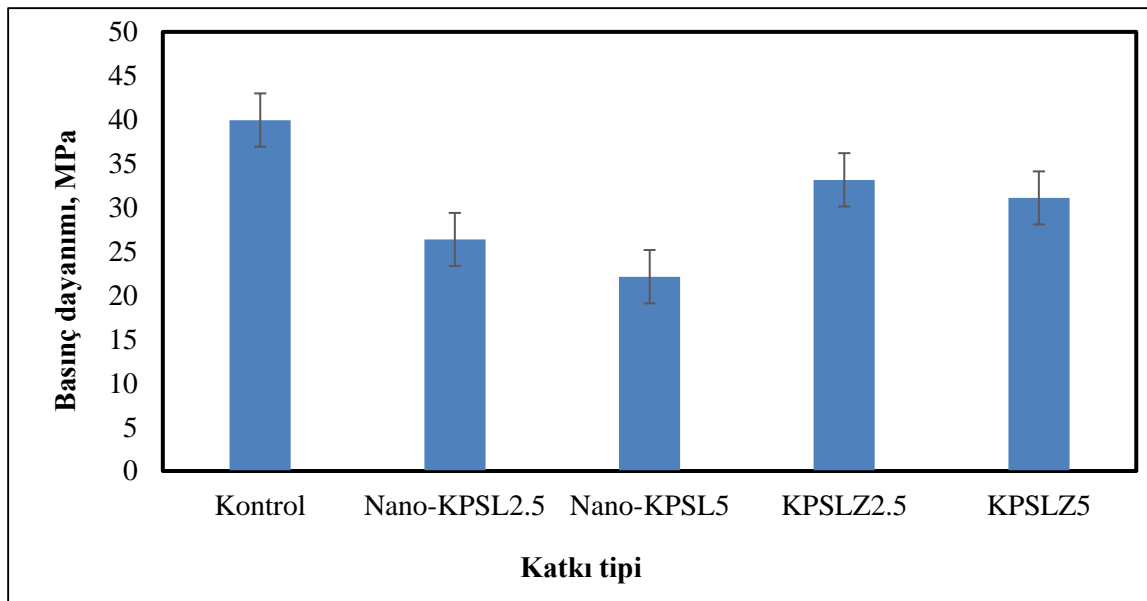
Çimento esaslı harçların kullanıldığı yerlerde özellikle inşaat donatısı olması durumunda korozyon riski ortaya çıkmaktadır. İnşaat demirinin korozyonunda en önemli etkenlerden birisi de ortamın elektrik iletkenliğidir (Hornbostel ve ark., 2013). Çimento esaslı harçlarda %0, %2,5 ve %5 FDM katkı kullanımı ile elde edilen numunelerin elektriksel özdirenç değerleri 0.1,1,10 ve 100 kHz frekans için grafikte gösterilmiştir (Şekil 12). Çimento esaslı harçlarda frekans artışına paralel olarak iyon transferinin hızlanması daha düşük değerlerde elektriksel özdirenç elde edilmesine neden olmaktadır. Farklı frekans değerleri için numunelerin elektriksel özdirençleri incelendiğinde Nano-KPSL artışına bağlı olarak özdirenç değerleri azalmıştır. Ancak, KPSLZ içeren harçlarda düşük frekans değerinde tersine durum gözlenmiş olup, elektriksel özdirenç değerleri kapsülsüz FDM içerisine bağlı olarak artmıştır. Bunun nedeni kapsülün yüzey geriliminden dolayıdır (Mira-Hernández, 2025). Hornbostel ve ark., (2013) çimentolu kompozitlerin elektriksel özdirenç değerleri açısından korozyon risk durumlarını sınıflandırmışlardır. Klorür bulunan ortamlarda 0,3-1,0 kohm değerleri arasında düşük korozyon riski; 0,3-0,1 kohm değerleri arasında orta derecede korozyon riski olduğunu belirtmişlerdir. FDM katkılı harçların elektriksel özdirenç değerleri dikkate alındığında; düşük frekansta orta derecede korozyon riski, yüksek frekans değerlerinde ise düşük korozyon riski oluşturacağı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 12. FDM katkılı numunelerin farklı frekanslar için elektriksel öz direnç değerleri

