

JOURNAL OF ICIVILTECH

INNOVATIONS IN CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY

YEAR: **2023** VOLUME: **5** ISSUE: **2**

EARTHQUAKE **ENGINEERING**

BUILDING MATERIALS **ENGINEERING**

STRUCTURAL **ENGINEERING**

CONSTRUCTION MANAGEMENT **ENGINEERING**

TRANSPORTATION **ENGINEERING**

GEOTECHNICAL **ENGINEERING**

e-ISSN: 2687-2129

HYDRAULIC AND WATER RESOURCES **ENGINEERING**

Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)

2023, Volume 5, Issue 2

The Journal Information

Publisher: Hüseyin AKBULUT

Editor-in-Chief: Hüseyin AKBULUT

Editors: Cahit GÜNER, Gökhan GÖRHAN, Gökhan KÜRKLÜ

Field Editor: Murat HİÇYILMAZ

Secretary of Publication: Ayfer ELMACI, Burak Enis KORKMAZ, Şule YARCI

Access: Open Access

Language of Publication: English and Turkish

Publication Frequency: Twice a year (in December and June)

Type of Publication: Peer-reviewed and periodical

e-ISSN: 2687-2129

Telephone: +90 272 2182 30 00 (2324)

E-mail: j.civiltech@gmail.com

Webpage: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jiciviltech>

Correspondence Address: Afyon Kocatepe University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Ahmet Necdet Sezer Campus, 03200, Afyonkarahisar, TURKEY.

Advisory Board of the 2nd Issue

Reviewer List of the 2nd Issue

Ahmet Raif BOĞA, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Ahmet YILDIZ, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Alan WOODSIDE, *Brunel University, United Kingdom*
Bojan ZLENDER, *University of Maribor, Slovenia*
Dunja PERIC, *Kansas State University, United States*
Erol TUTUMLUER, *University Of Illinois At Urbana-Champaign, United States*
Hasan TOSUN, *Eskisehir Osmangazi University, Turkey*
Hashem R. AL-MASAEID, *Jordan University of Science and Technolgy, Jordan*
Hüseyin Yılmaz ARUNTAŞ, *Gazi University, Turkey*
Imad L. AL-QADI, *University Of Illinois At Urbana-Champaign, United States*
Iqbal KHAN, *King Saud University, Saudi Arabia*
Ivanka NETINGER, *University of Osijek, Croatia*
İlhami DEMİR, *Kırıkkale University, Turkey*
İsmail DEMİR, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
João Pedro SILVA, *Polytechnic Institute of Leiria, Portugal*
Masayasu OHTSU, *Kyoto University, Japan*
Mehmet SALTAN, *Süleyman Demirel University, Turkey*
Meltem SAPLIOĞLU, *Suleyman Demirel University, Turkey*
Meor Othman HAMZAH, *University Sains Malaysia, Malaysia*
Mujib RAHMAN, *Brunel University, United Kingdom*
Murat KANKAL, *Uludağ University, Turkey*
Murat Vergi TACIROĞLU, *Mersin University, Turkey*
Paula FOLINO, *University of Buenos Aires, Argentina*
Roumiana ZAHARIEVA, *University of Architecture, Bulgaria*
Serdal TERZİ, *Süleyman Demirel University, Turkey*
Sri Atmaja P. ROSYIDI, *Muhammadiyah University of Yogyakarta, Indonesia*
Tamer BAYBURA, *Afyon Kocatepe University, Turkey*
Veli BAŞARAN, *Afyon Kocatepe University, Turkey*

Altuğ KARABEY, *Van Yüzüncü Yıl University, Türkiye*
Hakan ÖZBAŞARAN, *Eskişehir Osmangazi University, Türkiye*
Hasan Selim ŞENGEL, *Eskişehir Osmangazi University, Türkiye*
Hümeyra BOLAKAR TOSUN, *Aksaray University, Türkiye*
İsmail DEMİR, *Afyon Kocatepe University, Türkiye*
Kadir GÜÇLÜER, *Adıyaman University, Türkiye*
Mustafa Yavuz ÇELİK, *Afyon Kocatepe University, Türkiye*

Contents / İçindekiler

Articles / Makaleler	Sayfa
Okan KON, Koray SANDAL Binaların Dış Duvarlarının Yüzey Özelliklerine Bağlı Enerji Tüketim Analizleri ve Sıcaklık Sönüm Faktörü <i>Energy Consumption Analyses and Temperature Damping Factor Based on Surface Properties of Exterior Walls of Buildings</i>	49-69
Şevket Onur KALKAN, Halil İbrahim ÖCAL, Lütfullah GÜNDÜZ Effect of Denim Waste Fibres on Technical Properties of Cementitious Lightweight Composite Mortars <i>Kot Atık Liflerinin Çimento Esaslı Hafif Kompozit Harçların Teknik Özelliklerine Etkisi</i>	71-90
Foad Karimi Ghaleh JOUGH, Borhan GHASEMZADEH Reliability Prediction of SMRF Based on the Combination of Neural Network And Incremental Dynamic Analysis <i>SMRF'nin Sinir Ağı ve Artımlı Dinamik Analizin Birleşimine Dayanan Güvenilirlik Tahmini</i>	91-105

Araştırma Makalesi / Research Article

Binaların Dış Duvarlarının Yüzey Özelliklerine Bağlı Enerji Tüketim Analizleri ve Sıcaklık Sönüm Faktörü

*¹Okan KON, ²Koray SANDAL

¹Balikesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye,
okan@balikesir.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-5166-0258>

²Balikesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği ABD, Balıkesir, Türkiye,
koraysandal@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9668-4352>

Geliş / Recieved: 26.10.2023;

Kabul / Accepted: 12.12.2023

Öz

Çalışmada, binaların yapı kabuğunun en yüksek yüzey alanına sahip dış duvarlarına uygulanan; beyaz boya, alüminyum, kırmızı tuğla, siyah boya, metal siyah kaplama, beton, mermer ve porselen-çini den oluşan sekiz çeşit kaplama ve boyalarına bağlı enerji, ekserji ve anerji incelemeleri yapılmıştır. Tüm incelemeler için TS 825'e ikinci iklim bölgesindeki Balıkesir ili kabul edilmiştir. Enerji tüketimi, ekserji miktarı ve Anerji değeri hesaplanmıştır. Enerji tüketimi hesapları için derece gün yöntemi kullanılmıştır. Derece gün hesapları için güneş hava sıcaklık değerleri hesaplanmıştır. Güneş hava sıcaklık değerleri hesaplanırken sekiz çeşit kaplamalar ve boyalar için soğurganlık ve yayıcılık değeri tespit edilmiştir. Sonuç olarak, ekserji miktarı enerji tüketimine bağlı olarak ısıtma ve soğutma dönemi birlikte düşünüldüğünde kömür enerji kaynağı kullanan, beyaz boyalı dış duvar yüzeyi için, kuzey yönünde en yüksek 21.405 kWh/m² ve en düşük ise doğal gaz enerji kaynağı kullanan metal siyah kaplamalı dış duvar yüzeyi için güney yönünde 5.118 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Ek olarak bina dış duvarları için farklı boya veya kaplamalara bağlı dış duvar için sıcaklığa bağlı sönüm faktörü tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Dış duvar kaplaması ve boyası, Güneş hava sıcaklığı, Ekserji, Anerji

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Kon, O., & Sandal, K. (2023). Binaların Dış Duvarlarının Yüzey Özelliklerine Bağlı Enerji Tüketim Analizleri ve Sıcaklık Sönüm Faktörü. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 5(2), 49-69.

Energy Consumption Analyses and Temperature Damping Factor Based on Surface Properties of Exterior Walls of Buildings

Abstract

In this study, energy, exergy, and anergy analyses related to eight types of coatings and paints consisting of white paint, aluminium, red brick, black paint, black metal coating, concrete, marble and porcelain-tile were made which applied to the external wall of the buildings envelope with the highest surface area. Balikesir province from the second climate zone was accepted for all examinations based on TS 825. Accordingly, energy consumption exergy and anergia were calculated. The degree-day method was used for energy consumption calculations. For degree-day calculations, solar air temperature values were determined. While calculating solar air temperature values, absorbance and emissivity values were found for eight coatings and paints. As a result, when the heating and cooling periods are considered together, depending on the energy consumption, the highest exergy in the north direction is 21.405 kWh/m², and the lowest exergy is the metal black-coated outer wall using natural gas energy source for the white painted exterior wall surface using a coal energy source. It has been determined as 5.118 kWh/m² in the south direction for the surface. In addition, temperature dependent decrement factor was determined for the exterior walls of the building due to different paints or coatings.

Keywords: *Solar air temperature, External wall coating and painting, Exergy, Anergy*

1. Giriş

Bina kabuğu, bina enerji verimliliği ve termal konforun elde edilmesinde baskın bir rol oynar (Hua and Yu., 2019). Bina kabuğunun farklı unsurları, dış duvarlar, zeminler, çatı, tavan ve pencereler, bir binanın ısıtılması ve soğutulması, ısı konfor, havalandırma ve aydınlatma için gereken enerjiyi belirler. Bu dış cephe bileşenleri aracılığıyla bina enerji verimliliğini artıran unsurlar vardır. Bir binaya uygulanabilecek enerji verimliliği önlemleri arasında yansıtıcı malzeme ve boyaların kullanılması önemli yer tutar. Binaların opak ve saydam yüzeylerin yansıtma ve soğurma gibi termal özellikleri, ısı kazanımlarını önemli ölçüde etkiler ve yıllık ısıtma ile soğutma yüklerinde yüksek oranlara varan azaltmalar yapabilir (Gupta and Deb, 2019). Bina kabuğundaki boyalar, renklere bağlı olarak güneş radyasyonu emilimini etkiler. Daha açık renk aralıkları ile daha fazla güneş radyasyonu yansıtır ve diğer yandan, koyu renk aralıkları ile daha fazla güneş radyasyonu emer. Bu nedenle bina kabuğu renklerinin incelenmesi, binaların hem soğutma hem de ısıtma yüklerinin düşürülmesine katkı sağlayabilir (Alrwashdeh, Qadourah, Al-Falahat, 2022). Binaların opak bir yüzey üzerindeki dış kaplamanın rengi radyant güneş enerjisi tipe bağlı absorpsiyon ve yayıcılık faktörlerine bağlı olarak yapı tarafından kısmen yansıtılır, yutulur ve kısmen absorbe edilir (Ascione et al., 2010). Farklı emsivity seviyelerine sahip kaplamalar, binadaki güneş enerjisi ve pencereden geçen enerjinin kullanımını önemli

ölçüde etkiler (Kon and Caner, 2022a). Isı enerjisi, yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa akar, böylece binaların dış duvarlarının yapısına göre sıcaklık, enerji ve ekserji değerlerini incelemek için kullanılır. Isı enerjisi geçişine göre sıcaklık değeri azalır. Böylece entropi üretimi artar ve duvar yapısındaki ekserji geçişi azalır. Ekserjetik incelendiğinde, duvarlardaki yapısındaki sıcaklık değişimi sırasında entropi üretimini olur ve bunun sonucu ekserji yıkımı meydana gelir (Kılıçlı, 2018; Kon ve Caner, 2022b; Yıldırım, 2015). Binalarda enerji tüketimi hesaplanırken çoğunlukla termodinamiğin birinci kanunu dikkate alınır. Bu sistemin tamamı düşünüldüğünde enerji tüketimi hesaplarında yetersiz kalmaktadır. Buna göre enerji ve ekserji analizi yapılırken, termodinamiğin birinci ve ikinci kanunlarının her ikisinde dikkate alınması, binalarda enerji tüketimi, enerji akışı miktarı ve tesisat ekipmanların tasarlanması ile bu elemanların kullanılması açısından çok önemlidir. Enerji kullanılmayan enerjidir. Bir sistem için ekserji, enerji ile enerji arasındaki farktır ve azalma yönündedir. Enerjinin kullanılabilen kısmı ekserji olarak tanımlanabilir. Termodinamiğin birinci kanuna göre enerji ve ekserjinin toplamı sabit kalır. Tersinmez süreçlerde ise ekserjinin bir kısmı veya tamamı enerjiye dönüşür. Enerji, ekserjiye dönüştürülmez (Hepbaşlı, Özcan, Günerhan, Yıldırım, 2019). Enerjinin devamlı olarak arttığı, ekserjinin devamlı olarak azaldığı görülmektedir (Karakaşlı, 2012).

Duvarların termal performansları, odanın enerji tüketimi ve termal konforu üzerinde büyük etkiye sahiptir. Duvardan geçen ısı akışı, iç hava sıcaklığının değişmesine neden olur. Buda odanın soğutma/ısıtma enerji tüketimi ve ısıl konforunu doğrudan etkiler (Jin et al., 2012). Duvarlardaki sıcaklık azalma faktörü ile binaların enerji tüketimleri ve içindeki yaşayan insanların ısıl konforları için öngörüler yapılabilir. Bunlara bağlı sorunların oluşumunda çözüm önerileri sunulabilir.

Sıcaklık azalma faktörü, bina kabuklarının ısı depolama yeteneklerinin incelenmesi ve değerlendirilmesi için çok önemli termal atalet parametreleridir. (Fathipour ve Hadidi, 2017; Asan, 2006). Maksimum veya minimumunun sıcaklık dalgalanmasının bir duvar boyunca dış yüzeyden iç yüzeye yayılması, sıcaklık azalma faktörü olarak tanımlanır. Sıcaklık azalma faktörü, duvar malzemelerinin ısı depolama kapasitesini belirlemede önemli faktördür (Asan, 2006; Mavromatidis et al., 2012).

Literatürdeki yapılan çalışmaları incelenirse Hua ve Yu yaptıkları çalışmada, değişken iklim koşullarına uyarlanabilen bina kabuğu tasarlayarak, binalarda enerji verimliliğini artırmak için yeni bir uygulama önerilmiştir. EnergyPlus simülasyonu kullanılarak, beş farklı iklim koşulunda bina için uyarlanabilir kaplama kullanmanın enerji tasarrufu potansiyelini ortaya

çıkarmak için incelemeler yapılmıştır (Hua et. al., 2019). Gupta ve Deb çalışmalarında, Hindistan'ın Bombay kentindeki bir eğitim binasında mahal soğutması için çeşitli kaplama malzemelerinin iç hava sıcaklıkları ve enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Simülasyon ile reflektif kaplamalı ve kaplamasız ısı yalıtımı, yeşil çatı ve bambu esaslı gölgeleme sistemleri uygulanarak enerji performansı değerlendirilmiştir (Grupta ve Deb, 2022). Alrwashdeh et. al. yaptıkları çalışmada, Ürdün'de enerji tasarrufu açısından binaların çatılarında boya renginin etkisi, mavi, beyaz ve siyah olmak üzere üç farklı renk için incelenmiş ve enerji tasarrufunda en iyi rengin siyah, beyazın ise en kötü etkisi olduğu görülmüştür Alrwashdeh et. al., 2022). Ascione et. al. çalışmalarında, Akdeniz iklimine sahip, İtalya'nın Napoli şehrindeki sosyal bir konut referans alınarak çeşitli dış kaplamalarına bağlı bina enerji tüketimleri incelenmiş ve bunun için dinamik simülasyonları yapılmıştır. Yerel iklim koşullarının en uygun yüzey kaplamalarının seçimini ve enerji talebini azaltmak için yenilikçi bir indeks olan yüzey faktörü önerilmiştir. Duvarın yüzey ışıma özellikleri yazın soğutma enerjisi talepleri üzerindeki etkisi ile özellikle mevcut binalar için önemli ısıtma veya soğutma tasarrufları elde edilebileceği görülmüştür (Ascione et. al., 2010). Kon ve Caner yaptıkları çalışmada 0.05 ile 0.89 yayma (emsivitesi) oranlarına sahip pencerelerin ısı transfer katsayıları hesaplanmıştır. Beş iklim bölgesi için ısıtma ve soğutma dönemlerinde pasif güneş enerjisi kazanımı hesaplamaları

yapılmıştır. Beş iklim bölgesinin güney, kuzey ve doğu/batı yönlerindeki güneş radyasyonu ve güneş enerjisi faktörleri belirlenmiştir. Buna göre ısıtma dönemi için güneş enerjisi kazancı ve soğutma dönemi için güneş enerjisi kaybı bulunmuştur (Kon and Caner, 2022a). Zhang and Zhai çalışmalarında, binaların dış yüzeylerine Termokromik toz ve diğer bileşenlerle sahip, renk değiştirme sıcaklığı 31 °C olan 12 farklı termokromik kaplama incelenmiştir. Bu kaplamaların yansıtma etkileri analiz edilmiş ve partikül boyutunun kaplamaların yansıtıcılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ölçümler, binalar için enerji tüketimini azaltmada termokromik kaplamaların etkisini olduğu görülmüştür (Zhang and Zhai, 2019). Aldaftari et. al. yaptıkları çalışmada, güneş radyasyonunu yansıtacak ve daha kısa görünür dalga boylarında iletilmesine sağlayacak pigmentli kaplamalar kullanarak, bir serayı serin tutmak ve enerji tüketimini azaltmak için yeni yöntem geliştirmişlerdir (Aldaftari et. al., 2019). Somasundaram et. al. yaptıkları çalışmada, öncelikle eski bina stoğu için kolayca uygulanabilen bir güneş filminin kurulumunu içeren çift camın enerji tasarrufu üzerindeki etkisini en üst düzeye çıkarmak için gereken adımları incelemiştir (Somasundaram et. al., 2020). Fabiani et. al. çalışmalarında, Princeton Kentsel Kanopi Modeli, yazın kentsel aşırı ısınmaya karşı önlem alan, aynı zamanda kışın solar pasif ısıtmadan yararlanan gelişmiş bir kentsel çatı kaplama malzemesinin potansiyeli araştırılmıştır (Fabiani et. al., 2019) Ascione et. al. çalışmalarında, Pareto

yaklaşımı kullanılarak iki farklı iklimde (Yunanistan ve İtalya kıyıları), iki farklı inşaat teknolojisinin (betonarme hafif bir ev ve bir villa), enerji tasarrufu için optimal yenileme araştırmalarını içerir. Enerji tasarrufu açısından en verimli ve uygun maliyetli yenileme çözümleri, enerji sistemlerinin verimliliğinin iyileştirilmesi, tam çatı fotovoltaik sistemlerinin kurulumu, pencerelerin değiştirilmesi ve çatı ısı yalıtımıdır (Ascione et. al., 2020). Fabiani et. al. yaptıkları çalışmada, termokromik bir örtü ile iyi yalıtılmış bir prototip binanın ısı performansını değerlendirilmiş, soğuk ve karanlık uygulamalarla kıyaslama yapılarak analitik bir model sunulmuştur. Termokromik duvar boyasının uygulanmasının, yaz aylarında yüksek yansıtıcılığa sahip malzemelerin pasif soğutma etkisi ile kışın karanlık yüzeylerin güneş kazanımlarını birleştiren çözümünü göstermektedir (Fabiani et. al., 2020). Xie et. al. yaptıkları çalışmada, kaplamaların optik özelliklerini ve termal performansını değerlendirmek için beyaz dışındaki on kaplama incelenmiştir. Renk açıklığının yansımının baskın bir faktör olduğu ancak yakın kızılötesi yansımaya etkilemediği bulunmuştur (Xie et. al., 2019). Dehwah ve Krarti çalışmalarında, ABD konut birimleri için ısıtma ve soğutma termal yüklerini en aza indirmek için çatılara uygulanan değiştirilebilir ısı yalıtım sistemleri incelenmiştir. Farklı konumlarda bulunan prototip tek katlı bir evde termal konforu korurken ısıtma ve soğutma ihtiyaçlarını değiştirilebilir ısı yalıtım sistemleri ısıtma ve soğutma için gerekli enerji tüketimini önemli ölçüde

azaltabileceğini gösterilmiştir (Dehwah and Krarti, 2020). Qiu et. al. çalışmalarında, sıcak ve nemli iklimlerde pasif güneş enerjisi kullanarak enerji tasarrufu için Çin'in Guangzhou kentindeki ofis binasının zarflarındaki gerekli tasarım parametrelerini tespit etmek için veri madenciliği tekniklerini ve enerji simülasyonunu ile entegre eden bütüncül bir metodoloji önerilmiştir. EnergyPlus yazılımında toplam 115,200 tasarım senaryosu oluşturulmuş ve simüle edilmiştir (Qiu et. al., 2021). Yuxuan et. al. yaptıkları çalışmada, beş farklı renkte termokromik kaplamalar ve bunların optik özellikleri incelenmiştir. Çin in Şanghay şehrinde bulunan iki katlı bir ofis binası kullanılarak ve termokromik kaplamaların enerji performansını değerlendirmek için renk değiştirme özelliklerine dayalı üç aşamalı bir yöntem kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır (Yuxuan et. al., 2020). Maduru et. al. çalışmalarında, şeffaf cam yerine çeşitli ultraviyole özellikteki kaplamalı akrilik camların bina ısı kazanç/kayıpları incelenmiştir. Bunun için Hindistan'daki sıcak ve ılıman iklimdeki dört katlı yüksek camlı binada camların ultraviyole özellikte kaplamalı akriliklerin termal geçirgenliği ve güneş-optik özelliklerini incelemeler yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucu şeffaf camla karşılaştırıldığında, ultraviyole özellikte kaplamalı akrilikler ısı kazancını sıcak ve ılıman iklimlerde % 25.5 oranında azalttığı görülmüştür (Maduru et. al., 2022). Wardi et. al. çalışmalarında, yenilikçi sandviç malzemenin termomekanik ve termal davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Alçı ve çimento harcı

kaplamanın, sandviç malzemenin termomekanik ve termal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Geleneksel tuğla duvarlara kıyasla sandviç malzeme duvarlar için soğutma ve ısıtma enerji ihtiyaçlarında %31-45 aralığında kazanç sağladığı görülmüştür (Wardi et al., 2022). Liu et. al. yaptıkları çalışmada, güneş radyasyonu deneylerinin sonuçları, sarı-kahverengi super hidrofobik kaplamanın yüzey sıcaklığının, önemli bir soğutma etkisine sahip olan sıradan Portland çimento kaplamasına kıyasla 5.7 °C azaldığını göstermektedir. Bu çalışmada önerilen kaplama, yaz aylarında binaların enerji tüketimini azaltmak için dış duvarda ve çatısında da kullanılabileceğini göstermektedir (Liu et. al., 2021). Martínez-García et. al. çalışmalarında, konserve endüstrisinin bir yan ürünü olan midye kabuğu içeren yenilikçi bir sürdürülebilir bina kaplamasını incelenmişlerdir. Çalışmada, düşük enerji tüketen bir bina geliştirmek için kullanılan midye kabukları, beton temel ile dış ve iç kaplama duvarlarda agrega olarak, tüm zarf yalıtımında gevşek dolgu malzemesi olarak kullanılmıştır. Midye kabuğu malzemelerinin, enerji verimli binalar için Pasif Ev standardının karşıladığı sonucuna varılmıştır (Martínez-García et. al., 2021). Al-Naghi et. al. çalışmalarında, Suudi Arabistan'da bulunan test odasındaki, ısı yalıtım sıvası ve yansıtıcı kaplama ile gaz beton blok duvar kullanılarak inşa edilen duvarların termal performansı ve enerji verimliliği açısından incelenmiştir. Çalışma, yaz aylarında sıcak ve nemli bir iklim için yapılmıştır. Sonuçta yalıtım sıvası ve yansıtıcı kaplamaya sahip gazbeton

bloklar, gazbeton duvar test odasındaki enerji tüketiminde %58 oranında azalma sağladığı görülmüştür (Al-Naghi et. al., 2020). Montes et. al. yaptıkları çalışmada, binaların dış ve iç duvar yüzleri bir kaplama solüsyonu ile boyanmış ve kapalı bir alandaki termal incelemeleri yapılmıştır. Farklı çevre koşulları altında deneysel veriler alınmıştır. Bu veriler bir simülatöre aktarılarak termodinamik davranışları incelenmiştir. Bina enerji tasarrufu için, duvar sıcaklık ve ısı akısı davranışı tahmin edilmiştir (Montes et. al., 2020). Algarni yaptığı çalışmada, soğuk çatı kurulumunun Suudi Arabistan'da seçilen 13 bölgedeki konut binalarının soğutma ve ısıtma yükleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, pasif soğuk çatı teknolojisinin kullanımının, bir çatının termal performansını iyileştirmek ve böylece Suudi Arabistan'ın sert iklimi ve benzeri aşırı iklimlerde bina enerji tüketimini azaltmak için etkili bir yöntem olduğu sonucunu göstermektedir (Algarni, 2019). Zhang et. al. çalışmalarında, Çin'in güney şehirlerinden Chengdu'daki bir ofis binası için yansıtıcı malzemelerle kaplanmış duvarların ısı performansını araştırmak için bina dış kabuğunun geçici ısı transfer modeli oluşturulmuş ve deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar, yansıtıcı kaplama malzemeleri için, dış duvarların güneş radyasyonunun ısı emiliminin azalmasından dolayı ortalama iç hava sıcaklığının, kaplama malzemeleri olmayan referans durumuna göre yaklaşık 2.4 °C daha düşük olduğunu göstermektedir (Zhang et. al., 2017). Özel ve Pıhtılı çalışmalarında, yaz ve kış dönemine

bağlı farklı yönlerdeki bina duvarı ve çatısı için güneş ışınımını yutma oranı, ısı kazanç ve kaybı yönünden incelenmiştir. Tuğla ve beton yapı malzemeleri için dış yüzey yutma oranına bağlı olarak ısı akıları hesaplanmıştır (Özel ve Pıhtılı, 2006). Rossi et. al. yaptıkları çalışmada, çatı uygulamaları için kırmızı ve kahverengi polyester esaslı organik kaplamaların termal, görsel ve dayanıklılık davranışları incelenmiştir. Kızılötesi spektroskopi, parlaklık ve kolorimetrik analizlerle değerlendirilmiştir (Rossi et al., 2020). Chen et. al. çalışmalarında, Çin'in sıcak yaz ve soğuk kış bölgesi, sıcak yaz ve ılık kış bölgesi ve ılıman bölgesinde tek cam sistemleri için güneş kontrolündeki spektral seçici absorpsiyon film kaplamalı cam sistemlerinin enerji tasarrufu etkisini değerlendirmek için global termal geçirgenlik ve güneş ısı kazanç katsayısı kullanılarak enerji tüketimi simülasyonlarıyla incelenmiştir (Chen et. al., 2022). Khabir ve Vakilinezhad çalışmalarında, İran'daki, sıcak bir iklimde bulunan tipik bir ofis binasının ısı davranışı ve enerji performansı üzerindeki soğuk kaplama malzemeli çeşitli cephe sistemlerinin etkisini incelenmiştir. Sonuçlar, çift cidarlı cephelerin kullanılmasının yıllık enerji tüketimini ve karbon dioksit emisyonlarını %63 oranında azaltabileceğini göstermiştir (Khabir ve Vakilinezhad, 2022). Peng et. al. çalışmalarında, ABD'deki binaların enerji tasarrufu için termal kabuğunun ana bileşenlerinden olan duvarların için renkli film kaplama malzemeleri incelenmiştir. Bu film kaplamalar, iç ve dış ortamlar arasındaki ışımsal ısı

alışverişini en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Böylece tüm yıl boyunca soğutma ve ısıtma için enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Peng et. al., 2022). Zhu ve Mai yaptıkları çalışmada, şehirlerde bulunan yollardaki yansıtıcı malzemelerin, yaz mevsiminde kaplamalı yüzeylerde ve ortam havasındaki sıcaklığın düşmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüş ve kentsel ısı adasının belirli etkilerini geciktirmek için özellikle sıcak bölgelerde önerilmiştir (Zhu ve Mai, 2019).

Kılıçlı yaptığı çalışmada, Ege Üniversitesindeki Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü binası için enerji tasarruf potansiyeli araştırmıştır. Binanın şimdiki ve iyileştirilmiş haldeki enerji ve ekserji analizleri yapılmış ve iyileştirme önerileri ile binanın enerji tasarruf potansiyeli belirlenmiştir (Kılıçlı, 2018). Yıldırım yaptığı çalışmada enerji analizi, optimum yalıtımlı ve yalıtımsız duvarlara sahip binaların duvar iç ile dış yüzey sıcaklıkları kullanılarak ısı kayıpları hesaplanmış ve ekserji analizleri yapmıştır (Yıldırım, 2015). Hepbaşlı et. al. çalışmalarında, binaların ekserji analizinde kullanılan farklı yöntemler incelenmiştir. Geleneksel ve diğer binaların ekserjetik analizi yapılmıştır. HVAC mühendislerinin ekserjiye dayalı bina analizleri konusunda bilgi kazanmasına ve tasarım ile test aşamasında, enerjetik ve ekserjetik incelemelerin dikkate alınması gerektiği önerilmiştir (Hepbaşlı et. al., 2019). Karakaşlı çalışmasında, Elâzığ ilinde bulunan Hayat Damla Hastanesi'nin önemli miktarda ısıtma enerjisine ihtiyaç duyulan, göz

polikliniğinin ve hastane binasının diğer farklı bölümlerinde enerji ve ekserji analizleri yapmıştır. Bina odalarının termodinamiğin birinci ve ikinci kanununa bağlı enerji ve ekserji analizleri yapılmıştır (Karakaşlı, 2012). Shukuya çalışmasında, son 30 yılda yapılan ekserji araştırmalarının mevcut durumu hakkında genel bir bilgi vermiştir. Buna göre, termodinamiğin iki temel kanunundan, sıcak ve soğuk ekserji kavramlarının kısa bir tanıtımını yapmıştır (Shukuya, 2019). Kon ve Caner yaptıkları çalışmada, altı farklı duvar tipi ve üç farklı yalıtım malzemesine bağlı olarak dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlığı hesaplamışlardır. Yalıtımsız duvar için optimum yalıtım kalınlığı hesaplanırken derece-gün ve yaşam döngüsü toplam maliyet yöntemleri kullanılmıştır. Çalışmada, Türk yalıtım standardına (TS 825) göre beş iklim bölgesini temsil edecek şekilde İzmir, Balıkesir, Ankara, Kayseri ve Erzurum şehirleri seçilmiştir (Kon ve Caner, 2022b). Kon yaptığı çalışmada, Aydın, Amasya, Eskişehir ve Ardahan illerindeki binalar için ömür maliyet analizi ve derecede-gün metodu kullanılarak dış duvarlar ve pencerelere için optimum yalıtım kalınlıkları ve cam sayısı hesaplanmıştır (Kon, 2018). Gong et. al. yaptıkları çalışmada, binalar için iklimlendirme sisteminin soğutma ve ısıtma kaynak sistemi için ürün ekserji maliyetinin analizini incelemişlerdir (Gong et. al., 2007). Yıldırım et. al. çalışmalarında; farklı bileşimli 102 beton duvar numunesi için her bir termofiziksel özelliğın arasındaki ilişki deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Bu özelliklerin faz kayması ve sönüm oranı arasındaki değişim denklemlerle

verilmiştir. Termofiziksel özelliklerin, yapıların ısı karakterlere olan değişimi MATLAB tabanlı bir bilgisayar program ile araştırılmıştır (Yıldırım et. al., 2018).

Jin et al. yaptıkları çalışmada, duvarın termal performansını değerlendirmek için ısı akısı zaman gecikmesi ve ısı akısı azalma faktörü olan iki parametre incelemişlerdir. Çalışmalarında, tek boyutlu sayısal modele dayanarak, duvarın termal özelliklerinin ve duvar kalınlığının ısı akısı zaman gecikmesi ve ısı akısı azalma faktörü üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Jin et al., 2012). Kontoleon and Eumorfopoulou çalışmalarında, belirli iklim koşulları için zaman gecikmesi ve azalma faktörünün duvar yönelimi ve dış yüzey güneş absorpsiyonundan nasıl etkilendiğini belirlemişlerdir (Kontoleon ve Eumorfopoulou 2008). Asan çalışmasında maksimum zaman gecikmesi ve minimum azalma faktörü açısından optimum yalıtım konumunu sayısal olarak incelenmiştir. Bunun için kompozit bir duvardaki tek boyutlu ısı iletim denklemi periyodik taşınım sınır koşulları altında Crank Nicolson şeması kullanmıştır (Asan, 2000). Fathipour ve Hadidi yaptıkları çalışmada, İran'da yaygın olarak kullanılan farklı duvar yapı malzemeleri için zaman gecikmeleri ve azalma faktörü özellikleri araştırılmıştır. Sandviç duvardaki ısı yalıtım katmanının yanı sıra duvar kalınlığı, iç ve dış ısı transfer katsayıları gibi farklı parametrelerin zaman gecikmesi ve azalma faktörüne etkisi araştırılmıştır (Fathipour ve Hadidi, 2017). Asan yaptığı diğer bir çalışmada, farklı duvar yapı malzemeleri için zaman gecikmeleri ve azalma faktörleri

sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, yirmi altı farklı yapı malzemesi seçildi. Hesaplamalar her malzeme için sekiz farklı kalınlık için tekrarlanarak kalınlık ve malzeme tipinin zaman gecikmesi ve azalma faktörüne etkisi araştırılmıştır (Asan, 2006). Mavromatidis et al. farklı çok katmanlı ısı yalıtımını içeren bir bina duvarı için zaman gecikmesinin ve azalma faktörünün sayısal olarak hesaplanmalarını yapmışlardır. Çalışmada, birleşik iletim, ışınum ve taşınım ısı transferi denklemine bağlı hesaplamalar kullanılmıştır (Mavromatidis et al., 2012).

Çalışmanın amacı binaların dış duvarlarına günümüzde en çok uygulanan; beyaz boya, alüminyum, kırmızı tuğla, siyah boya, metal siyah kaplama, beton, mermer ve porselençini den oluşan sekiz çeşit kaplama ve boylarına bağlı enerji, ekserji ve anerji incelemektir. Dış duvarlar tüm yapı kabuğunda en yüksek yüzey alanına sahiptir. Buna bağlı olarak bina enerji tüketiminde en etkili yapı kabuğu elemanıdır. Enerji tüketimi hesaplarında derece gün yöntemi kullanılmıştır. Derece gün değerlerinin hesaplarında kullanılan sıcaklık, dış duvar kaplama ve boyları için soğurganlık ve yayıcılık değerine bağlı olan güneş hava sıcaklığıdır. Çalışmada, ısıtma periyodu için doğal gaz ve kömür, soğutma periyodu için elektrik enerjisi tüketildiği kabul edilmiştir. Enerji tüketimine ile ekserji miktarı hesaplanmıştır. Anerji değeri tespit edilmiştir. Tüm hesaplamalar ve incelemeler, TS 825'de ikinci bölgedeki Balıkesir ili için yapılmıştır. Dış duvarları için farklı boya veya kaplamalara bağlı dış duvar için

sıcaklığa bağlı sönüm faktörü (sönüm oranı) çalışmada ek olarak tespit edilmiştir. Literatürde duvar yüzeylerinin kaplama ve boyalarına bağlı sadece enerji analizleri içeren çalışmalar mevcuttur. Fakat, bu çalışmada, duvar yüzeylerine uygulanan kaplama ve boyalarına bağlı enerji, ekserji ve anerjilerinin tümünü kapsayan analizlerinin yapılması ve mukayeselerinin yapılması ile yeni yaklaşım ile ülkemiz literature katkı sağlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Duvar yüzeyine bağlı güneş hava sıcaklığı,

$$T_{gh} = T_0 + \frac{\alpha \cdot I_g}{h_b} - \frac{\sigma \epsilon (T_0^4 - T_{gök}^4)}{h_b} \quad (1)$$

$$T_{gök} = 0.0552 T_0^{1.5} \quad (2)$$

TS 825 için derece-gün hesabı (aylar 30 gün kabul edilmiştir); Burada α yüzey soğurganlığını, ϵ duvar yüzeyi yayıcılığını, I_g güneş radyasyonunu (güney, kuzey ve doğu/batı yönleri için ayrı ayrı alınmıştır), h_b dış yüzeysel ısı transfer katsayısı (dış yüzeysel ısı transfer direnci $0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ve iç yüzeysel ısı transfer direnci $0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ alınmıştır.) $T_{gök}$ gök sıcaklığını, σ Stefan – Boltzmann sabitini ve σ duvar yüzeyi soğurganlığını göstermektedir (Özel, 2013; TS 825, 2013; Evangelisti et. al., 2019).

$$\text{Eğer } T_{gh} \leq T_i \quad \text{IDG} = 30 \sum_1^{12} (T_i - T_{gh}) \quad (3)$$

$$\text{Eğer } T_{gh} > T_i \quad \text{IDG} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Eğer } T_{gh} > T_i \quad \text{SDG} = 30 \sum_1^{12} (T_{gh} - T_i) \quad (5)$$

$$\text{Eğer } T_{gh} \leq T_i \quad \text{SDG} = 0 \quad (6)$$

burada, IDG ısıtma derece günü, SDG soğutma dönemi derece günü, T_{gh} güneş hava sıcaklığını ve T_i ise iç ortam sıcaklığını ($19 \text{ }^\circ\text{C}$ alınmıştır) göstermektedir (Kon, 2018; Ulaş, 2010).

Dış duvar için ısıtma ve soğutma enerji tüketimi;

$$E_{\text{Isıtma}} = \frac{0.024 U \text{ IDG}}{\eta_{\text{Isıtma}}} \quad (7)$$

$$E_{\text{Soğutma}} = \frac{0.024 U \text{ SDG}}{\text{COP}} \quad (8)$$

Burada, U dış duvar için ısı transfer katsayısıdır (TS 825 de 2. iklim bölgesi için 0.57 olarak alınmıştır). $\eta_{\text{Isıtma}}$ ısıtma sistemi verimidir (doğal gaz için 0.93 ve kömür için 0.65 alınmıştır). COP soğutma sistemi performans değeri (2.5 alınmıştır) (Özel and Pıhtılı, 2006; Özel, 2013; TS 825, 2013).

Dış duvar yüzeyi için ısıtma dönemi ekserji hesabı;

$$E_{x\text{Isıtma}} = E_{\text{Isıtma}} \cdot \left[\left(1 - \frac{T_{dış}}{T_{iç \text{ Yüzey}}} \right) - \left(1 - \frac{T_{dış}}{T_{dış \text{ yüzey}}} \right) \right] \quad (9)$$

soğutma dönemi için ekserji hesabı;

$$E_{x\text{Soğutma}} = E_{\text{Soğutma}} \cdot \left[\left(\frac{T_{dış}}{T_{iç \text{ Yüzey}}} - 1 \right) - \left(\frac{T_{dış}}{T_{dış \text{ yüzey}}} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

$$E_n = E_x + A_n \quad (11)$$

Enerji ($E_{\text{Isıtma}}$ ve $E_{\text{Soğutma}}$), ekserji ($E_{x\text{Isıtma}}$ ve $E_{x\text{Soğutma}}$), ve anerjinin ($E_{n\text{Isıtma}}$ ve $E_{n\text{Soğutma}}$),

toplamıdır (Kılıçlı, 2018; Yıldırım, 2015; Hepbaşlı et. al., 2019; Karakaşlı, 2012; Çengel, 2011; Gong et. al., 2007).