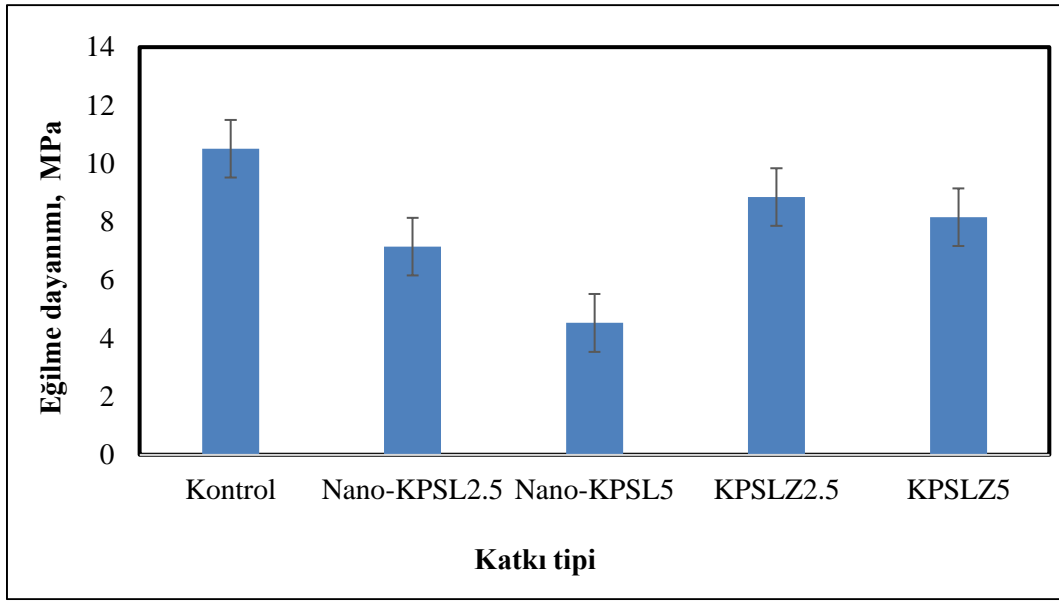
3.4. Basınç ve Eğilme Dayanımı

FDM katkılı tüm numunelerin basınç ve eğilme dayanımı sonuçları kontrol numune ile karşılaştırıldığında daha düşük değerler elde edilmiştir. Ayrıca FDM kullanım oranının artmasıyla birlikte her iki katkı tipinde dayanım azalmıştır. KPSLZ katkılı harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %17 ve %22 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %34 ve %44 oranlarında olmuştur (Şekil 13). Fenollera ve ark., (2013) benzer bir çalışmada karışıma eklenen her %5 oranındaki mikrokapsüllenmiş FDM'nin, harç dayanımını yaklaşık %7 oranında azalttığını gözlemlemiştir (Fenollera ve ark., 2013).



Şekil 13. Deney numunelerinin basınç dayanımı

Eğilme dayanımında ise tüm numunelerin değerleri kontrol numune değerine göre azalmıştır. Bütün katkıli numunelerde FDM oranı arttıkça eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir. Kontrol numuneye göre KPSLZ katkıli harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %32 ve %57 iken Nano-KPSL katkıli harçlar için yaklaşık %16 ve %22 oranlarında olmuştur (Şekil 14). Çoğu araştırma sonucunda, mikrokapsüllenmiş faz değiştiren malzemenin çimento kompozitinin gözenekliliğini arttırdığı dolayısıyla da mekanik özelliklerini etkilediğı vurgulanmıştır (Djamai ve ark., 2019; Drissi ve ark., 2021). Harçların karışırma işleminde bazı FDM kapsülleri hasar görebilir ve sızan parafin mumu çimento matrisinin hidrasyon işlemini engelleyebilir. Bunun sonucunda buldukları bölgede zayıf alanlar oluşması nedeniyle harç dayanımlarında azalmalar görülebileceğı belirtilmiştir (Illampas ve ark., 2021; Marani ve ark., 2023).