Sıcaklığa bağlı sönüm faktörü (sönüm oranı):

$$SF = \frac{T_{iç,max} - T_{iç,min}}{T_{dış,max} - T_{dış,min}} \quad (12)$$

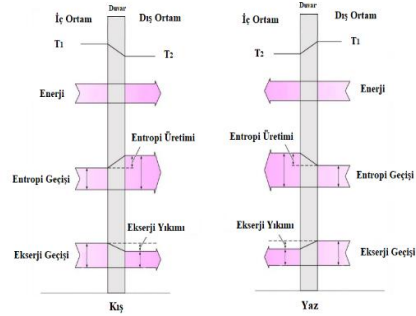
Sıcaklığa bağlı sönüm faktörü (sönüm oranı-SF) hesaplanırken, duvar iç ve dış yüzey maksimum ve minimum sıcaklık değerleri kullanılmaktadır (Yıldırım et. al., 2018). Çalışmada sıcaklığa bağlı sönüm faktörü (SF), hem kış hem de yaz dönemi için hesaplanmıştır.

Aralık 2013'te yayımlanan Türk Yalıtım Standardı TS 825'e göre 2. iklim bölgesinde bulunan Balıkesir ilinde, en düşük dış ortam sıcaklığı Ocak ayı için 2.9 °C en yüksek ise Temmuz ayı için 24.9 °C olarak verilmiştir. Denklem (1) ve (2) kullanılarak yapılan hesaplamalarla, beyaz boya ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 0.2 °C, kuzey yönünde -0.3 °C ve doğu/batı yönlerinde -0.1 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 23.0 °C, kuzey yönünde 22.9 °C ve doğu/batı yönlerinde 23.3 °C olarak tespit edilmiştir. Alüminyum ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 3.0 °C, kuzey yönünde 2.9 °C ve doğu/batı yönlerinde 2.9 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında tüm yönlerde 25.1 °C olarak tespit edilmiştir. Kırmızı tuğla ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 1.1 °C, kuzey yönünde 0.0 °C ve doğu/batı yönlerinde 0.4 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek

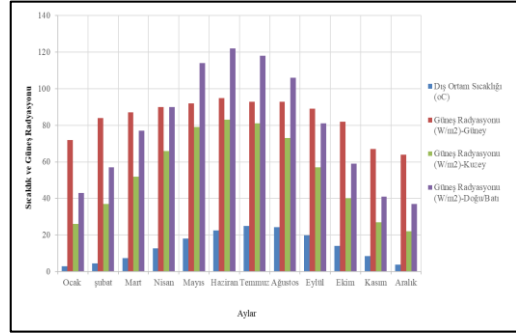
ise Temmuz ayında güney yönünde 24.3 °C, kuzey yönünde 24.0 °C ve doğu/batı yönlerinde 25.0 °C olarak tespit edilmiştir. Siyah boya ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 1.9 °C, kuzey yönünde 0.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 0.8 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 25.5 °C, kuzey yönünde 25.0 °C ve doğu/batı yönlerinde 26.5 °C olarak tespit edilmiştir. Metal siyah kaplama ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 5.1 °C, kuzey yönünde 3.5 °C ve doğu/batı yönlerinde 4.0 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 27.9 °C, kuzey yönünde 27.4 °C ve doğu/batı yönlerinde 28.7 °C olarak tespit edilmiştir. Beton ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 1.2 °C, kuzey yönünde 0.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 0.5 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 24.4 °C, kuzey yönünde 24.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 25.0 °C olarak tespit edilmiştir. Mermer ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 0.7 °C, kuzey yönünde -0.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 0.2 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 23.6 °C, kuzey yönünde 23.4 °C ve doğu/batı yönlerinde 24.0 °C olarak tespit edilmiştir. Porselen ve çini ile kaplı dış duvar için en düşük Ocak ayında güney yönünde 0.4 °C, kuzey yönünde -0.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 0.1 °C olarak hesaplanmıştır. En yüksek ise Temmuz ayında güney yönünde 23.2 °C, kuzey yönünde 23.1 °C ve doğu/batı yönlerinde 23.5 °C olarak tespit edilmiştir. Beyaz boyanın soğurganlık değeri 0.26 iken yayıcılık değeri 0.9 dur. Soğurganlık

değeri düşük iken yayıcılık değeri yüksektir. Böylece tüm yönler düşünüldüğünde, ısıtma ve soğutma dönemlerinde çalışmadaki bütün kaplama ve boyalar için en düşük güneş hava sıcaklık değerine sahiptir. Alüminyum kaplamada ise soğurganlık değeri 0.09 ve yayıcılık değeri 0.03 ile en düşük soğurganlık ve yayıcılık değerine sahip olduğu görülmüştür. Isıtma ve soğutma dönemlerinde tüm yönlerde güneş hava sıcaklığı kısmen daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Siyah boyanın soğurganlık değeri 0.98 ve yayıcılık değeri 0.98 ile aynı değerde olması güneş hava sıcaklığını dış ortam kuru termometre sıcaklığına göre kısmi olarak arttırmıştır. Çalışmada, ısıtma ve soğutma dönemlerinde tüm yönlerde güneş hava sıcaklığı en yüksek değeri metal siyah kaplamada görülmektedir. Bunun nedeni soğurganlık değerinin 0.87 ile yüksek değerde iken yayıcılık değerinin 0.09 ile en düşük değerde olmasındandır. Isıtma döneminde güneş radyasyonu güney yönünde en yüksek değerde iken kuzey cephesinde en düşük değerdedir. Soğutma döneminde doğu/batı yönlerinde en yüksek değerlerde iken yine kuzey yönünde ise en düşük değerdedir. Bu değerler ve diğer değerler? Şekil 2, Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 2'de Balıkesir ili için dış ortam sıcaklık ve farklı yönlerdeki güneş radyasyonu değerleri verilmiştir. Denklem (1) de kullanılan soğurganlık ve yayıcılık değerleri, Şekil 3'te farklı kaplama ve boyalar için gösterilmiştir. Tablo 1'de yılın en soğuk ve en sıcak ayları için renkteki boya ve kaplamalara bağlı farklı yönlerdeki sıcaklık değerleri verilmiştir. Şekil 1'de kış ve yaz için dış duvar yüzeyinden

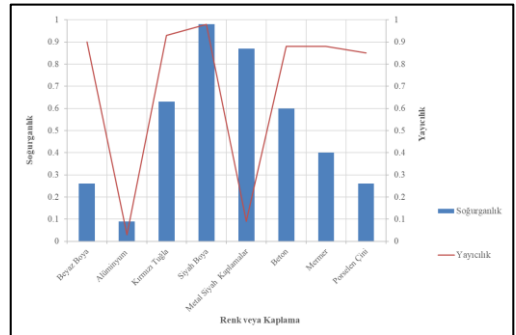
enerji ve ekserji geçişi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Kış ve Yaz için dış duvar yüzeyinden enerji ve ekserji geçişi (Kılıçlı, 2018 ve Çengel, 2011).



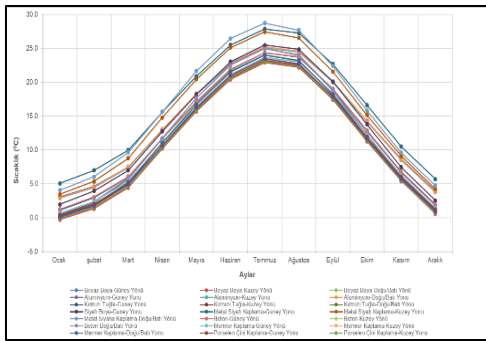
Şekil 2. Balıkesir ili için dış ortam sıcaklık ve farklı yönlerdeki güneş radyasyonu değerleri (TS 825, 2013).



Şekil 3. Farklı boya ve kaplamalar için soğurganlık ve yayıcılık değerleri (Çengel, 2011).

Tablo 1. Yılın en soğuk ve en sıcak ayları için boya ve kaplamalara bağlı farklı yönlerdeki sıcaklık değerleri

Boya veya Kaplama	Ay	Yön			Boya veya Kaplama	Ay	Yön		
		Gün ey	Kuzey	Doğu /Bati			Gün ey	Kuzey	Doğu /Bati
Beyaz Boya	Ocak	0.2	-0.3	-0.1	Alüminyum	Ocak	3.0	2.9	2.9
	Temmuz	23.0	23.0	23.3		Temmuz	25.1	25.1	25.2
Kırmızı Tuğla	Ocak	1.1	0.0	0.4	Siyah Boya	Ocak	1.9	0.1	0.8
	Temmuz	24.3	24.0	25.0		Temmuz	25.4	25.0	26.5
Metal Siyah Kaplama	Ocak	5.1	3.5	4.1	Beton	Ocak	1.2	0.1	0.5
	Temmuz	27.9	27.4	28.7		Temmuz	24.4	24.1	25.0
Mermer	Ocak	0.7	-0.1	0.2	Porselen Çini	Ocak	0.4	-0.1	0.1
	Temmuz	23.6	23.4	24.0		Temmuz	23.2	23.1	23.5



Şekil 4. Farklı renkteki boya ve kaplamalara bağlı farklı yönlerdeki tüm yıl için dış yüzey sıcaklık değerleri

3. Bulgular

Denklem (3) ile (6) arasında ısıtma ve soğutma derece gün değerleri hesaplanmıştır. Bu derece-gün değerleri kullanılarak, Denklem (7) de ısıtma dönemi için ve Denklem (8) de ise soğutma dönemi için enerji tüketimleri tespit edilmiştir. Bu göre, beyaz boya, alüminyum, kırmızı tuğla, siyah boya, metal siyah kaplamalar, beton, mermer ve porselen çini kaplama ve boyaların tümü düşünüldüğünde ısıtma döneminde doğal gaz yakıt kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek enerji

tüketimi 42.904 kWh/m² ile beyaz boyada hesaplanmıştır. Kuzey yönü için ise aynı boyada 44.170 kWh/m², doğu/batı yönlerinde için yine aynı boyada 43.555 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 25.066 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 30.158 kWh/m² ve doğu/batı yönlerinde için yine aynı kaplamada 26.893 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Isıtma döneminde kömür yakıt kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek enerji tüketimi 61.384 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 63.198 kWh/m², doğu/batı yönlerinde için yine aynı boyada 62.312 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 35.863 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 43.150 kWh/m² ve doğu/batı yönlerinde için yine aynı kaplamada 38.478 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Soğutma dönemi için ise elektrik tüketimine bağlı olarak güney yönü için en yüksek enerji tüketimi 3.385 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 3.133 kWh/m²,

doğu/batı yönlerinde için yine aynı kaplamada 3.756 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 0.986 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 0.911 kWh/m² ve doğu/batı yönlerinde için yine aynı boyada 1.097 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Güneş hava sıcaklık değerine bağlı olarak hesaplanan ısıtma ve soğutma dönemi derece gün değerlerine bağlı olarak ısıtma ve soğutma periyodu enerji tüketimi değerleri değişmektedir. Beyaz boyada güneş hava sıcaklığı değerlerinin en düşük hesaplanmasına bağlı olarak en yüksek ısıtma derece gün değerleri bulunmuştur. Buna bağlı olarak ısıtma dönemi doğal gaz ve kömür bağlı enerji tüketimi değeri en yüksektir. Fakat soğutma derece gün değerlerinin en düşük olması sebebiyle soğutma döneminde ise en düşük elektrik enerjisi tüketimi elde edilmektedir. Siyah metal kaplamada ise tam tersi bir durum meydana gelmektedir. Isıtma döneminde en düşük derece gün değerleri hesaplanması ile en düşük doğal gaz ve kömür enerjisi tüketimi tespit edilmiştir. Soğutma döneminde ise en yüksek derece gün değerleri hesaplanmasına bağlı olarak elektrik enerjisi tüketimi en yüksek değerdedir. Doğal gaz yakıtının ısı verimi kömüre göre daha yüksek olması sebebiyle doğal gaz kullanılması daha az enerji tüketimine sebep olacaktır. Bu nedenle doğal gaz daha tasarruflu bir enerji kaynağıdır.

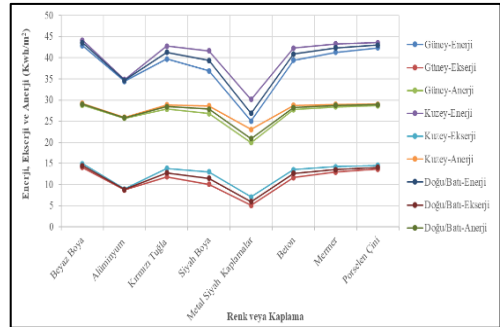
Denklem (9) ve Denklem (10) kullanılarak ısıtma ve soğutma dönemi için dış duvar yüzeyindeki kaplama ve boyalarına bağlı olarak ekserji kayıpları hesaplanmıştır. Isıtma döneminde doğal gaz yakıt ve soğutma döneminde elektrik kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek ekserji tüketimi 14.076 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 14.969 kWh/m², doğu/batı yönlerinde için yine aynı boyada 14.495 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 5.118 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 7.086 kWh/m² ve doğu/batı yönlerinde için yine aynı kaplamada 5.998 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Isıtma döneminde kömür yakıt ve soğutma döneminde elektrik kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek ekserji tüketimi 20.125 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 21.405 kWh/m², doğu/batı yönlerinde için yine aynı boyada 20.723 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 7.203 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 10.036 kWh/m² ve doğu/batı yönlerinde için yine aynı kaplamada 8.438 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Enerji tüketimiyle doğru orantılı olarak en yüksek ekserji miktarı beyaz boyada ve kuzey yönünde tespit edilmiştir. En düşük ise metal siyah kaplamada güney yönünde hesaplanmıştır.

Enerji tüketimi ile ekserji kayıpları değerleri ve Denklem (11) kullanılarak enerji değerleri tespit edilmiştir. Isıtma

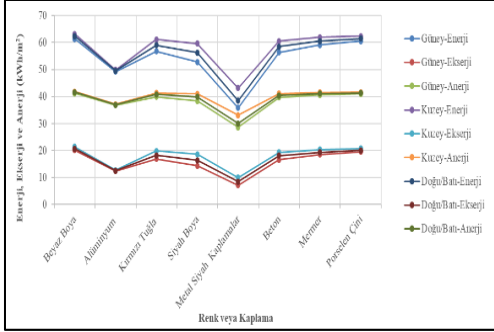
döneminde doğal gaz yakıt ve soğutma periyodunda elektrik kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek anerji tüketimi 28.828 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 29.902 kWh/m², doğu/batı yönleri için yine aynı boyada 29.060 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 19.948 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 23.072 kWh/m² ve doğu/batı yönleri için yine aynı kaplamada 20.895 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Isıtma periyodunda kömür yakıt ve soğutma periyodunda elektrik kullanımına bağlı güney yönü için en yüksek anerji tüketimi 41.260 kWh/m² ile beyaz boyada, kuzey yönü için aynı boyada 41.793 kWh/m², doğu/batı yönleri için yine aynı boyada 41.595 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise güney yönü için 28.660 kWh/m² ile metal siyah kaplamada, kuzey yönü için aynı kaplamada 33.114 kWh/m² ve doğu/batı yönleri için yine aynı kaplamada 30.040 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Enerji tüketimiyle doğru orantılı olarak en yüksek anerji beyaz boyada ve kuzey yönünde tespit edilmiştir. En düşük ise metal siyah kaplamada güney yönünde hesaplanmıştır. Bu değerler ve diğer tüm değerler, Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 5'te ısıtma dönemi doğal tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji değerleri gösterilmiştir. Şekil 6'da ısıtma dönemi kömür tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji

değerleri verilmiştir. Şekil 7'de soğutma dönemi elektrik tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji değerleri gösterilmiştir. Şekil 8'de ise ısıtma ve soğutma dönemi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı ayrıntı ekserji değerleri gösterilmiştir.

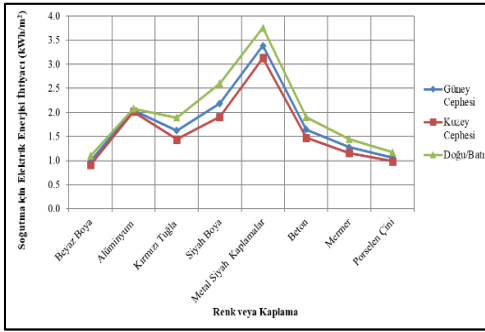
Kış dönemi için sıcaklığa bağlı sönüm oranı en yüksek 0.066 ile Alüminyum kaplamada güney yönünde hesaplanmıştır. En düşük ise siyah boyalı doğu/batı yönlerinde tespit edilmiştir. Yaz döneminde ise en yüksek sönüm oranı 0.095 ile metal siyah boyada doğu/batı yönünde hesaplanmıştır. En düşük ise 0.086 ile beyaz boya ve porselen çini kaplamada güney ve kuzey yönünde bulunmuştur. Bu ve diğer değerler Tablo 2'de verilmiştir.



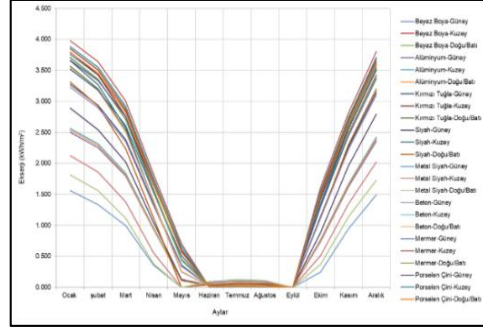
Şekil 5. Isıtma dönemi doğal tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji değerleri



Şekil 6. Isıtma dönemi kömür tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji değerleri



Şekil 7. Soğutma dönemi elektrik tüketimi için farklı dış duvar yönündeki renkteki boya veya kaplamalara bağlı enerji, ekserji ve anerji değerleri



Şekil 8. Isıtma ve soğutma dönemi için farklı dış duvar yönlerindeki boya veya kaplamalara bağlı ekserji değerleri.

4. Sonuçlar

TS 825'te ikinci bölgesindeki Balıkesir ilindeki binaların dış duvarlarına çok yaygın olarak uygulanan sekiz farklı kaplama ve boya için yapılan incelemeler sonucu elde edilen sonuçlar:

En yüksek ısıtma derece gün değerleri beyaz boyada iken en düşük ise metal siyah kaplamada tespit edilmiştir. Soğutma derece gün değerleri ise tam tersi en yüksek metal siyah kaplamada ve en düşük ise beyaz boyada görülmüştür.

Tablo 2. Yılın kış ve yaz dönemi için boya ve kaplamalara bağlı farklı yönlerdeki sönüm faktörü (sönüm oranı) değerleri

Boya veya Kapl.	Dönem	Yön			Boya veya Kapl.	Dönem	Yön		
		Güney	Kuzey	Doğu /Batı			Güney	Kuzey	Doğu /Batı
Beyaz Boya	Kış	0.064	0.063	0.063	Alüminyum	Kış	0.066	0.065	0.065
	Yaz	0.086	0.086	0.087		Yaz	0.090	0.090	0.091
Kırmızı Tuğla	Kış	0.063	0.061	0.061	Siyah Boya	Kış	0.062	0.060	0.059
	Yaz	0.087	0.087	0.089		Yaz	0.088	0.088	0.091
Metal Siyah Kap.	Kış	0.064	0.062	0.061	Beton	Kış	0.063	0.061	0.061
	Yaz	0.092	0.092	0.095		Yaz	0.087	0.087	0.089
Mermer	Kış	0.063	0.063	0.062	Porcelain Çini	Kış	0.064	0.063	0.063
	Yaz	0.087	0.087	0.088		Yaz	0.086	0.086	0.087

Isıtma dönemi için kuzey yönünde ve soğutma dönemi için ise doğu/batı yönlerinde daha yüksek derece gün değerleri bulunmuştur. Burada en etkili parametre yönlere bağlı güneş radyasyonu değeri, duvar yüzeyi soğurganlığı ve yayıcılığıdır. Buna bağlı olarak ısıtma döneminde en yüksek ısıtma enerji tüketimi değeri kömür enerji kaynağı kullanan, beyaz boyalı dış duvar yüzeyi için, kuzey yönüne bağlı olarak, 63.198 kWh/m² hesaplanmıştır. Soğutma dönemi için kömür enerji kaynağı kullanan, metal siyah kaplamalı dış duvar yüzeyi için, doğu/batı yönlerinde 3.756 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. En düşük ise ısıtma döneminde kömür enerji kaynağı kullanan, metal siyah kaplamalı dış duvar yüzeyi için güney yönüne bağlı olarak 35.863 kWh/m² hesaplanmışken, soğutma döneminde beyaz boyalı dış duvar yüzeyi için kuzey yönünde 0.911 kWh/m² olarak tespit edilmiştir. Doğal gaz enerji kaynağı için bu değerler aynı parametrelere bağlı olarak ısıtma döneminde en yüksek 44.170 kWh/m² olarak bulunmuştur. En düşük ise 25.066 kWh/m² olarak hesaplanmıştır.