Şekil 14. Deney numunelerinin eğilme dayanımı

4. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, farklı oranlarda Nano-KPSL ve KPSLZ katkı içeren çimento esaslı harçların reolojik, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

- Çimento esaslı harçların işlenebilirlikleri hem kapsülsüz hem de nano-kapsüllü FDM kullanılmasıyla azalmıştır. Nano-KPSL katkı oranının %2,5 ve %5 olduğu harçlarda, yayılma çapı değerinin kontrol harcına göre %6 ve %9; KPSLZ harç için ise aynı katkı oranlarındaki yayılma çapı değerinin %3 ve %6 oranında azaldığı görülmüştür.
- Görünen viskozite değerleri incelendiğinde, Nano-KPSL ve KPSLZ katkıli çimento esaslı numunelerde katkı oranı artışının viskozitenin artmasına neden olduğu gözlenmiştir. Ayrıca KPSLZ katkıli numunelerin Nano-KPSL katkıli numunelere göre daha düşük viskoziteye sahip oldukları sonucuna varılmıştır. Diğer yandan, harç karışımların tamamında deformasyon hızının artırılmasıyla

birlikte görünen viskozite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Kontrol numunede katkılı numunelere göre bütün deformasyon hızları için daha düşük viskozite değeri elde edilmiştir.

- FDM'li harçlar içerisinde en yüksek ultrases geçiş hızı %2,5 KPSLZ katkılı harçta elde edilirken en düşük değer %5 Nano-KPSL katkılı numunelerde elde edilmiştir. Faz değiştiren malzeme katkılı çimento esaslı harç numunelerde gerçekleştirilen ultrases deney sonuçları incelendiğinde, kontrol numuneye göre Nano-KPSL'li katkılı numunelerde %19 oranında daha düşük UPV elde edilmiştir.
- Deney numunelerinin farklı frekans değerleri için elektriksel özdirençleri incelendiğinde frekans artışına bağlı olarak direnç değerleri azalmıştır. En yüksek elektriksel özdirenç kontrol numunesinde, en düşük değer de %5 Nano-KPSL ilaveli numunede elde edilmiştir. Harç içerisinde Nano-KPSL oranı arttıkça elektriksel özdirenç azalmakta, KPSLZ oranı arttığında ise artmaktadır.
- FDM kullanım oranının %2,5'tan %5 oranına artırılmasıyla da her iki katkı tipinde dayanım azalmıştır. KPSLZ katkılı harçlarda bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %17 ve %22 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %34 ve %44 oranlarında olmuştur.
- Kontrol numuneye göre KPSLZ katkılı harçlarda eğilme dayanımında azalma meydana gelmiş olup, bu azalma oranları sırasıyla yaklaşık %32 ve %57 iken Nano-KPSL katkılı harçlar için yaklaşık %16 ve %22 oranlarında olmuştur.

FDM'nin kapsüllü ve kapsülsüz olarak fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi genel olarak değerlendirildiğinde, kapsülsüz olarak kullanımı durumunda kontrol harca göre az da olsa azalmalar olmakla birlikte, kapsüllü kullanılması durumunda olumsuz etkisi daha fazla olmuştur. Ancak, FDM'lerin ısıl performans açısından tekrarlı kullanımda kapsüllü olanlar daha etkili olmaktadır. Kapsülsüz olanlar harç içerisinde hidrasyon ürünleri arasında sıvı olarak dağıldığından ısıl özellikler açısından çok az ömürleri olacaktır. Bu nedenle kapsüllü FDM kullanımı ısıl enerji depolama ve tekrar kullanım açısından daha etkili olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmayı destekleyen YÖK100/2000 doktora programına ve TÜBİTAK 221M784'e teşekkür ederiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Hazırlanmış olan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması yoktur. Sunulan makale için etik kurul izni alınmasına gerek bulunmamaktadır.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yapılan çalışmada 1. ve 2. yazar çalışma taslağının oluşturulması ve bu taslak çerçevesinde gerekli materyallerin belirlenip tedarikinin sağlanması, literatür araştırması, deneysel çalışmaların yapılarak sonuçların analiz edilmesi, makalenin içerik ve yazım denetiminin yapılmasında katkı sunmuşlardır.

Kaynakça

- Agyenim F., Hewitt N., Eames P., Smyth M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14(2): 615-628.
- Albdour SA., Haddad Z., Sharaf OZ., Alazzam A., Abu-Nada E. Micro/nano-encapsulated phase-change materials (ePCMs) for solar photothermal absorption and storage, Fundamentals, recent advances, and future directions. *Progress in Energy and Combustion Science* 2022; 93: 101037.
- Alsaadawi MM., Amin M., Tahwia AM. Thermal, mechanical and microstructural properties of sustainable concrete incorporating Phase change materials. *Construction and Building Materials* 2022; 356: 129300.
- Anisur MR., Mahfuz MH., Kibria MA., Saidur R., Metselaar IHSC., Mahlia TMI. Curbing global warming with phase change materials for energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 18: 23-30.
- ASTM C1760. Standard test method for bulk electrical conductivity of hardened concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- Baccega E., Bottarelli M., Cesari S. Addition of granular phase change materials (PCMs) and graphene to a cement-based mortar to improve its thermal performances. *Applied Thermal Engineering* 2023; 229: 120582.
- Baetens R., Jelle BP., Gustavsen A. Phase change materials for building applications, A state-of-the-art review. *Energy and Buildings* 2010; 42: 1361-1368.
- Barreneche C. Evaluation in the macroscale. *Applied Energy* 2013; 109: 428-432.
- Biwan X., Hongyan M., Zeyu L., Zongjin L. Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. *Applied Energy* 2015; 160: 358-367.
- Boh B., Sumiga B. Microencapsulation technology and its applications in building construction materials. *Materials and Geoenvironment* 2008; 55: 329-344.
- Bondareva NS., Sheremet MA. Heat transfer performance in a concrete block containing a phase change material for thermal comfort in buildings. *Energy and Buildings* 2022; 256: 111715.
- Cabeza LF., Castell A., Barreneche C., Gracia D., Fernández I. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15: 1675-1695.
- Cabeza LF., Castellón C., Nogués M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O. Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. *Energy Building* 2007; 39: 113-119.
- Cheng J., Kang M., Lin W., Liang C., Liu Y., Wang Y., Niu S., Zhang F. Preparation and characterization of phase change material microcapsules with modified halloysite nanotube for controlling temperature in the building. *Construction and Building Materials* 2023; 362: 129764.
- Cui Y., Xie J., Liu J. Review of phase change materials integrated in building walls for energy saving. *Procedia Engineering* 2015; 121: 763-770.