Ekserji miktarı için, enerji tüketimine bağlı tüm yıl boyunca, ısıtma ve soğutma dönemi birlikte düşünüldüğünde aynı parametrelere bağlı kömür enerji kaynağı kullanan, beyaz boyalı dış duvar yüzeyi için, kuzey yönüne en yüksek 21.405 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise kömür enerji kaynağı kullanan, metal siyah kaplamalı dış duvar yüzeyi için güney yönüne 7.203 kWh/m² hesaplanmıştır. Doğal gaz enerji kaynağına bağlı olarak, aynı parametreler için en yüksek 14.969

kWh/m² ve en düşük ise 5.118 kWh/m² olarak tespit edilmiştir.

Anerji değeri ise, tüm yıl boyunca, ısıtma ve soğutma dönemi birlikte düşünüldüğünde aynı parametrelere bağlı olarak kömür enerji kaynağı kullanan, beyaz boyalı dış duvar yüzeyi için, kuzey yönüne en yüksek 41.793 kWh/m² hesaplanmıştır. En düşük ise kömür enerji kaynağı kullanan, metal siyah kaplamalı dış duvar yüzeyi için güney yönüne 28.660 kWh/m² hesaplanmıştır. Doğal gaz enerji kaynağına bağlı olarak, aynı parametreler için en yüksek 29.202 kWh/m² ve en düşük ise 19.948 kWh/m² olarak tespit edilmiştir.

Tüm boya ile kaplamalar ve yaz ile kış dönemleri birlikte düşünüldüğünde, güney yönünde 0.062-0.092 arasında, doğu/batı yönlerinde 0.059-0.095 arasında, kuzey yönünde ise 0.060-0.092 arasında sıcaklık sönüm faktörü (sönüm oranı) hesaplanmıştır. Kış döneminde bütün kaplama ve boya türleri için sıcaklığa bağlı 0.066 ile sönüm faktörü (sönüm oranı) en yüksek güney yönünde alüminyum kaplamada, yaz döneminde ise en yüksek 0.095 ile doğu/batı yönlerinde tespit edilmiştir.

Kış döneminde en düşük doğu/batı yönlerinde 0.059 ve yaz döneminde ise en düşük 0.086 ile güney ve kuzey yönlerinde porselen-çini kaplama ve beyaz boyada bulunmuştur. Kış ve yaz dönemi sönüm faktörünün değerleri yönlere bağlı olarak birbirine ters durumda olduğu görülmüştür.

Balıkesir ilinde ısıtma döneminin soğutma döneminden daha uzun olmasından dolayı tüm yıl yani ısıtma ve soğutma dönemi birlikte düşünüldüğünde dış duvar yüzeyine metal siyah kaplama daha uygun olacağı görülmektedir. Isıtma döneminde doğal gaz enerji kaynağı kullanılması enerji tüketimi açısından daha tasarruflu olacağı anlaşılmaktadır.

5. Kaynaklar

- Aldaftari, H. A., Okajima, J., Komiya, A., Maruyama, S. (2019). Radiative control through greenhouse covering materials using pigmented coatings, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 231, 29-36.
doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.04.009
- Algarni, S. (2019). Potential for cooling load reduction in residential buildings using cool roofs in the harsh climate of Saudi Arabia, *Energy and Environment*, 30, 2, 235-253.
doi.org/10.1177/0958305X1878734
- Al-Naghi, A. A. A., Rahman, M. K., Al-Amoudi, O. S. B., Al-Dulaijan, S. U. (2020). Thermal performance evaluation of walls with aac blocks, insulating plaster, and reflective coating, *Journal Energy Engineering*, 146, 2.
doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000636
- Alrwashdeh, S. S, Qadourah, J. A., Al-Falahat, A. M. (2022). Investigation of the effect of roof color on the energy use of a selected house in Amman, Jordan, *Frontiers in Mechanical Engineering*, 8, 97170.
doi.org/10.3389/fmech.2022.897170
- Asan, H. (2000). Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view, *Energy and Buildings*, 32, 197-203.
doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00044-X
- Asan, H. (2006). Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials, *Building and Environment*, 41, 615-620.
doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.020
- Ascione, F., Bellia, L., Mazzei, P., Minichiello, F. (2010). Solar gain and building envelope: the surface factor, *Building Research and Information*, 38, 2, 187-205.
doi.org/10.1080/09613210903529118
- Ascione, F., Bianco, N., Mauro, G. M., Napolitano, D. F. (2019). Retrofit of villas on Mediterranean coastlines: Pareto optimization with a view to energy-efficiency and cost-effectiveness, *Applied Energy*, 254, 113705.
https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113705
- Chen, X.; Zhu, S.; Chen, T. (2022). Thermal parameters calibration and energy-saving evaluation of spectral selective absorption film coated glazing system based on heat transfer simulation, *Energies*, 15, 2780.
doi.org/10.3390/en15082780
- Çengel, Y. A. (2011). *Isı ve kütle transferi pratik bir yaklaşım*, (1. Cilt), Izmir, Turkey.
- Dehwah, A. H.A., Krarti, M. (2020). Impact of switchable roof insulation on energy performance of US residential buildings, *Building and Environment*, 177, 106882.
doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106882
- Evangelisti, L.; Guattari, C.; Asdrubali, F. (2019). On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review, *Energy and Buildings* 183, 607-662.
doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.037
- Fabiani, C., Pisello, A.L., Bou-Zeid, E., Yang, J., Cotana, F. (2019). Adaptive measures for mitigating urban heat islands: The potential of thermochromic materials to control roofing energy balance, *Applied Energy*, 247, 155-170.
doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.020
- Fabiani, C., Castaldo, V.L., Pisello, A.L. (2020). Thermochromic materials for

- indoor thermal comfort improvement: Finite difference modeling and validation in a real case-study building, *Applied Energy*, 262, 114147.
doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114147
- Fathipour, R., Hadidi A. (2017). Analytical solution for the study of time lag and decrement factor for building walls in climate of Iran, *Energy*, 134, 167-180.
doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.009
- Gupta, V., Deb, C. (2022). Energy retrofit analysis for an educational building in Mumbai, *Sustainable Futures*, 4, 100096.
doi.org/10.1016/j.sfr.2022.100096
- Gong G., Zeng W., Chang S., He J., Li K. (2007). Scheme-selection optimization of cooling and heating sources based on exergy analysis, *Applied Thermal Engineering*, 27, 942-950.
doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.08.011
- Hepbaşlı, A., Özcan, H. G., Günerhan, H., Yıldırım, N. (2019). Binaların ekserji bazlı termodinamik analizleri ve değerlendirmeleri, 14. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 17-20 Nisan, İzmir, Türkiye.
- Hua, J., Yu, X. (2019). Thermo and light-responsive building envelope: Energy analysis under different climate conditions, *Solar Energy*, 193, 866-877.
doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.021
- Jin, X., Zhang, X., Cao, Y., Wang G. (2012). Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor, *Energy and Buildings*, 47, 369-374.
doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.010
- Karakaşlı, E. (2012). *Değişik iklim bölgelerindeki binaların performansının ekserjetik açıdan değerlendirilmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Elâzığ, Türkiye.
- Khahir, S., Vakilinezhad, R.. (2022). Energy and thermal analysis of DSF in the retrofit design of office buildings in hot climates, *Architectural Engineering and Design Management*, 19, 6, 1-23.
doi.org/10.1080/17452007.2022.2147898
- Kılıçlı A. (2018). *Ege üniversitesi bünyesindeki mevcut bir binanın enerji-ekserji analizi ve iyileştirme önerileri*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, İzmir, Türkiye.
- Kon, O. (2018). Binalarda ekonomik optimizasyon kullanılarak dış duvar ve pencerelere bağlı yakıt Tüketimi ve emisyon hesabı, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33, 1, 101-113.
doi.org/10.17341/gazimmfd.406783
- Kon, O., Caner, İ. (2022a). Benefiting from solar energy due to different emissivity levels of multiple glasswindows for buildings, *Niğde Ömer Halisdemir University (NOHU) Journal of Engineering Sciences*, 11, 3, 781 – 796.
doi.org/10.28948/ngumuh.1091332
- Kon, O., Caner, İ. (2022b). The effect of external wall insulation on mold and moisture on the buildings, *Buildings*, 12, 5, 521.
doi.org/10.3390/buildings12050521
- Kontoleon, K., J., Eumorfopoulou, E., A. (2008). The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region, *Renewable Energy*, 33, 1652-1664.
doi.org/10.1016/j.renene.2007.09.008
- Liu, H., Wang, F., Lei, S., Ou, J., Li, W. (2021). Large-area fabrication of colorful superhydrophobic coatings with high solar reflectivity, *Construction and Building Materials*, 304, 124602.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124602
- Maduru, V. R., Shaik, S., Cuce, E., Afzal, A., Panchal, H., Cuce, P. M. (2022). UV coated acrylics as a substitute for generic glazing in buildings of Indian climatic conditions: Prospective for energy savings, CO₂

- abatement, and visual acceptability, *Energy and Buildings*, 268, 112231.
doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112231
- Martínez-García, C., Fonteboa, B. G., Carro-Lopez, D., P'erez-Ordo'nez, J. L., (2021). Assessment of mussel shells building solutions: A real-scale application, *Journal of Building Engineering*, 44, 102635.
doi.org/10.1016/j.job.2021.102635
- Mavromatidis, E., Mankibi, M., E., Mat, P., M. (2012). Santamouris Numerical estimation of time lags and decrement factors for wall complexes including Multilayer Thermal Insulation, in two different climatic zones Lazaros, *Applied Energy*, 92, 480-491.
doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.007
- Montes, F. F., Córdoba, P. F., Calvet, J. L. H., Conejero, J. A., Poza-Luján, J. L., (2020). A system to monitor and model the thermal isolation of coating compounds applied to closed spaces, *Thermal Science*, 24, 3A, 1885-1892.
doi.org/10.2298/TSCI190525077M
- Ozel, M. (2013). Thermal, conomical and environmental analysis of insulated building walls in a cold climate. *Energy Conversion and Management*, 76, 674-684.
doi.org/10.1016/j.enconman.2013.08.013
- Özel, M., Pıhtılı, K. (2006). Bina dış yüzeylerinin güneş ışınımını yutma oranlarının ısı akısı açısından araştırılması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12, 2, 167-171.
- Peng, Y., Fan, L., Jin, W., Ye, Y., Huang, Z., Zhai, S., Luo, X., Ma, Y., Tang, J., Zhou, J., Greenburg, L. C., Majumdar, A., Fan, S., Cui, Y. (2022). Coloured low-emissivity films for building envelopes for year-round energy savings, *Nature Sustainability*, 5, 339-347.
doi.org/10.1038/s41893-021-00836-x
- Qiu, Z., Wang, J., Yu, B., Liao, L., Li, J. (2021). Identification of passive solar design determinants in office building envelopes in hot and humid climates using data mining techniques, *Building and Environment*, 196, 107566.
doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107566
- Rossi, S., Calovi, M., Dalpiaz, D., Fedel, M. (2020). The Influence of NIR pigments on coil coatings thermal behaviors, *Coatings*, 10, 514.
doi.org/10.3390/coatings10060514
- Shukuya, M. (2019). Exergetic approach to the understanding of built environment—state-of-the-art review, *Japan Architectural Review*, 2, 143-152.
doi.org/10.1002/2475-8876.12082
- Somasundaram, S., Raj, Thangavelu, S., Chong, A. (2020). Improving building efficiency using low-e coating based retrofit double glazing with solar films, *Applied Thermal Engineering*, 171, 115064.
https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115064
- Türk Standartları Enstitüsü. (2013). TS 825: *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*, Türk Standardı.
- Ulaş, A. (2010). *Binalarda TS 825 hesap yöntemine göre ısı kaybı, yakıt tüketimi, karbondioksit emisyonu hesabı ve maliyet analizi*, , Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, Türkiye.
- Wardi, F. Z., Khabbazi, A., Cherki, A. B., Khaldoun, A. (2020). Thermomechanical study of a sandwich material with ecological additives, *Construction and Building Materials*, 252, 119093.
doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119093
- Xie, N., Li, H., Abdelhady, A., Harvey, J. (2019). Laboratorial investigation on optical and thermal properties of cool pavement nano-coatings for urban heat island mitigation, *Building and Environment*, 147, 231-240.
doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.017
- Yıldırım, E. (2015). *Bina dış duvar yalıtımının enerji ve ekserji analizi yöntemiyle optimize edilmesi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri

- Enstitüsü Güneş Enerjisi Anabilim Dalı,
İzmir, Türkiye.
- Yıldırım, M., Oktay, H., Yumrutaş, R. (2018). Bina duvarlarının termofiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri ile bu özelliklerin dinamik ısı karakterlerine etkilerinin araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 2, 872-880.
doi: 10.19113/sdufbed.07639
- Yuxuan, Z., Yunyun, Z., Jianrong, Y., Xiaoqiang, Z., (2020). Energy saving performance of thermochromic coatings with different colors for buildings, *Energy and Buildings*, 215, 109920.
- Zhang, Y., Zhai, X., (2019). Preparation and testing of thermochromic coatings for buildings, *Solar Energy*, 191, 540-548.
doi.org/10.1016/j.solener.2019.09.042
- Zhang, Y., Long, E., Li, Y., Li, P. (2017). Solar radiation reflective coating material on building envelopes: Heat transfer analysis and cooling energy saving, *Energy Exploration and Exploitation*, 35, 6, 748-766.
doi.org/10.1177/0144598717716285
- Zhu, S., Mai, X., (2019). A review of using reflective pavement materials as mitigation tactics to counter the effects of urban heat island, *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2, 381-388.
doi.org/10.1007/s42114-019-00104-9

Araştırma Makalesi / Research Article

**Effect of Denim Waste Fibres on Technical Properties of
Cementitious Lightweight Composite Mortars**

*¹Şevket Onur KALKAN, ²Halil İbrahim ÖCAL, ³Lütfullah GÜNDÜZ

¹İzmir Kâtip Çelebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, İzmir, Türkiye, sevketonur.kalkan@ikcu.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0250-8134>

²İzmir Kâtip Çelebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, İzmir, Türkiye, hhalilocal@gmail.com, ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0009-4495-2277>

³İzmir Kâtip Çelebi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Civil Engineering, İzmir, Türkiye, lutfullah.gunduz@ikcu.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-2487-467X>

Geliş / Received: 27.05.2023;

Kabul / Accepted: 28.12.2023

Abstract

The aim of this study was to investigate the utilization of recycled denim waste fibers (DWF) for reinforcing cementitious lightweight composite mortar (CLCM). The research focused on evaluating how the addition of DWF affected various aspects of CLCMs, such as flowability, fresh and hardened unit weight, porosity, water absorption, flexural strength, compressive strength, and load-deformation characteristics. Different proportions of fibers (0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, and 1.50 wt.% of cement) were incorporated into the CLCM. The results showed a slight decrease in both fresh and hardened unit weights compared to the reference. It was noted that the consistency of the mortars declined with the increasing addition of fibers. Additionally, the inclusion of any amount of fiber led to an enhancement in the mechanical properties of the lightweight mortars. Furthermore, the reference mortar exhibited less deformation under load, indicating its higher brittleness. Moreover, the study observed that the incorporation of DWFs had the ability to simultaneously improve both the ultimate load-bearing capacity and deformation of the mortars.

Keywords: Denim waste fibre, Fibre reinforcement, Lightweight composite mortar, Load-deformation, Strength

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Kalkan, Ş. O., Öcal, H. İ. & Gündüz, L. (2023). Effect of Denim Waste Fibres on Technical Properties of Cementitious Lightweight Composite Mortars. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 5(2), 71-90.

Kot Atık Liflerinin Çimento Esaslı Hafif Kompozit Harçların Teknik Özelliklerine Etkisi

Öz

Bu çalışmanın amacı geri dönüştürülmüş kot atık liflerinin (KAL), çimento esaslı hafif kompozit harç (ÇHKH) takviyesi için kullanımını incelemektir. Bu araştırma, KAL eklemesinin, kıvam, taze ve sertleşmiş birim ağırlık, gözeneklilik, su emme, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yük-deformasyon gibi ÇHKH'lerin çeşitli özelliklerini nasıl etkilediğini değerlendirmeye odaklanmaktadır. Farklı lif oranları (çimentonun ağırlıkça %0, %0.25, %0.50, %0.75, %1.00, %1.25 ve %1.50) ÇHKH'lara ilave edilerek kullanılmıştır. Test sonuçları, referans numunesine kıyasla hem taze hem de sertleşmiş birim ağırlıklarda hafif bir azalma olduğunu göstermiştir. Harçların kıvamının lif eklemesi arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışma kapsamında kullanılan bütün lif dozajlarının eklenmesinin hafif harçların mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür. Bu sonuçlara ilave olarak, referans harcı yük altında daha az deformasyon sergilemiş, bu da daha referans harcı için yüksek kırılma kapasitesine işaret etmiştir. Ayrıca, bu çalışmada KAL'lerin harçların hem nihai yük taşıma kapasitesini hem de deformasyonunu aynı anda artırma yeteneğine sahip olduğunu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kot atık lifi, Lif takviye, Hafif kompozit harç, Yük-deformasyon, Dayanım

1. Introduction

The construction sector is a prominent consumer of materials, and it is crucial to utilize more efficient raw materials in the production of construction materials. Recycling and reusing materials are effective strategies for sustainability. Textile waste fibre is one such material. Globally, textile production exceeds 88.5 million tons annually, resulting in a significant amount of waste from the textile industry and discarded textile products. In Europe alone, the textile industry generates approximately 12 million tons of waste each year. Some of this waste is recycled into yarn, but small-sized fibres are produced as waste byproducts during this process. Unfortunately, these textile waste fibres or cuttings are either burned or end up in landfills, causing environmental harm as they are non-biodegradable (Reis, 2009; Ryu et al., 2007). However, this substantial accumulation of textile waste fibre presents an opportunity for its utilization in construction materials. The textile and garment industry are the major driving force in Turkey's thriving economy. Turkey ranks third among European countries in textile exports and is the sixth-largest garment exporter globally. With such significant production capacity, waste and residual materials generated by the textile sector vary depending on production activities. While some of these materials are recycled internally within the industry, the accumulation of waste fibre resulting from the recycling process should not be underestimated. The use of waste materials in the construction industry has gained importance in recent years,

particularly due to their advantages such as thermal conductivity, sound insulation, structural reinforcement, and lightweight composite production when used in cementitious materials. Textile waste fibre is one of these valuable waste materials. Therefore, it is essential to further explore the utilization of these materials in cementitious composites from both economic and sustainable perspectives.

The utilization of fibres in concrete commenced in the early 1960s in developed nations, and since then, the applications of fibre-reinforced concrete have increased (Aghaee & Foroughi 2013). The literature reveals that various types of fibres have been employed as reinforcement elements in cementitious composites. Numerous studies have explored the benefits of different fibres, including steel fibres (Grabois et al., 2016; Pogorelov & Semenyak, 2016), polypropylene fibres (Yin et al., 2016; H. Zhang et al., 2016), glass fibres (Marikunte et al., 1997; Shah et al., 1988), and organic fibres such as sisal (Savastano Jr et al., 2003, Savastano Jr et al., 2006), coconut and oil palm (Lertwattanaruk & Suntijitto, 2015), banana (Mostafa & Uddin, 2016), and more. While research on textile-reinforced cementitious composites is often conducted to enhance masonry walls and concrete structures (Elsanadedy et al., 2013; Garmendia et al., 2014; Larrinaga et al., 2014; Papanicolaou et al., 2008; Triantafyllou & Papanicolaou, 2006), there remains an insufficient investigation into the utilization of waste textile fibres in cementitious composites. In the

available literature, the use of waste carpet fibres as reinforcement material is more prevalent (Aspiras & Manalo, 1995; Ucar & Wang, 2011; Wang et al., 1994) compared to other types of waste textile fibres like cotton (Binici & Aksogan, 2015; Reis, 2009), polypropylene (Murathan et al., 2014), and acrylic (Briga-Sa et al., 2013; Pinto et al., 2013).

Furthermore, there is a growing trend in the construction industry towards using lightweight aggregates to reduce dead loads and improve insulation. Lightweight aggregates can be classified into two categories: organic cellular aggregates, including expanded polystyrene foam (EPS), extruded polystyrene foam (XPS), and polyurethane foam; and inorganic cellular aggregates derived from natural and artificial sources, such as expanded perlite, expanded clay, and exfoliated vermiculite, among others (Shannag, 2011; Shoukry et al., 2016). These lightweight aggregates, such as pumice, perlite, expanded clay, vermiculite, or air entraining agents, are commonly used in the production of cementitious lightweight composite mortars (Glenn et al., 2004). Expanded clays are lightweight aggregates obtained by heating the clays in rotary kilns at around 1200°C. Expanded clays can expand up to 5-6 times their own volume as a result of outgassing when heat treated. During the heating process, the gases in the body form thousands of small bubbles, expanding the clay and forming a honeycomb structure. Expanded clays are generally round or potato-shaped as a result of the circular movement of rotary kilns and can be

obtained in different sizes and different unit weights. While a hard sintered shell is formed on the outer surface, a very light, extremely durable, and porous clinker-like structure is formed on the inner side. Lightly expanded clay aggregate is used in many industrial areas. One of the most widely used fields is the production of lightweight concrete in engineering applications. It has low unit weight, water repellency, high thermal insulation, high aggregate compressive strength, good bonding ability with cement, etc. Due to their properties, their use in civil engineering applications is gaining more intensity (Gündüz et al., 2020).

Lightweight mortars are mortars that can be produced by using aggregates with lower unit weight than normal aggregates obtained through natural or artificial means, or by creating voids within the mortar using various methods. As per the specifications outlined in TS EN 998-1 (2017), a lightweight mortar must possess a hardened unit weight that is below 1300 kg/m³. By using lightweight mortars instead of normal weight mortars in constructions, it is possible to dissipate more energy with lower dead loads. Additionally, it can contribute to thermal insulation of buildings, improving their thermal comfort properties. It can also lead to safer structures with enhanced fire resistance and provide better sound insulation in buildings, enabling the design of more comfortable structures (Coppola et al., 2018; Faghihmaleki et al., 2017; Okasha et al., 2020).

It is known that the mechanical properties of lightweight mortars are relatively low due to the lightweight aggregates and the high void content in the matrix structure. However, the physical and mechanical properties of cementitious lightweight mortars can be improved by using fibres of different origins (Kazim & Ceren, 2017; Yaprak et al., 2018; P. Zhang et al., 2019). Various types of fibres such as cellulose, polymer, synthetic, carbon, steel, etc. are used to enhance the durability properties, energy dissipation capacity, tensile strength, and toughness of the mortar (de França et al., 2016; Ji et al., 2022). The addition of fibres to cementitious mortars has long been investigated by researchers as a way to improve their mechanical properties (Abbas et al., 2019; Calis et al., 2021; Huang et al., 2022). By adding different types of fibres to mortar mixtures, improvements in compressive strength values of the mortar can be achieved, ranging from 4% to 27% (Çomak et al., 2018).

There are very limited studies on the use of very fine denim waste fibres, which are produced during the recycling of denim waste or denim production, in cementitious products. Kalkan and Gündüz (2016) determined that the use of 1.7 % denim waste fibre by weight can improve the mechanical properties of lightweight mortars. Özcan and Gündüz (2021) stated that denim waste fibres can improve the strength properties of aerated concrete. Very limited number of studies show that this waste material can have an important place in the reinforcement of lightweight mortars.

Improving the physical and mechanical properties of cementitious lightweight products, which have become increasingly important in the construction industry in recent years, has also become one of the important research topics. In this study, the effect of the amount of denim waste fibre on the properties of cement-based lightweight mortars was investigated by a series of experimental analyses. Seven different series of mortar specimens, with and without fibre additives, were created and the physical and mechanical values of these mortars were compared. The obtained data are discussed in detail, and some technical experiences that can be characterized in the context of the effects of denim waste fibre additive in R&D studies on the production of lightweight mortar in cement-based composite mortars are shared.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

In the formulation of seven composite mortar mixes, CEM I 42.5R ordinary Portland cement (PC), which closely resembles ASTM Type I cement, was employed. The cement exhibits a specific gravity of 3.15. It is used as binder material.

Expanded clay (EC) was used as lightweight aggregate in this study. Specific gravity of EC is 2.51. The grain distribution of expanded clay was used as 0/4 mm and the sieve analysis is given in Figure 1.

The fibres used in this study have cotton and synthetic content since they are formed during the recycling of denim products produced by weaving cotton and synthetic fibres together. Average fibre diameter is $35\ \mu\text{m}$ and average fibre length is 3 mm. Fibre colour is denim blue. The microscope image of the DWF is shown in Figure 2.

Regular tap water was used as mixing water.

The general view of all materials used in lightweight mortar mixes is given in Figure 3.

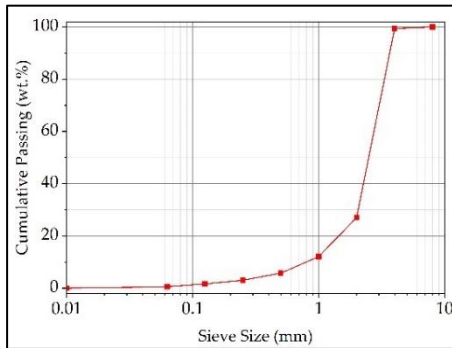


Figure 1. Sieve analysis of EC.

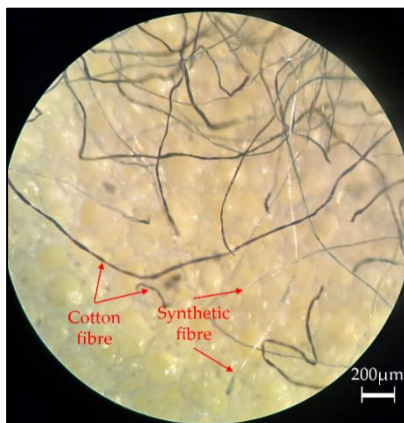


Figure 2. Microscope view of DWFs.



Figure 3. The general view of all materials used in lightweight mortar mixes.

2.2 Methods

2.2.1. CLCM production

This experimental research focused on examining the effect of denim waste fibres on physical and especially mechanical properties of cementitious lightweight composite mortars by designing various addition ratios of DWF in composite mortar mixtures. Additionally, a reference mortar mixture was formulated without the use of DWF to precisely analyse the specific effects attributable to DWF incorporation. In the study, the cement : aggregate ratio was used as 1: 2.5 and the w/c ratio was used as 0.833 at constant values. Also, DWF : cement ratio was increased from 0 to 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25 and 1.5 and fibre was added to the mortar at these rates. Before the experimental part of this study began, an initial study was conducted to prepare the final mixture mix design. According to the initial test results, when the DWF:cement ratio is higher than 1.5, the flow diameter value of the composite mortar decreases significantly and the fibers become agglomerated in the mortar. Accordingly, a decrease in strength may

be observed. For this reason, the highest DWF:cement ratio was used as 1.5. The composite combinations were outlined

in Table 1, detailing the composition design.

Table 1. Mixture design.

Mix	PC (g)	EC (g)	DWF (g)	Water (g)	w/c	DWF/c
DWF0	900	2250	0.00	750	0.833	0.00
DWF025	900	2250	2.25	750	0.833	0.25
DWF050	900	2250	4.50	750	0.833	0.50
DWF075	900	2250	6.75	750	0.833	0.75
DWF100	900	2250	9.00	750	0.833	1.00
DWF125	900	2250	11.25	750	0.833	1.25
DWF150	900	2250	13.50	750	0.833	1.50

As can be seen from the table, PC, EC, and water are fixed in the mixtures. The only variable parameter is the amount of fibre added. As a reference mortar, DWF doesn't contain any fibre amount. Test mixtures are designed to add DWF with increasing proportions as 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 and 1.50 wt.% of cement. During the mixing process, the solid components were initially placed in the mixer and blended for 2 minutes to ensure a uniform dry mixture. Subsequently, water, specifically regular tap water at a temperature of 20 ± 2 °C, was added to the mixer to create fresh cement-based lightweight composite mortar mixtures. The mixture was then mixed for an additional 2 minutes. The prepared fresh mortar was then poured into moulds. All test specimens were retained in moulds for 24 hours at ambient temperature and subsequently demoulded. All experiments on the hardened specimens were performed following water curing at 21 ± 1 °C. All tests were carried out once the water-cured specimens were dried in an oven (100 ± 5 °C) until their weight stabilized.

2.2.2. Flowability of fresh mortars

To assess the workability characteristics of the fresh mortars, a flow table test was conducted for each individual fresh mortar specimen. The flowability of the fresh mortar specimens was evaluated using a flow table apparatus, following the guidelines outlined in ASTM C1437-15 (2013).

2.2.3. Fresh and Hardened Unit Weight

Fresh and hardened unit weight of mortars were carried out on the fresh and hardened composite specimens with respect to TS EN 1015-6 (2000) and TS EN 1015-10 (2001). The unit weight of the fresh mortars were determined immediately after their production. The unit weight values of the hardened mortars, on the other hand, were determined after the mortars were cured for 28 days.

2.2.4. Permeable porosity and water absorption

Permeable porosity of 28-days cured CLCM specimens were conducted according to ASTM C642-13 (2013) standard. Capillary water absorption test was conducted on 28-day cured 4×4×16 cm prism specimens according to the conditions specified in TS EN 1015–18 (2014) standard. The test involved exposing the broken surfaces of the specimens to water. Three pieces of specimens were produced for each series and for each test.

2.2.5. Microscopic analysis

In hardened composite mortar specimens, fracture surface photographs of the specimens were taken using a Nikon (SMZ 745T) stereo type optical microscope to observe fibre distribution, matrix structure, porosity, and aggregate-cement interface.

2.2.6. Mechanical properties

The hardened composite specimens underwent compressive and flexural tensile strength tests in accordance with ASTM C349-14 (2014) and ASTM C348-14 (2014) standards. For each test and each series, three 4×4×16 cm³ prismatic specimens were manufactured. Mechanical tests were performed at curing periods of 7 and 28 days. The load-deformation curves of the specimens cured for 28 days were obtained during the analysis of compressive strength.

3. Results and Discussions

3.1. Flowability of fresh mortars

Figure 4 illustrates the flow indices of the composite mortar mixes represented as a percentage of the flow diameter value of the reference mix. The flow diameter of the reference batch was 200 mm, which corresponds to 100%. As the addition levels of DWF to composite mortars increased, the flow indices of the mortar specimens decreased. Thus, it is important to note that the flowability of all the mixtures was lower than that of the reference mixture. Moreover, the loss in flowability became more pronounced for addition levels of 1.25 wt.% of cement and higher. Other researchers who have studied the utilization of fibres in their research have also obtained similar results. Çankal et al. (2023) have observed that the use of glass fibres in cement mortar significantly reduces the flowability characteristic of the mortar. Similarly, in their study, Kalkan and Gündüz (2016) have determined that the use of denim waste fibres reduces the flowability characteristic of lightweight mortar containing pumice and perlite aggregates. The fibre additive has negatively affected the consistency of the mortars. This is due to the occurrence of agglomeration and interlocking of the denim waste fibres, which leads to a loss of consistency and restricts the mobility of the components in the mortar. Also, this can be attributed to the water absorption of the cotton-based fibres, as they retain water within their composition. This hampers the presence of free water in the mortar and

negatively affects the fluidity of the material.

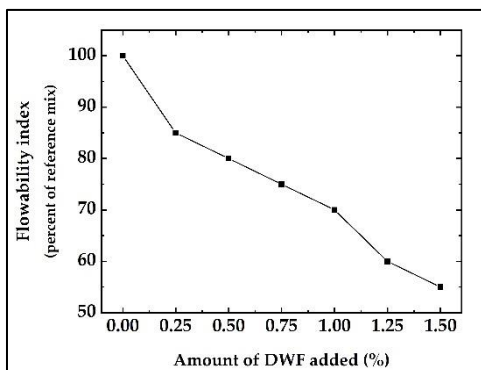


Figure 4. The flow indices of the CLCM batches.

3.2. Fresh and Hardened Unit Weight

Table 2 represents the unit weight values of fresh and hardened CLCM specimens.

Table 2. Fresh and hardened unit weight variations of CLCMs.

Mix	Fresh unit weight (kg/m ³)	Hardened unit weight (kg/m ³)
DWF0	1592.8	1370.5
DWF025	1578.1	1358.2
DWF050	1564.1	1348.4
DWF075	1493.7	1301.5
DWF100	1476.2	1290.4
DWF125	1451.0	1261.6
DWF150	1441.2	1259.7

A reduction in both fresh and hardened unit weight values of the CLCMs was observed when incorporating DWF at increasing levels. This decrease in unit weight can be attributed to the loss of workability in the fresh mortar when DWFs are added. As a result, more pores are retained in the mortar during the moulding process, leading to a decrease

in the hardened unit weight values. Additionally, it can be said that the low unit weight of the fibres leads to a decrease in the unit weight along with the increase in the volume of the mortar. However, although there is not a significant decrease in hardened unit weight, there is a maximum unit weight loss of approximately 8%. The decrease in unit weight values of mortars with the use of fibres has been observed by other researchers as well (dos Santos Alberton et al., 2023), and this phenomenon is mostly attributed to the increased presence of air within the mortars (Ş. O. Kalkan et al., 2022).

3.3. Permeable porosity and water absorption

Table 3 represents the capillary water absorption and permeable porosity values of the hardened CLCM specimens.

Table 3. Capillary water absorption and permeable porosity values of the CLCM specimens.

Mix	Capillary water absorption (kg/m ² .min ^{0.5})	Permeable porosity (%)
DWF0	0.289	12.61
DWF025	0.345	13.78
DWF050	0.349	14.97
DWF075	0.350	15.06
DWF100	0.362	15.24
DWF125	0.364	15.31
DWF150	0.379	15.52

The primary parameter utilized in the analyses was the capillary water absorption criteria specified in the TS EN

998-1 standard for mortar derivatives. The TS EN 998-1 (2017) standard defines three distinct classes (W0-W2) for capillary water absorption (c) values in mortar groups. The specified limit values for capillary water absorption in each class are as follows: W0 class has no specified value, W1 class has a limit of $c \leq 0.40 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$, and W2 class has a limit of $c \leq 0.20 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$. Based on the test results, all specimens of the mixtures conform to the W2 capillary water absorption class as defined by the TS EN 998-1 (2017) standard. On the other hand, it has been observed that as the DWF usage rate increases, the specimens absorb more water capillary due to the increased porosity. Also, another analysis focused on the time-dependent capillary water absorption values of the cement mortar specimens, and the results are depicted in Figure 5.

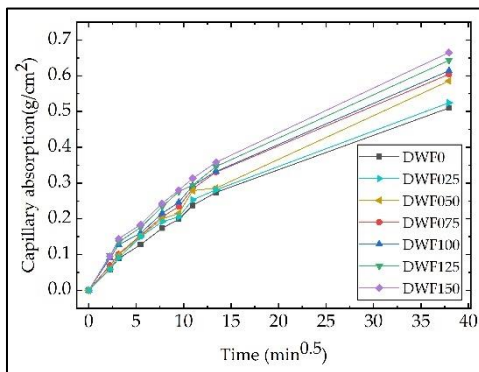


Figure 5. Capillary curves of the cement mortar specimens with DWF addition.

It has been determined that the water absorption values of the mortars increase with an increase in the usage rate of DWF in the time-dependent capillary water absorption values. This trend is found in parallel with the

capillary water absorption coefficients given in Table 3. Other researchers conducting studies on the use of different natural types of fibres in cement mortar have also revealed that fibres have a property of increasing water absorption in mortars (Benaniba et al., 2020; dos Santos Alberton et al., 2023). A similar trend has been observed in the permeable porosity values, parallel to the capillary water absorption values. It was observed that the permeable porosity values of the mortars increased as the amount of DWF added to the mortar increased. In particular, a sharp increase was observed in the permeable porosity values with the addition of 0.25% and 0.50% fibre, while there was no obvious change in the porosity values at fibre utilization rates above this value. Based on this result, it can be noted that the mortar has a more compact structure with the use of 0.75% fibre and above. However, it was observed that porosity increased at all fibre utilization rates compared to the reference mortar.

3.4. Microscopic analysis

In the scope of the study, the microscopic analysis of the reference mortar specimens without DWF fibre additives, as well as the DWF reinforced CLCM test specimens, was carried out using a stereo microscope at different magnification levels to observe the general characteristics such as the matrix, aggregate, distribution of fibres, and the formation of pores. The interfacial transition zone (ITZ) between EC, DWF and cement matrix is presented in Figure 6. The overall

appearances of the matrix structures for all CLCM test specimens are provided separately in Figure 7.

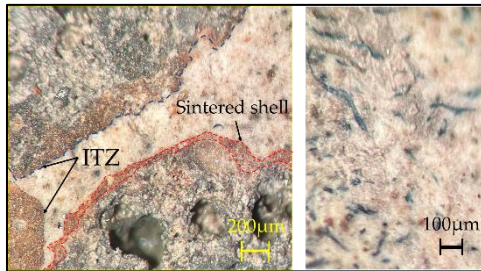


Figure 6. Interfacial transition zone of aggregate-cement matrix and DWF-cement matrix

Upon examining Figure 6, it is observed that the interface between the EC aggregate and the cement matrix appears to be compact and void-free. The cement paste demonstrates a good interlocking with the EC aggregate. Subaşı (2009) also stated that the interfacial transition zone between the cement paste and ECA (expanded clay aggregate) exhibits a strong bond. It can be anticipated that this interlocking would have a positive effect on enhancing the compressive strength. Similarly, it has been determined that the DWFs exhibit good compatibility with the cement paste. The fibre-cement interface is observed to be dense and also void-free.