- Cui Y., Xie J., Liu J., Wang J., Chen S. A review on phase change material application in building. *Advances in Mechanical Engineering* 2017; 9(6): 1687814017700828.
- Das R., Gandhi ISR., Muthukumar P. Use of agglomerated Micro-encapsulated phase change material in cement mortar as thermal energy storage material for building. *Materials Today: Proceedings* 2022; 65(2): 808-814.
- Djamai ZI., Salvatore F., Si Larbi A., Cai G., El Mankibi M. Multiphysics analysis of effects of encapsulated phase change materials (PCMs) in cement mortars. *Cem. Concr. Res.* 2019; 119: 51-63.
- Dora S., Mini KM. Performance assessment of capric acid-ethyl alcohol/expanded vermiculite phase change material incorporated cement mortar for thermal insulation in buildings. *Journal of Energy Storage* 2023; 72(C): 108550.
- Drissi S., Mo KH., Falchetto AC., Ling TC. Understanding the compressive strength degradation mechanism of cement-paste incorporating phase change material. *Cem. Concr. Compos.* 2021; 124: 104249.
- Dutil Y., Rouse D., Lassue S. Modeling phase change materials behavior in building applications, comments on material characterization and model validation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 61: 132-135.
- Evola G., Marletta L., Sicurella F. A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Building and Environment* 2013; 59: 517-527.
- Fenollera M., Míguez J., Goicoechea I., Lorenzo J., Ángel Álvarez M. The influence of phase change materials on the properties of self-compacting concrete. *Materials* 2013; 6: 3530-3546.
- Frahat NB., Amin M., Heniegal AM., Omar IOM. Optimizing microencapsulated PCM ratios of sustainable cement mortar for energy savings in buildings. *Construction and Building Materials* 2023; 391: 131844.
- Gbekou FK., Benzarti K., Boudenne A., Eddhahak A., Duc M. Mechanical and thermophysical properties of cement mortars including bio-based microencapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials* 2022; 352: 129056.
- Goia F., Bianco L., Cascone Y. Experimental analysis of an advanced dynamic glazing prototype integrating PCM and thermotropic layers. *Energy Proced* 2014; 48: 1272-1281.
- Guardia C., Barluenga G., Palomar I. Evaluation of the energy storage capacity of phase change material cement-lime mortars by using heat flux meters and ultrasonic pulse transmission. *Journal of Energy Storage* 2022; 50: 104674.
- Hao L., Xiao J., Sun J., Xia B., Cao W. Thermal conductivity of 3D printed concrete with recycled fine aggregate composite phase change materials. *Journal of Cleaner Production* 2022; 364: 132598.
- Hattan HA., Madhkhani M., Marani A. Thermal and mechanical properties of building external walls plastered with cement mortar incorporating shape-stabilized phase change materials (SSPCMs). *Construction and Building Materials* 2021; 270: 121385.

- Hornbostel K., Larsen CK., Geiker MR. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate-A literature review. *Cement and Concrete Composites* 2013; 39: 60-72.
- Hunger M., Entrop AG., Mandilaras I., Brouwers HJH., Founti M. The behaviour of self-compacting concrete microencapsulated phase change materials. *Cement & Concrete Composites* 2009; 31: 731-743.
- Illampas R., Rigopoulos I., Ioannou I. Influence of microencapsulated Phase Change Materials (PCMs) on the properties of polymer modified cementitious repair mortar. *Journal of Building Engineering* 2021; 40: 102328.
- Jacob R., Bruno F. Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015; 48: 79-87.
- Kong X., Lu S., Li Y. Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application. *Energy Buildings* 2014; 81: 404-415.
- Kumar GN., Ram VV., Parameshwaran R. Thermal and structural properties of cement mortar embedded with hybrid nanocomposite based phase change nanocapsules for building application. *Construction and Building Materials* 2023; 385: 13148.
- Kumar R., Misra M., Kumar R., Gupta D., Khatri P., Tak B. Phase change materials, technology status and potential defence applications. *Defence Science Journal* 2011; 61: 576-582.
- Kylili A., Fokaides PA. Life cycle assessment (LCA) of phase change materials (PCMs) for building applications. A review. *Journal of Building Engineering* 2016; 6: 133-143.
- Lee T., Hawes DW., Banu D., Feldman D. Control aspects of latent heat storage and recovery in concrete. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2000; 62(3): 217-237.
- Lin Y., Jia Y., Alva G., Fang G. Review on thermal conductivity enhancement, thermal properties and applications of phase change materials in thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 82: 2730-2742.
- Ma Y., Sun S., Li J., Tang G. Preparation and thermal reliabilities of microencapsulated phase change materials with binary cores and acrylate-based polymer shells. *Thermochim Acta* 2014; 588: 38-46.
- Mandilaras I., Stamatiadou M., Katsourinis D., Zannis G., Founti M. Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls. *Building and Environment* 2013; 61: 93-103.
- Marani A., Zhang L., Nehdi ML. Design of concrete incorporating microencapsulated phase change materials for clean energy, A ternary machine learning approach based on generative adversarial network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2023; 118: 105652.