Upon examining Figure 7, it is observed that the reference mortar without DWF addition exhibits a higher presence of pores in its matrix structure; however, these pores have smaller diameters compared to the test specimens. With the addition of DWF, although there is a relatively decrease in the number of

pores, it is observed that the pore sizes have increased. As observed in Figure 5, Figure 6 also demonstrates the dense interface between the aggregate-cement and DWF-cement. However, especially in Figure 7(f), it can be seen that as the amount of fibre addition increases, the fibres tend to agglomerate in certain areas. The dense interface between the fibre-cement transition zone indicates that the decrease in mortar density is not due to gaps in the fibre-cement interface caused by the fibres-cement relation, but rather the result of insufficient compaction of the mortar due to decreased workability, leading to voids in the matrix structure.

3.5. Mechanical properties

Figure 8 illustrates the relationship between the flexural tensile strength of the composite mortars being studied and the level of DWF addition.

From Figure 8, it is evident that with an increase in the DWF addition level, the flexural tensile strength values of CLCMs also increase at 7 and 28 days of curing. The specimens used in the flexural strength test, which were subsequently subjected to the compressive strength test, are shown in Figure 9. When considering the duration of curing, it was noted that the flexural tensile strength of the specimens exhibited a notable increase with a prolonged water curing period. The flexural tensile strength of the reference mix (DWF0) was measured at 2.15 MPa and 2.53 MPa after 7 and 28 days of curing, respectively.

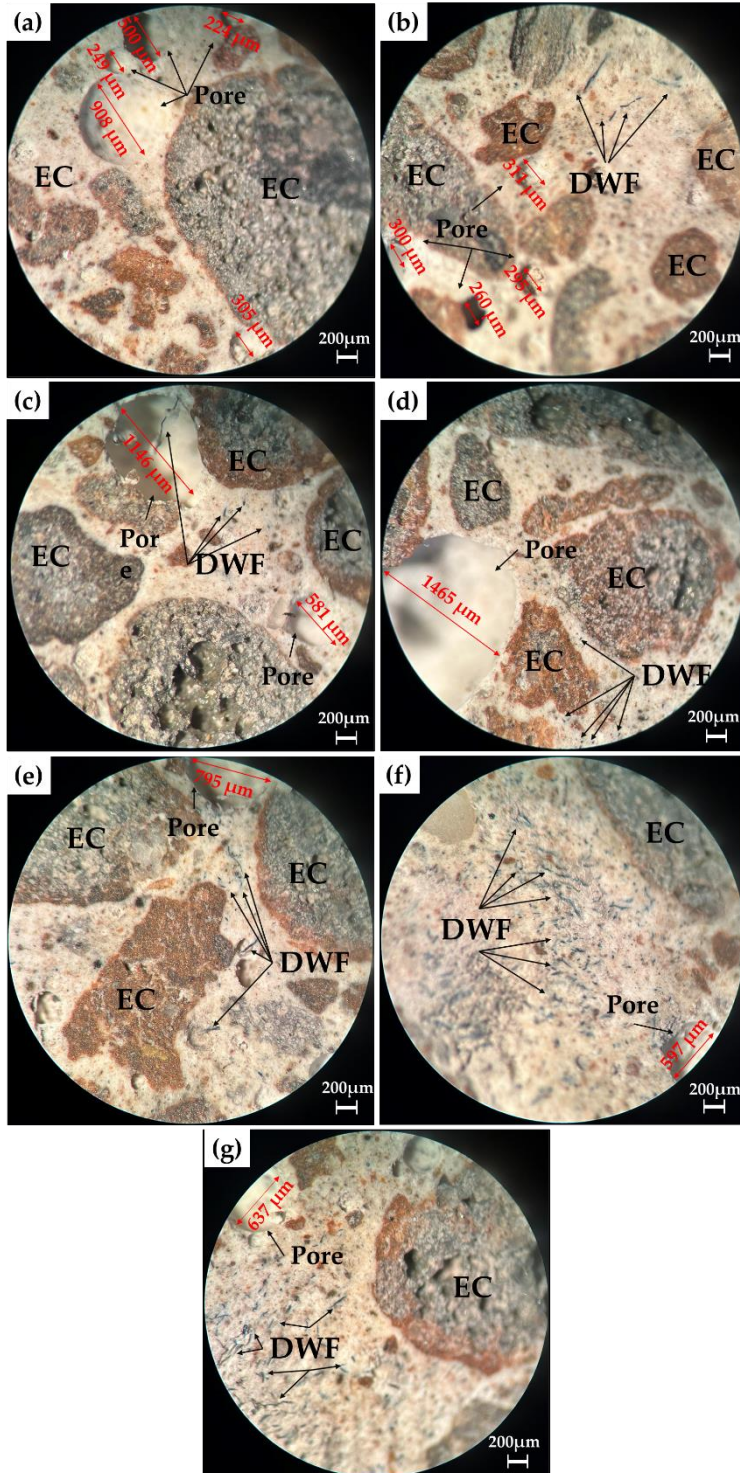


Figure 7. Cross-section and photomicrographs of CLCMs: (a) DWF0, (b) DWF025, (c) DWF050, (d) DWF075, (e) DWF100, (f) DWF125, (g) DWF150.

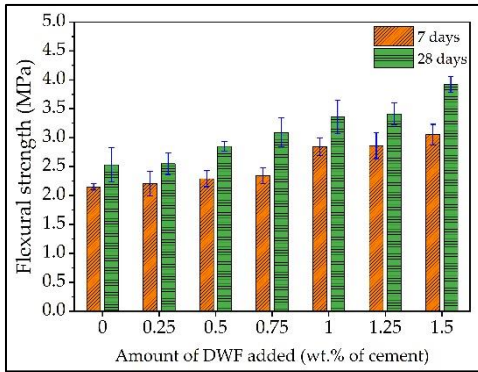


Figure 8. Flexural strength development of CLCMs at different DWF addition levels.

When the DWF usage rate was 0.25%, 0.50%, 0.75%, 1.00%, 1.25%, and 1.50% by weight of cement, the flexural strength of the test specimens increased by 2.79%, 6.51%, 8.84%, 32.09%, 33.02%, and 41.86%, respectively, compared to the reference mix after being subjected to a 7-day curing period. A similar trend was observed in the composite mortars subjected to a 28-day curing period, with the flexural strength values of these test specimens increasing by 0.79%, 12.65%, 22.13%, 32.81%, 34.78%, and 54.94%, respectively, compared to the reference mix. Each proportion of DWF used in this study contributes to an increase in flexural tensile strength. Furthermore, the highest increase in flexural strength (almost 55%) was exhibited by the series with the highest usage rate of DWF, which is the DWF150 mixture containing 1.50% DWF by weight of cement. Kalkan and Gündüz (2022) observed an improvement in flexural strength with the use of short textile waste fibres in lightweight mortar up to 2% by total weight of the mixture. Similarly, Kalkan and Gündüz (2016) observed an

improvement in flexural strength by utilizing waste denim fibres in composite mortars with pumice and expanded perlite aggregates. The enhancement in flexural tensile strength resulting from the inclusion of DWF can be attributed to the high aspect ratio of the fibres. Additionally, this increase in strength can be attributed to the formation of a fibre/matrix structure, which provides additional load-bearing capacity and protects the structure from micro-cracking (Banthia & Sheng, 1996). In fact, as observed in Figure 6, there is a strong compatibility between the cement matrix and waste denim fibres, with a dense and void-free fibre-cement interface. These positive effects have contributed to the development of flexural strength by positively influencing the load transfer between the matrix and fibres and preventing crack development at certain level.

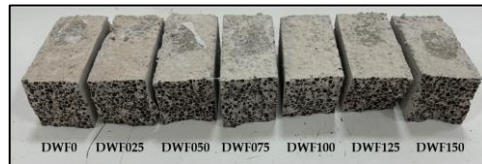


Figure 9. Test specimens.

Figure 10 illustrates the relationship between the compressive strength of the composite mortars being studied and the level of DWF addition.

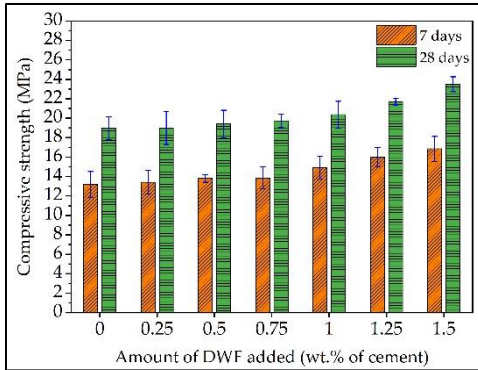


Figure 10. Compressive strength development of CLCMs at different DWF addition levels.

The compressive strength at 7 and 28 days followed a similar trend, as depicted in Figure 16. It was observed that the compressive strength increased in all DWF addition levels. The reference mix (DWF0) exhibited compressive strength values of 13.18 MPa and 18.98 MPa after 7 and 28 days of curing, respectively. Similar to the findings of the flexural tensile strength, the DWF150 mixture demonstrated the highest compressive strength values, reaching 16.85 MPa and 23.49 MPa after 7 and 28 days of curing, respectively. Furthermore, it has been observed that as the DWF addition rate increases, the compressive strength values of the test specimens also increase. Gonilho-Pereira et al. (2013) stated that despite the impact of waste fibre content on the evaluated mechanical parameters in cement-based mortars does not show a consistent trend, the use of 0.25% waste fibres (cotton and synthetic component) has improved the flexural and compressive strengths. When the literature is examined, the deterioration of compressive strengths of fibre-reinforced cementitious products is

attributed to the porous structure that arises due to increased fibre-matrix incompatibility and worsened workability along with the addition of fibres (de Azevedo et al., 2021; De Azevedo et al., 2020; dos Santos Alberton et al., 2023; Safiuddin et al., 2021). On the other hand, as shown in Figure 6, in this study, it has been determined that the fibre-cement matrix interface is highly dense and void-free, and the fibre-matrix compatibility is also found to be quite high. Thus, with the presence of fibres, each fibre inhibits the formation of microcracks, leading to an increase in compressive strength (Fediuk et al., 2017; Rodier et al., 2020).

The load-displacement curves depicting denim waste fibre reinforced composites are presented in Figure 11. These curves were examined to determine the load and displacement values during the compressive strength test. The experiments were terminated when the load-bearing capacity decreased by 50% after reaching the maximum load for each series. According to the Figure 11, it is worth noting that in DWF-cement composites, the increase in fibre content resulted in not only an increase in the load carrying capacity but also significant enhancements in deformability or toughness. As the DWF content increased, a clear and distinct observation was made that both peak load carrying capacity and peak deformation values also increased. The deformation value of the reference composite mortar, which did not contain fibres, was approximately 0.175 mm, while the deformation values of the test specimens with added DWF increased

by approximately 49% to reach approximately 0.26 mm at the end of the test. Thus, it was clearly observed that the addition of DWF increased the ductility and toughness. The significant improvement observed in DWF075, DWF100, and DWF150 can be attributed to the redistribution of load at the interface between fibres and the matrix, leading to a delay in crack propagation within the cement matrix. Therefore, fibres play a crucial role in inhibiting crack propagation within the matrix, thereby preventing the brittle failure typically observed in fibreless cement matrices. Similar findings have been reported by Martins et al. (2015), Zaid et al. (2021) and Sellami et al. (2022) in their investigations on soil-cement-sisal fibre composites, reinforced lime composites and diss fibre reinforced mortar, respectively.

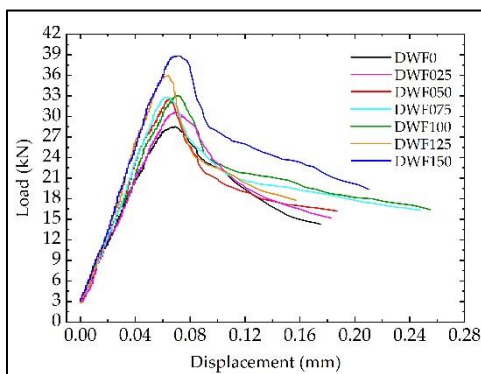


Figure 11. Load-displacement plot for DWF reinforced CLCMs.

4. Conclusion

This experimental study conducted a thorough investigation into the impact of incorporating denim waste fibers in cementitious lightweight composite mortars. Based on the test results, a

decline was observed in the consistency and workability of cementitious mortars when denim waste fibers were added. This reduction of workability was due to the increased interlocking of the denim waste fibres and decreased free water because of water absorption of denim waste fibres. Capillary water absorption and permeable porosity of the cementitious lightweight composite mortars slightly increased due to both water absorption of the fibres and formation of pores because of worsen workability. Accordingly, fresh and hardened unit weight decreased in a certain level. The flexural and compressive strength increased for all DWF addition levels. Therefore, the optimum DWF usage rate for this study can be considered as 1.5% of the cement weight, which is the highest utilization rate. At 1.5% usage rate, CLCM's flexural strength increased by 54.94% and compressive strength increased by 23.76% compared to the reference specimen. As expected, the contribution of the fibres to the flexural strength was found to be higher than the compressive strength. According to the load-deformation analysis of CLCM specimens, it has been shown that denim waste fibres both increase the load carrying capacity and allow more deformation of the mortars. Thus, it was observed that the ductility and toughness of the mortars improved significantly.

It was determined before the start of the study that denim waste fibres consisted of high percentage of cotton fibres and lower percentage of synthetic fibres. As a suggestion for future studies, since it is

unlikely that denim waste fibres will have a standard cotton-synthetic blend ratio, these blend ratios can be expressed at certain intervals and the physical and mechanical property evaluations of cement-based products can also be expressed at certain intervals.

In lightweight mortars, since the aggregates used are lightweight aggregates, their strength is relatively lower. For this reason, reinforcing the cement matrix with short fibres is the easiest and most preferred method for mechanically reinforcing lightweight mortars.

The results obtained from this study showed that denim waste fibres can play a significant role in the reinforcement of cementitious lightweight composite mortars.

5. References

- Abbas, W. A., Gorgis, I. N., & Hussein, M. J. (2019). Performance of Cement Mortar Composites Reinforced with Polyvinyl Alcohol Fibres. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(2), 22045. doi: 10.1088/1757-899X/518/2/022045
- Aghaee, K., & Foroughi, M. (2013). Construction of lightweight concrete partitions using textile waste. In *ICSDEC 2012: Developing the Frontier of Sustainable Design, Engineering, and Construction* (pp. 793–800).
- Aspiras, F. F., & Manalo, J. R. I. (1995). Utilization of textile waste cuttings as building material. *Journal of Materials Processing Technology*, 48(1–4), 379–384. doi: 10.1016/0924-0136(94)01672-N
- ASTM. (2013). ASTM C642-13: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM. (2014). ASTM C349-14: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM. (2014). ASTM C348-14: Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM. (2013). C1437-13: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, PA, USA.
- Banthia, N., & Sheng, J. (1996). Fracture toughness of micro-fibre reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 251–269. doi: 10.1016/0958-9465(95)00030-5
- Benaniba, S., Driss, Z., Djendel, M., Raouache, E., & Boubaaya, R. (2020). Thermo-mechanical characterization of a bio-composite mortar reinforced with date palm fibre. *Journal of Engineered Fibres and Fabrics*, 15, 1558925020948234. doi: 10.1177/1558925020948234
- Binici, H., & Aksogan, O. (2015). Engineering properties of insulation material made with cotton waste and fly ash. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17, 157–162. doi: 10.1007/s10163-013-0218-6
- Briga-Sa, A., Nascimento, D., Teixeira, N., Pinto, J., Caldeira, F., Varum, H., & Paiva, A. (2013). Textile waste as an alternative thermal insulation building material solution. *Construction and Building Materials*, 38, 155–160. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.08.037
- Calis, G., Akpınar, M. E., Yildizel, S. A., & Çöğürçü, M. T. (2021). Evaluation and optimization Of PVA reinforced cementitious composite containing metakaolin and fly ash. *Revista Romana de Materiale*, 51(1), 53–66.
- Coppola, B., Courard, L., Michel, F., Incarnato, L., Scarfato, P., & Di Maio, L. (2018). Hygro-thermal and durability properties of a lightweight mortar made

- with foamed plastic waste aggregates. *Construction and Building Materials*, 170, 200–206. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.083
- Çankal, D., Kalkan, Ş. O., Öztürk, A. U., & Gündüz, L. (2023). An Investigation of the Usage of Glass Wastes in Cement Mortars Using Full Factorial Design. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 25(74), 405–416. doi: 10.21205/deufmd.2023257412
- Çomak, B., Bideci, A., & Bideci, Ö. S. (2018). Effects of hemp fibres on characteristics of cement based mortar. *Construction and Building Materials*, 169, 794–799. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.029
- De Azevedo, A. R. G., Klyuev, S., Marvila, M. T., Vatin, N., Alfimova, N., de Lima, T. E. S., Fediuk, R., & Olisov, A. (2020). Investigation of the potential use of curauá fibre for reinforcing mortars. *Fibres*, 8(11), 69. doi: 10.3390/fib8110069
- de Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Antunes, M. L. P., Rangel, E. C., & Fediuk, R. (2021). Technological perspective for use the natural pineapple fibre in mortar to repair structures. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 5131–5145. doi: 10.1007/s12649-021-01374-5
- de França, M. S., Cardoso, F. A., & Pileggi, R. G. (2016). Influence of the addition sequence of PVA-fibres and water on mixing and rheological behavior of mortars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9, 226–243. doi: 10.1590/S1983-41952016000200005
- dos Santos Alberton, K., do Nascimento, C. B., Cavalheiro, R. B., de Oliveira, V. C., Gonzaga, L. B. T., & Pierozan, R. C. (2023). Properties of coconut fibre-reinforced mortars for sustainable solutions. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(1), 44. doi: 10.1007/s41024-023-00288-0
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A. (2013). Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar–Experimental and numerical study. *Composite Structures*, 97, 40–55. doi: 10.1016/j.compstruct.2012.09.053
- Faghiehmaleki, H., Nejati, F., & Masoumi, H. (2017). In vitro evaluation of additives allowed for high strength concrete (HSC) and foam concrete. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(3), 177–183. doi: 10.5505/pajes.2016.82584
- Fediuk, R. S., Smoliakov, A. K., Timokhin, R. A., Batarshin, V. O., & Yevdokimova, Y. G. (2017). Using thermal power plants waste for building materials. *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*, 87(9), 092010. doi: 10.1088/1755-1315/87/9/092010
- Garmendia, L., Larrinaga, P., García, D., & Marcos, I. (2014). Textile-reinforced mortar as strengthening material for masonry arches. *International Journal of Architectural Heritage*, 8(5), 627–648. doi: 10.1080/15583058.2012.704480
- Glenn, G. M., Klamczynski, A. K., Chiou, B.-S., Wood, D., Orts, W. J., & Imam, S. H. (2004). Lightweight concrete containing an alkaline resistant starch-based aquagel. *Journal of Polymers and the Environment*, 12(3), 189–196. doi: 10.1023/B:JOOE.0000038551.78645.3b
- Grabois, T. M., Cordeiro, G. C., & Toledo Filho, R. D. (2016). Fresh and hardened-state properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with steel fibres. *Construction and Building Materials*, 104, 284–292. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.060
- Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., & Özgüven, A. (2020). Genleşmiş kil agregaların teknik özelliklerinin karşılaştırılması üzerine bir çalışma: ankara kalecik bölgesi örneği. *Hazır Beton*, Ocak-Şubat-2020, 65-72.
- Huang, J., Wang, Z., Li, D., & Li, G. (2022). Effect of nano-sio2/pva fibre on sulfate resistance of cement mortar containing high-volume fly ash. *Nanomaterials*, 12(3), 323. doi: 10.3390/nano12030323
- Ji, Y., Zou, Y., Wan, X., & Li, W. (2022). Mechanical investigation on fibre-doped cementitious materials. *Polymers*, 14(9),

1663. doi: 10.3390/polym14091663
- Kalkan, S. O., & Gündüz, L. (2016). A study on the usage of denim waste as reinforcement element in composite mortars on exterior building application. *12 International Congress on Advances in Civil Engineering*. İstanbul, Türkiye.
- Kalkan, Ş. O., & Gündüz, L. (2022). Structural strength properties of waste textile fibre reinforced cementitious lightweight composite mortars. *Sakarya University Journal of Science*, 26(6), 1180–1195. doi: 10.16984/saufenbilder.1107127
- Kalkan, Ş. O., Yavaş, A., Güler, S., Kayalar, M. T., Sütçü, M., & Gündüz, L. (2022). An experimental approach to a cementitious lightweight composite mortar using synthetic wollastonite. *Construction and Building Materials*, 341, 127911. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127911
- Kazım, T., & Ceren, K. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(6), 671–678. doi: 10.5505/pajes.2016.17047
- Larrinaga, P., Chastre, C., Biscaia, H. C., & San-José, J. T. (2014). Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under uniaxial tensile stress. *Materials & Design*, 55, 66–74. doi: Experimental and numerical modeling of basalt textile reinforced mortar behavior under
- Lertwattanaruk, P., & Suntijitto, A. (2015). Properties of natural fibre cement materials containing coconut coir and oil palm fibres for residential building applications. *Construction and Building Materials*, 94, 664–669. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154
- Marikunte, S., Aldea, C., & Shah, S. P. (1997). Durability of glass fibre reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. *Advanced Cement Based Materials*, 5(3–4), 100–108. doi: 10.1016/S1065-7355(97)00003-5
- Martins, A. P. S., Silva, F. A., & Toledo Filho, R. D. (2015). Mechanical behavior of self-compacting soil-cement-sisal fibre composites. *Key Engineering Materials*, 634, 421–432. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.634.421
- Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibres resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53–63. doi: 10.1016/j.cscm.2016.07.001
- Murathan, A., Murathan, A., & Karadavut, S. (2014). Yüksek yoğunluklu polipropilen tekstil atıklarının kompozit malzeme üretiminde kullanılabilirliği. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(1), 9–14. doi: 10.17341/gummfd.95195
- Okasha, M. A. T. A., Abdel Razeq, M., & El-Esnawi, H. (2020). Strengthening of existing RC buildings by using autoclaved aerated concrete infill wall. *HBRC Journal*, 16(1), 143–155. doi: 10.1080/16874048.2020.1789392
- Özcan, Ş. P., & Gündüz, L. (2021). Pamuk-sentetik bileşenli lif katkısı ve genleştirme ajanı miktarlarının otoklavsız gazbetonun teknik özelliklerine etkileri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(6), 1404–1423. doi: 10.35414/akufemubid.933359
- Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Papathanasiou, M., & Karlos, K. (2008). Textile reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: out-of-plane cyclic loading. *Materials and Structures*, 41, 143–157. doi: 10.1617/s11527-007-9226-0
- Pinto, J., Peixoto, A., Vieira, J., Fernandes, L., Morais, J., Cunha, V. M. C. F., & Varum, H. (2013). Render reinforced with textile threads. *Construction and Building Materials*, 40, 26–32. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.099
- Pogorelov, S. N., & Semenyak, G. S. (2016). Frost resistance of the steel fibre reinforced concrete containing active mineral additives. *Procedia Engineering*, 150, 1491–1495. doi:

- 10.1016/j.proeng.2016.07.088
- Reis, J. M. L. dos. (2009). Effect of textile waste on the mechanical properties of polymer concrete. *Materials Research*, 12, 63–67. doi: 10.1590/S1516-14392009000100007
- Rodier, L., da Costa Correia, V., & Junior, H. S. (2020). Elaboration of eco-efficient vegetable fibres reinforced cement-based composites using glass powder residue. *Cement and Concrete Composites*, 110, 103599. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103599
- Ryu, C., Phan, A. N., Sharifi, V. N., & Swithenbank, J. (2007). Co-combustion of textile residues with cardboard and waste wood in a packed bed. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 32(2), 450–458. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2007.05.008
- Safiuddin, M., Abdel-Sayed, G., & Hearn, N. (2021). Absorption and strength properties of short carbon fibre reinforced mortar composite. *Buildings*, 11(7), 300. doi: 10.3390/buildings11070300
- Savastano Jr, H., Turner, A., Mercer, C., & Soboyejo, W. O. (2006). Mechanical behavior of cement-based materials reinforced with sisal fibres. *Journal of Materials Science*, 41(21), 6938–6948. doi: 10.1007/s10853-006-0218-1
- Savastano Jr, H., Warden, P. G., & Coutts, R. S. P. (2003). Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 311–319. doi: 10.1016/S0958-9465(02)00055-0
- Sellami, A., Bouayad, D., Benazzouk, A., Amziane, S., & Merzoud, M. (2022). Study of toughness and thermal properties of bio-composite reinforced with diss fibres for use as an insulating material. *Energy and Buildings*, 276, 112527. doi: Study of toughness and thermal properties of bio-composite reinforced with diss fibres for use as an insulating material
- Shah, S. P., Ludirdja, D., Daniel, J. I., & Mobasher, B. (1988). Toughness-durability of glass fibre reinforced concrete systems. *ACI Materials Journal*, 85(5), 352–360.
- Shannag, M. J. (2011). Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(2), 658–662. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.025
- Shoukry, H., Kotkata, M. F., Abo-EL-Enein, S. A., Morsy, M. S., & Shebl, S. S. (2016). Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin. *Construction and Building Materials*, 112, 276–283. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.209
- Subaşı, S. (2009). The effects of using fly ash on high strength lightweight concrete produced with expanded clay aggregate. *Scientific Research and Essays*, 4(4), 275–288.
- Triantafillou, T. C., & Papanicolaou, C. G. (2006). Shear strengthening of reinforced concrete members with textile reinforced mortar (TRM) jackets. *Materials and Structures*, 39, 93–103. doi: 10.1007/s11527-005-9034-3
- TSE. (2014). TS EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar. Ankara, Türkiye.
- TSE. (2017). TS EN 998-1: Specification for mortar for masonry — Part 1: Rendering and plastering mortar. Ankara, Türkiye.
- TSE. (2000). TS EN 1015-6: Methods of test for mortar for masonry - Part 7: Determination of air content of fresh mortar. Ankara, Türkiye.
- TSE. (2001). TS EN 1015-10: Methods of test for mortar for masonry- Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. Ankara, Türkiye.
- Ucar, M., & Wang, Y. (2011). Utilization of recycled post consumer carpet waste fibres as reinforcement in lightweight cementitious composites. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 23(4), 242–248. doi:

- 10.1108/09556221111136502
- Wang, Y., Zureick, A.-H., Cho, B.-S., & Scott, D. E. (1994). Properties of fibre reinforced concrete using recycled fibres from carpet industrial waste. *Journal of Materials Science*, 29, 4191–4199. doi: 10.1007/BF00414198
- Yaprak, H., Memis, S., Kaplan, G., Yilmazoglu, M. U., & Ozkan, I. G. M. (2018). Effects on compressive strenght of accelerated curing methods in alkali activated mortars. *International Journal of Scientific and Technological Research*, 4(5), 70-78.
- Yin, S., Tuladhar, R., Riella, J., Chung, D., Collister, T., Combe, M., & Sivakugan, N. (2016). Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 114, 134–141. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.162
- Zaid, I., Merzoud, M., & Benazzouk, A. (2021). Morphological and mineralogical analysis of treated Diss fibres and their effect on physico-mechanical characteristics of Diss concrete based on alternative binder. *Construction and Building Materials*, 307, 124936. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124936
- Zhang, H., Liu, Y., Sun, H., & Wu, S. (2016). Transient dynamic behavior of polypropylene fibre reinforced mortar under compressive impact loading. *Construction and Building Materials*, 111, 30–42. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.049
- Zhang, P., Li, Q., Wang, J., Shi, Y., & Ling, Y. (2019). Effect of PVA fibre on durability of cementitious composite containing nano-SiO₂. *Nanotechnology Reviews*, 8(1), 116–127. doi: 10.1515/ntrev-2019-0011

Araştırma Makalesi / Research Article

**Reliability Prediction of SMRF Based on the
Combination of Neural Network And Incremental
Dynamic Analysis**

*¹Fooad Karimi Ghaleh JOUGH, ²Borhan GHASEMZADEH

¹Final International University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Via Mersin 10, AS 128 Kyrenia, North Cyprus, Turkey, fooad.karimi@final.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0003-0697-516X>

²Final International University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Via Mersin 10, Kyrenia, North Cyprus, Turkey, borhan.ghasemzadeh@final.edu.tr, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-7960-3503>

Geliş / Received: 21.06.2023;

Kabul / Accepted: 28.12.2023

Abstract

This paper conducts a comprehensive vulnerability analysis of steel structures, taking into account the stringent HAZUS restrictions. The demand distribution for each mode of failure takes the form of a normal logarithm after extracting the fragility chart. Thus, the two parameters of mean and standard deviation can be used to construct the fragility chart. A total of five modes of failure were used in this paper. Therefore, 10 unknown values were used to derive the fragility curves. Afterward, Incremental Dynamic Analysis (IDA) was used under 40 natural records to obtain the fragility curve. To save time in the analysis and prediction of structural responses, a neural network method was used to select records more efficiently. It was observed that this method is better than the analytical method in considering random uncertainty in steel structures when several acceleration values are used.

Keywords: MLP algorithm, Monte Carlo method, Aleatory uncertainty, Fragility curve, IDA.

*¹Sorumlu yazar / Corresponding author

Bu makaleye atıf yapmak için

Jough, F. K. G., & Ghasemzadeh, B. (2023). Reliability Prediction of SMRF Based on the Combination of Neural Network And Incremental Dynamic Analysis. *Journal of Innovations in Civil Engineering and Technology (JICIVILTECH)*, 5(2), 91-105.

SMRF'nin Sinir Ağı ve Artımlı Dinamik Analizin Birleşimine Dayanan Güvenilirlik Tahmini

Öz

Bu makale, sıkı HAZUS kısıtlamalarını dikkate alarak çelik yapıların kapsamlı bir güvenlik açığı analizini yürütmektedir. Her başarısızlık türü için talep dağılımı, kırılma tablosunun çıkarılmasından sonra normal bir logaritma şeklini alır. Böylece, kırılma tablosunu oluşturmak için ortalama ve standart sapma olmak üzere iki parametre kullanılabilir. Bu yazıda toplam beş başarısızlık modu kullanıldı. Bu nedenle kırılma eğrilerini türetmek için 10 bilinmeyen değer kullanılmıştır. Daha sonra kırılma eğrisini elde etmek için 40 doğal kayıt altında Artımlı Dinamik Analiz (IDA) kullanılmıştır. Yapısal yanıtların analizinde ve tahmininde zaman kazanmak amacıyla, kayıtları daha verimli bir şekilde seçmek için bir sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Çeşitli ivme değerleri kullanıldığında çelik yapılarda rastgele belirsizliğin dikkate alınmasında bu yöntemin analitik yöntemle göre daha iyi olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: MLP algoritması, Monte Carlo yöntemi, Rastgele belirsizlik, Kırılma eğrisi, IDA.

1. Introduction

Structural collapse is a major cause of economic losses and human casualties in earthquakes (Wyllie et al., 1989). Furthermore, keeping structures away from this limit state through earthquakes has been a key factor in performance and force-based evaluation, including innovative performance-based seismic evaluation procedures (Foutch, 2000; Celarec & Dolšek, 2013). Using more accurate prediction methods for evaluating the collapse capacity of structures, considering different sources of uncertainties, leads to more reliable seismic evaluation of structures, earthquake risk analysis, and earthquake consequence management (Karimi ghale jough et al., 2021).

To reduce the computational effort in the program, the Monte Carlo method for surface response was adopted (Jough & Şensoy, 2016). The response surface method used in Monte Carlo simulations has a certain limitation. It assumes a fixed functional form when calculating the standard deviation and mean of the collapse fragility curve. This means that the higher the order of the applied function, the more data is needed to accurately adjust the factors.

Artificial neural networks can be used to approximate any type of function. Li (1996) stated that the radial basis function of an Artificial Neural Network (ANN) has the remarkable ability to promptly estimate all available derivatives. It is noteworthy to mention that all these assumptions on each

function are relatively mild, which proves the fact of multivariate functions. Only a few studies were used the ANN algorithm to create fragility curves.

Lagaros and Fragiadakis (2007), as well as Papadrakakis et al. (2008) studied the chance of surpassing the limit state in concrete dams. In addition, they thoroughly analyzed the susceptibility of these dams and took into account the inclusion of randomized material properties within the fragility curves. In previous studies, randomness was considered the main source of uncertainty. In the present study, a total of five modes of failure were used in nonlinear analysis. Therefore, 10 unknown values were used to derive the fragility curves. The fragility curve was then obtained by applying Incremental Dynamic Analysis (IDA) to a set of 40 natural records. Given that such analyses are time-consuming, a neural-network-based method was used to reduce the time of analysis for the prediction of structural responses. It was observed that this method is better than the analytical method at considering random uncertainty in steel structures when several acceleration values are used.

2. Fragility Curves in Steel Moment Building

The intensity measure (IM) of strong ground motion is defined as an IM-based collapse limit state in which the excited structure undergoes a damage limit state. On the other hand, the damage limit state is defined as the measure of the intensity of HAZUS

restrictions (Kircher et al., 2006). As a result, the collapse fragility curve formulation can be written using

following Eq. (1). Figure 1 depicts the methodology considered in this study.

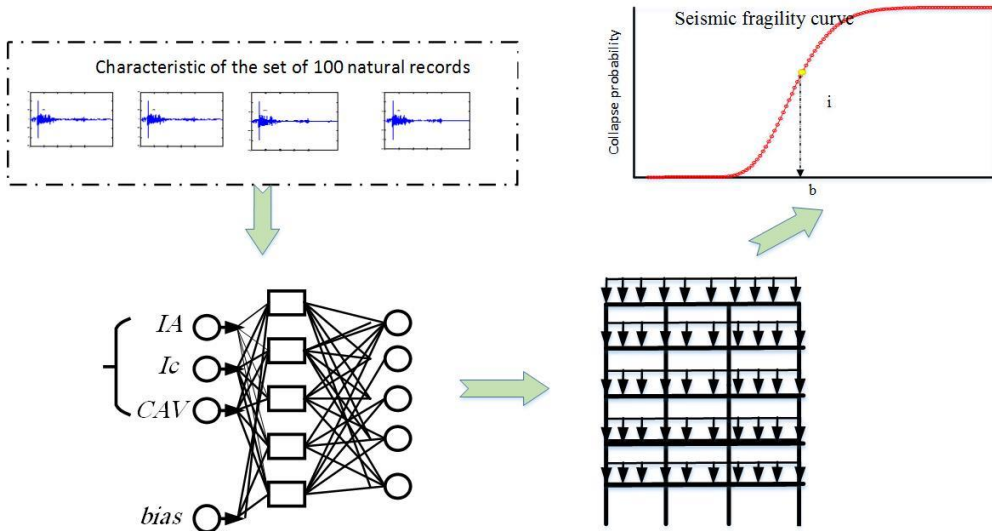


Figure 1. Proposed approach flowchart for considering aleatory uncertainty.

$$P(\text{Collapse} | IM = im_i) = P(im_i > IM_{collapse}) = F_{IM_{collapse}}(im_i) \quad (1)$$

The best probability distribution for representing the fragility curve's collapse of any structure is a log-normal probability distribution function (Karimi

& Şensoy, 2020). As a result, the log-normal probability distribution is going to apply as the cumulative probability distribution of Eq. (1), results in Eq. (2).

$$P(\text{Collapse} | IM = im_i) = \left(\frac{LN(im_i) - IN(\mu_k)}{\beta_k} \right) \quad (2)$$

The Gaussian distribution function, represented by Eq. (2), is the dispersion and mean of the collapse probability function.

3. Artificial Neural Network (ANN)

The procedure for the proposed method is defined in Figure 2. The input layer of the network consists of modeling

parameters for structure. The output layer consists of the standard deviation and mean of the collapse fragility curves. The hidden layer consists of a number of artificial neurons (Karimi Ghaleh Jough & Beheshti Aval, 2018). The number of neurons in the hidden layer is referred to as the hidden layer size. Input weights, bias factors, and transfer functions define the connections between the

components of the input layer and the artificial neurons in the hidden layer. If I is an R -length input, Vector, S is hidden layer size, transfer functions and bias

vectors of neurons in hidden layer are f and b , then output of hidden layer will be presented as Eq. (3).



Figure 2. Architecture of proposed method.

$$a = f(W_1 I + b_1) \quad (3)$$

Output layer and w_1 is an input weight matrix of hidden layer. Vector of output is calculated by Eq. (4), in which W_2 and b_2 are weight matrix and bias vector of output layer neuron.

$$O = g(W_2 I + b_2) \quad (4)$$

To minimize prediction error, training data is used to evaluate weight matrices and bias vectors. The aim of this study is to evaluate training data using a limited simulation of modeling parameters. Collapse fragility analysis of the structure is performed using incremental dynamic analysis. The modeling parameters of the structure are assigned as the simulated input vector. To predict the mean and standard deviation of collapse fragility curves, two distinct neural networks were trained (Karimi ghale jough & Ghasemzadeh, 2023).

In order to accurately estimate outcome variables, it is crucial to minimize errors rather than maximize them. This prevents the network from generating

inaccurate variables for outcomes that were not included in the initial data.

When training an artificial neural network (ANN), the following steps are involved: selecting shift parameters, defining the network architecture, and optimizing weight values. Typically, a portion of the reliable data is allocated for training purposes, for example, 80%.

The remaining data is then used to validate the accuracy of the neural network predictions. To reduce dispersion in estimating mean and standard deviation, the number of neurons in hidden layers needs to be determined. The number should not be maximized because it can make the network produce inaccurate results for data that was not in the validation dataset.

As a result, bias vectors and weight matrices are adjusted to achieve the lowest possible error in the estimated outcome variables. Also, the MSE value, which is an indicator of neural network error, is obtainable in Eq. (5).

$$E = \sum_m \frac{1}{2} (Y(x^m; (w, A)) - t^m)^2 \quad (5)$$

In which, a is S -length vector, and supposed to be as input to Eq. (5), the training pair (x, t) number is m , respectively, and m -th are the target data and input. Y is the neural network predicted value whose architecture is A , and weight matrix is W . The evaluation of network optimum weight, which minimizes the error of the network, is achieved by solving the minimization problem. The propagation algorithm which is a common minimization algorithm is applied in this research to update the weight by several iterations. The network weights in iteration $t+1$ are calculated by Eq. (6).

$$w^{(t+1)} = w^t + \Delta w^t \quad (6)$$

The value of Δw^t is calculated by Eq. (7), and w is the matrix's weight in iteration with t .

$$\Delta w^t = \alpha \cdot \Delta w^{t-1} + \eta \cdot d^t \quad (7)$$

in which d^t contains partial derivatives of the error function and shows weighted search directions, the corresponding size of step is α and momentum term which has been defined in $[0,1]$ is η .

The Resilient back propagation learning algorithm, summarized as Rprop (Riedmiller & Braun, 1993), is adopted in this paper. Rprop is an effective local algorithm. It uses an adaptive version of the Manhattan-learning rule, which has been proven to work well in previous studies when combined with the

sigmoid activation function (Riedmiller & Braun, 1993).

4. Records Selection

The key characteristics of amplitude intensity measures obtained from ground motion are PGA (high frequency parameter), PGV (intermediate frequency parameter), and PGD (low frequency parameter). These measures represent the maximum velocity, displacement, and effective acceleration. Amplitude IMs are used in the empirical relationship derivation applied in the probabilistic hazard approach. The variables are set based on the dependence of IMs on the magnitude of site-specific distance and ground motion. Multiple spectral sources and the amplitude distribution of a record amongst multiple frequencies have been used to explain the frequency content of IMs.