- Marani A., Zhang L., Nehdi ML. Design of concrete incorporating microencapsulated phase change materials for clean energy, A ternary machine learning approach based on generative adversarial networks". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2023; 118: 105652.
- Mira-Hernández C., Travaglini G., Dolfi A., Mancin S. Electrical properties of phase change materials for electrical impedance-based sensing of the liquid fraction. *Journal of Energy Storage* 2025; 113: 115625.
- Moustapha BE., Bonnet S., Khelidj A., Maranzana N., Froelich D., Khalifa A., Babah IA. Effects of microencapsulated phase change materials on chloride ion transport properties of geopolymers incorporating slag and, metakaolin, and cement-based mortars. *Journal of Building Engineering* 2023; 74: 106887.
- Muraleedharan M., Nadir Y. Geopolymer mortar integrated with phase change materials for improvement of thermal efficiency in buildings: A review. *Materials Today: Proceedings* 2021; 44(1): 878-885.
- Peng L., Wu H., Mao Q. Numerical and experimental study on the performance of a thermal energy storage in a solar building. *Journal of Energy Storage* 2023; 61: 106745.
- Pilehvar S., Szczotok AM., Carmona M., Pamies R., Kjøniksen AL. The effect of microencapsulated phase change materials on the rheology of geopolymer and Portland cement mortars. *J Am Ceram Soc.* 2020, 103: 5852-5869.
- Pires L., Silva PD., Castro Gomes JP. Experimental study of an innovative element for passive cooling of buildings. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2013; 4: 29-35.
- Qiu X., Lu L., Wang J., Tang G., Song G. Preparation and characterization of microencapsulated n-octadecane as phase change material with different n-butyl methacrylate-based copolymer shell. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2014; 128: 102-111.
- Raj VAA., Velraj R. Review on free cooling of buildings using phase change materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 2819-2829.
- Ramakrishnan S., Sanjayan J., Wang X., Alam M., Wilson J. A novel paraffin/expanded perlite composite phase change material for prevention of PCM leakage in cementitious composites. *Applied Energy* 2015; 157: 85-94.
- Rao Y., Lin G., Luo Y., Chen S., Wang L. Preparation and thermal properties of microencapsulated phase change material for enhancing fluid flow heat transfer. *Heat Transfer-Asian Research* 2007; 36: 28-37.
- Rebelo F., Figueiredo A., Vicente R., Ferreira VM. Study of a thermally enhanced mortar incorporating phase change materials for overheating reduction in buildings. *Journal of Energy Storage* 2022; 46: 103876.
- Sarcinella A., Barroso de Aguiar JL., Jesus C., Frigione M. Thermal properties of PEG-based form-stable phase change materials (PCMs) incorporated in mortars for energy efficiency of buildings. *Journal of Energy Storage* 2023; 67: 107545.

- Schossig P., Henning HM., Gschwander S., Haussmann T. Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 2005; 89(2-3): 297–306.
- Shahzad Q., Shen J., Naseem R., Yao Y., Waqar S., Liu W. Influence of phase change material on concrete behavior for construction 3D printing. *Construction and Building Materials* 2021; 309: 125121.
- Soares N., Costa JJ., Gaspar AR., Santos P. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings `energy efficiency. *Energy and Buildings* 2013; 59: 82-103.
- Tan FL., Hosseinizadeh SF., Khodadadi JM., Fan L. Experimental and computational study of constrained melting of phase change materials (PCM) inside a spherical capsule. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2009; 52: 3464-3472.
- Tseng YH., Fang MH., Tsai PS., Yang YM. Preparation of microencapsulated phase-change materials (MCPCMs) by means of interfacial polycondensation. *Journal of Microencapsulation* 2005; 22: 37-46.
- TS EN 12350-6, 2010, Beton – Taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-5, 2010, Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 5: deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tyagi VV., Pandey AK., Buddhi D. Thermal performance assessment of encapsulated PCM based thermal management system to reduce peak energy demand in buildings. *Energy and Buildings* 2016; 117: 44-52.
- Vicente R., Silva T. Brick masonry walls with PCM macrocapsules, an experimental approach. *Applied Thermal Engineering* 2014; 67: 24-34.
- Wang H., Wang JP., Wang X., Li W., Zhang X., Preparation and properties of microencapsulated phase change materials containing two-phase core materials. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2013; 52: 14706-14712.
- Waqas A., Ud Din Z. Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings-a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013; 18: 607-625.
- Weinlader H., Beck A., Fricke J. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. *Solar Energy* 2005; 78: 177-186.
- Yahay NA., Ahmad H. Numerical investigation of indoor air temperature with the application of PCM gypsum board as ceiling panels in buildings. *Procedia Engineering* 2011; 20: 238-244.
- Yan B., Lu H., Li M., Wang X., Wang Z., Pi M., Cui W., Ran R. Preparation of phase change microcapsules with high thermal storage and temperature sensitive for thermal management. *Journal of Energy Storage* 2023; 64: 107003.

- You M., Wang X., Zhang X., Zhang L., Wang J. Microencapsulated n-Octadecane with styrene-divinylbenzene co-polymer shells. *Journal of Polymer Research* 2011; 18: 49-58.
- Yu B., Li S., Zhu H., Jiang Q., Wang D., Chen Y. A composite phase change material for improving the freeze–thaw resistance performance of cement mortars. *Construction and Building Materials* 2023; 387: 131657.
- Yu K., Liu Y., Jia M., Wang C., Yang Y. Thermal energy storage cement mortar containing encapsulated hydrated salt/fly ash cenosphere phase change material. Thermo-mechanical properties and energy saving analysis. *Journal of Energy Storage* 2022, 51: 104388.
- Yu XK., Tao YB. Improvement of thermal cycle stability of paraffin/expanded graphite composite phase change materials and its application in thermal management. *Journal of Energy Storage* 2023; 63: 107019.
- Yuan Y., Zhang N. Preparation and thermal characterization of capric–myristic–palmitic acid/expanded graphite composite as phase change material for energy storage. *Materials Letters* 2014; 125: 154-157.
- Zastawna-Ruminand A., Nowak K. Experimental thermal performance analysis of building components containing phase change material (PCM). *Procedia Engineering* 2015; 108: 428-435.
- Zebari Z., Bedirhanoglu İ., Aydın M. Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi* 2017; 8: 1.
- Zhang GH., Bon SAF., Zhao CY. Synthesis, characterization and thermal properties of novel nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy* 2012; 86: 1149-1154.
- Zhang P., Ma ZW., Wang RZ. An overview of phase change material slurries. *MPCS and CHS, Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 598-614.
- Zhang XX., Tao XM., Yick KL., Wang XC. Structure and thermal stability of microencapsulated phase-change materials. *Colloid & Polymer Science* 2004; 282: 330-336.
- Zhao CY., Zhang GH. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs), Fabrication, characterization and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011; 15(8): 3813-3832.
- Zhu L., Dang F., Ding W., Sang G., Wang Q., Jiao K. Thermo-physical properties of light-weight aggregate concrete integrated with micro-encapsulation phase change materials, Experimental investigation and theoretical model. *Journal of Building Engineering* 2023; 69: 106309.
- Zhu N., Ma Z., Wang S. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials, a review. *Energy Conversion and Management* 2009; 50: 3169-3181.