The main properties of ground motion are Arias intensity (I_A), which measures amplitude, characteristic intensity (I_c), which indicates frequency content, and cumulative absolute velocity (CAV), which estimates the potential for building damage based on the record duration.

Arias intensity (I_A) is expressed as the time-integral of the square of the time series of ground motion and is defined by:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)^2] dt \quad (8)$$

Cumulative Absolute Velocity (CAV) is expressed as the time-integral of the square of the time series of ground motion and is defined by:

$$CAV = \int_0^{T_d} |a(t)| dt \quad (9)$$

in which $|a(t)|$ is the absolute value of acceleration in t . Characteristic intensity (IC) is given as:

$$I_C = \alpha_{rms}^{1.5} T_d^{0.5},$$

$$\alpha_{rms} = \frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} [a(t)^2] dt \quad (10)$$

where α_{rms} is given by root mean square of acceleration.

5. Research Methodology

The primary goal of incremental dynamic analysis (IDA) is to determine a curve by the intensity measure (IM) function that is defined by the maximum drift and the spectral acceleration ratio of the building defined by an EDP. The purpose of the proposed methodology is to apply an artificial neural network (ANN) with the intention of estimating the EDP, which is represented in terms of the first mode pseudo acceleration ($S_a(T1, 5\%)$) for a given value of the limit state, which is also presented by obtaining the maximum drift ratio, which is the EDP employed in this manuscript. Therefore, the ANN could be capable of correctly estimate $S_a(T1, 5\%)$ from a triad specified properties of the ground motion record that considered I_A , I_C and CAV in this paper.

The IM must be set accordingly based on the seismic demand in consideration for a given intensity; therefore, it could be applied in defining the properties of the record as input to the ANN. In this study, a proposed method of seismic response is applied by a properly set ANN in the SMRF (Steel Moment Resistant Frame) of structural fragility analysis.

In order to describe the input of the ANN at the beginning of the proposed method, 40 vectors of intensity measure are selected randomly, while the EDP in the Hazzus (FEMA, 2003) limit states (slight damage, moderate damage, extensive damage, complete damage, and collapse damage) are considered over the 100 sets of records, according to Jough & Şensoy (2016). The variation of these 100 records for the characteristic intensity measure is shown in Figure 3. The 40 realizations are assessed by means of the IDA analysis with reference to their structural performance. The training input from ANN is applied in the next step of the proposed methodology. This step includes the selection of a suitable ANN set and the validation of the ANN. Therefore, the training and testing procedures are done successfully, and the testing set is then capable of estimating whether the new design vectors are suitable in terms of structural constraint checks without computing any computational IDA analyses. Finally, it can be decided how many records are suitable for the prediction of the fragility curve.

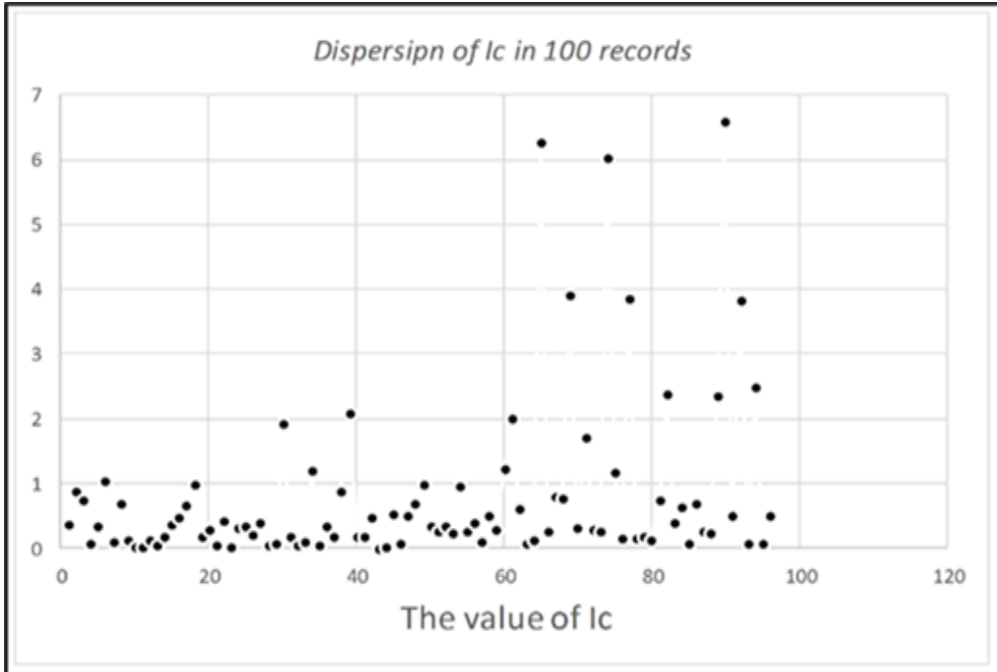


Figure 3. Scatter plot of characteristic intensity for 100 selected records.

6. Structural Models and Numerical Simulation

To evaluate the performance in curves of collapse fragility, the proposed method is applied and illustrated in a 5-storey

moment resisting steel frame in Figure 4. The designed member sections are shown in Table 1. The plan and elevation of the assumed structure is symmetric, and that allows two dimensional analyses of structure.

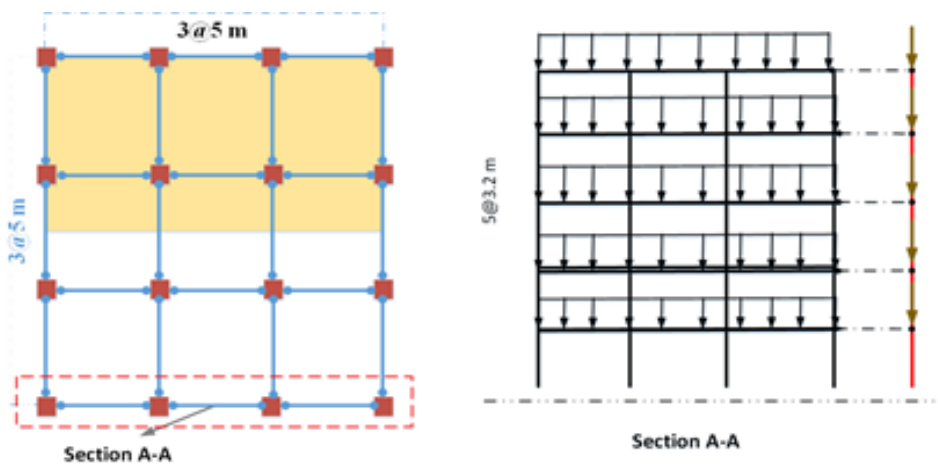


Figure 4. The analytical model of five-story, three-bay moment-resisting frame

Table 1. Considered sections of designed structure

story	C1	C2	B1	B2
1	BOX 180x180x2.0	BOX 300x300x2.0	IPE 400	IPE 400
2	BOX 180x180x2.0	BOX 300x300x2.0	IPE 400	IPE 400
3	BOX 180x180x2.0	BOX 300x300x2.0	IPE 400	IPE 400
4	BOX 160x160x1.6	BOX 200x200x1.6	IPE 330	IPE 330
5	BOX 160x160x1.6	BOX 200x200x1.6	IPE 330	IPE 330

Spectral acceleration at the first-mode period of the structural system ($S_a(T_1)$) is considered an intensity measure. This IM is applied in various research studies (Baker & Allin, 2005) and is shown to fulfill sufficiency and efficiency criteria in the prediction of structural damage, which is the main goal of this study. Maximum Inter-Storey Drift Ratio (IDR) is selected as an engineering demand parameter since it represents the global behavior of the building, which has a good correlation with global collapse. The construction of these buildings is supposed to be on soil type B. The plan of the building is shown in Figure 4. A rigid diaphragm is supposed to be based on the roof system in most buildings.

Gravity loads are considered and assumed for the usual structures in Iran. There are a total of 7 modification factors (i.e., R), and each one is used by Iranian Seismic Code 2800 (2007). The finite element program OpenSees has been used to be able to apply analysis and modeling to the building samples. IDA analysis and nonlinear statics are done for a 2D external sample frame. In order to be able to model the steel structure element, a bilinear kinematic stress-strain curve is used to model the steel behavior by accessing the library of

OpenSees (McKenna, 2011). At the intersection point of the first and second tangents (i.e., tangent moduli) of this material, a transition curve has been provided. The main goal of this curve is to avoid any unusual change in local stiffness matrices because these matrices are used to ensure an effortless and smooth transition between plastic and elastic regions formed by elements. On the other hand, to be able to model the cross sections for beams and columns with the highest accuracy rate, the displacement-based design of beams and columns in accordance with fiber sections needs to be applied. It is noteworthy to mention that displacement-based elements are more stable than force-based ones. Furthermore, the leaning column is going to provide the P-delta effects. Also, all connections that have been faced with moment-resisting are going to be evaluated according to their behaviors based on the modified model of Ibarra-Krawinkler and considered as rotational springs. As stated in Figure 5, the model of the M2-WO panel zone has been selected due to the well-representation of columns, beams, and panel zones yielding (2007). The static pushover and time history approach is done on the sample model to assess the

lateral strength and drift ratio of the sample structure. The capacity curve and drift ratio for the sample structure are shown in Figures 6 and 7.

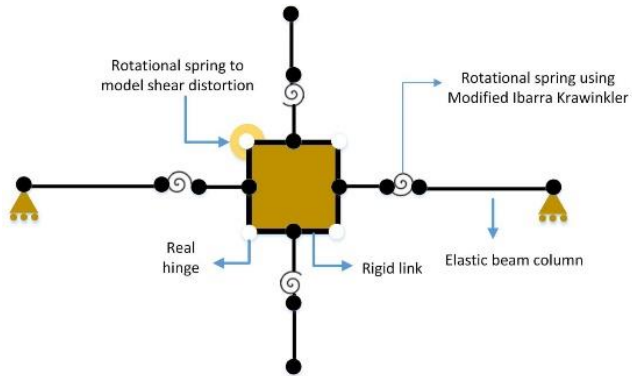


Figure 5. Detail of OpenSees model

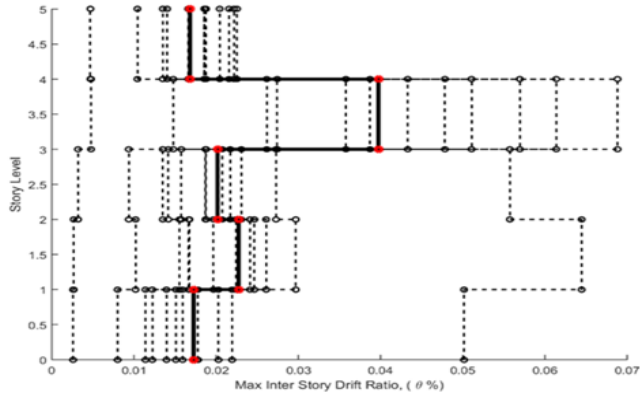


Figure 6. Drift ratio based on the nonlinear time history analysis

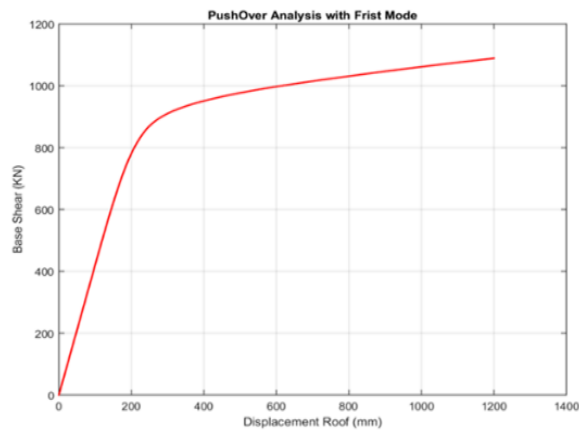


Figure 7. Drift ratio based on the nonlinear time history analysis

7. Using Artificial Neural Network (ANN) to Predict Seismic Demand

The key purpose of this paper is to study the behavior of SMRF structures by applying computationally efficient fragility analysis. For this target, the two values of Eq. (4) have to be performed under consideration of each limit state. These two parameters are affected by natural ground motion size sets, and the prediction of those leads to an analysis of fragility in different limit states. In this study, an ANN is applied to achieve the seismic level of demand according to EDP, expressed in terms of the structural first-mode period ($S_a(T_1, 5\%)$). The ground motions that express the uncertainty of demands have been defined with the help of the IMs vector and in accordance with the ANN itself. In more detail, IMs can state delegate values for each single ground motion seismic; therefore, IMs can be considered an input of ANN. The estimation abilities of the proposed ANN are represented for the considered examples as the first step of the suggested method.

The target of the ANN estimation method is to estimate and predict the different sets and combinations of the three IMs in accordance with the limit state value, which is given by the proposed demand, to assume that they are more suitable for the record definition. Therefore, in this case study, the total number of input nodes for the ANN is considered to be 3, but there will be two hidden layers with a total of 42

nodes in each. It is noteworthy to mention that this study has been done using a trial-and-error approach, and each of these hidden nodes is capable of providing a compromise between efficient calculations and accurate estimation. The damage that has been stated previously can be obtained by the total of 5 nodes in the output layer that correspond to the $S_a(T_1, 5\%)$. Therefore, the 3-42-42-5 ANN configuration is applied for the case study. Figure 8 and the IDA curve of the sample structure are shown in Figure 9 in accordance with the ANN performance, where the obtained results of full IDA are compared with the estimated values of ANN. In Figure 10, the direct IDA evaluated value is represented on the horizontal axis, and the vertical axis refers to the estimated value by regressed analytical functions. The position of IDA-based values is equal to the approximated values, which have been indicated by the solid blue line. Also, the achieved data has been shown with dots, and the bounds are represented with dashed lines, which include 68.7% of the dots. The data deviation from the solid blue line (estimated error) is presented by the average of the ratio represented by equation (11). It is noteworthy to mention that the three training sets with the ground motion sizes of 40, 30, and 20 have been tested and simulated, and as a result, the 40-sample size has been taken as an equally well-sized sample compared to the other two ground motion training sets.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_i} (\hat{y}_i)^2} \quad (11)$$

Where y and \hat{y} are predicted and definite values, respectively, and n_i is consider as total number of samples.

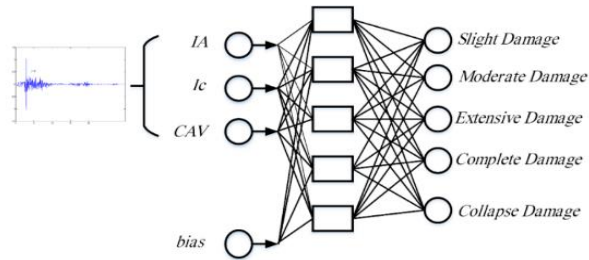


Figure 8. The structure of the MLP network implemented.

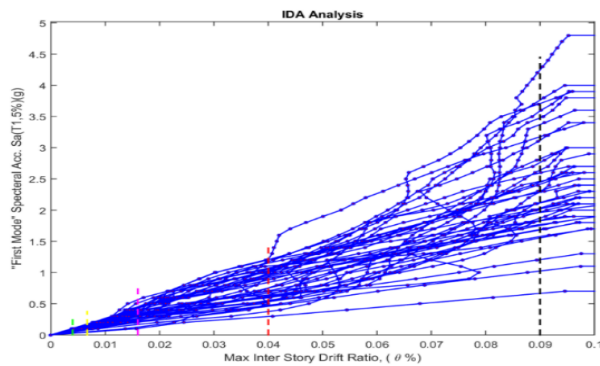


Figure 9. IDA curve of 40 suit records in SMRF sample

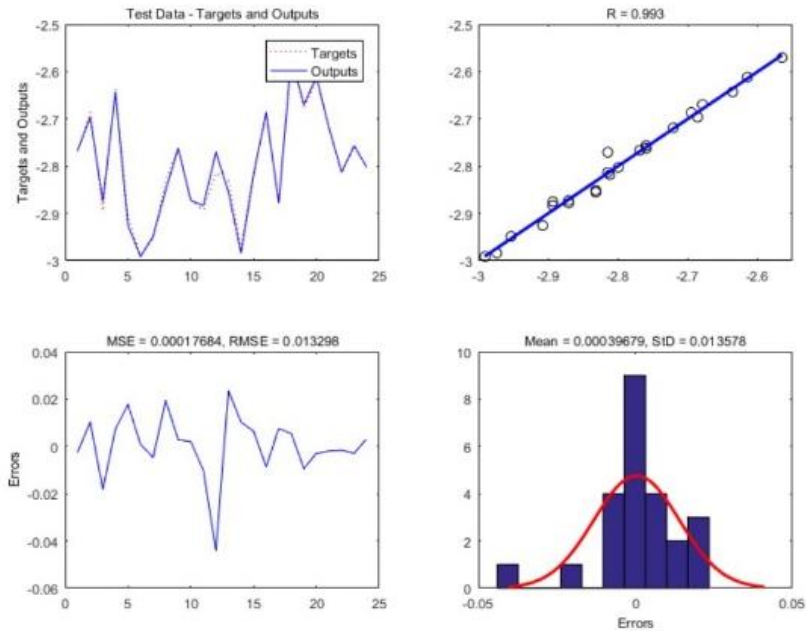


Figure 10. ANN analysis graph for 40 earthquake (a) Train data (b) Test data

8. Fragility Curve

In the second part of this proposed method, five damage are applied to the states of fragility curves for sample buildings. The considered damage-states has been defined by the values of maximum means drift and structural damage range from availability and usability to life cycle safety of structure in accordance with the sideways collapse. The following θ_{\max} values has been selected, based on HAZUS (FEMA, 2003) research study with respect of each one of the five damage-states: 0.4% (slight damage), 0.67% (moderate damage), 1.6% (extensive damage), 4% (complete damage) and 4.8% (collapse damage) or last-converged point on an IDA curve any one reaches early for the SMRF building with five symmetric story. For each single of damage state, the IM-based and IDA has been applied to compute the two factors of μ and β from Eq. [4] by using “log fit” function of Matlab. IM-based has been defined and calculated for all five states of damage. In accordance to the target of proposed method, five cases have been applied to calculate the two factors of ($\mu_k, \beta_k, k = 1 \dots 5$): IDA-20, IDA-40, IDA-60, IDA-80 and IDA-100, where 10–100 records are implemented.

Figure 11 represents the fragility curves in different damage state that cover the entire damage range of sample structure. For the test case, the fragility curves deriving based on the IDA-100 are considered as the “perfect” ones. Initially, it can be observed that the IDA-20 damage states are overestimated the structure capacity. On the other hand,

the capacity of the structure is underestimated for both damage states of IDA-40 and IDA 60. So, it can be noted that 80 records offer a good prediction of the two Based on μ_k and β_k , the fragility curves of IDA-80 approximately coincide with case of IDA-100 which is our acceptance criteria. So, it can be resulted that IDA-80 is the best case among others according robustness and efficiency. Therefore, it can be noted that more natural ground motions are required for an efficient and reliable computation of μ_k and β_k factors and accordingly for the deriving the fragility curves in various damage state.

9. Conclusion

A neural network-based approach is applied for achieving a suitable prediction of the S_a (T1, 5%) given the building capacity, which is subsequently applied for the fragility evaluation of steel moment-resistant frames. Especially, ANN is applied as the proposed approach when incorporated into the IDA analysis, which indicates that it is suitable. The main target is to suggest a procedure capable of preparing accurate S_a (T1, 5%) of the structural frame at a suitable analytical time that is then incorporated into the computational fragility curve. ANN are trained to apply a fixed number of IM, which can be simply derived from natural records. For the purpose of efficiency and representing the proposed method, a five-story symmetric steel moment building has been discussed.

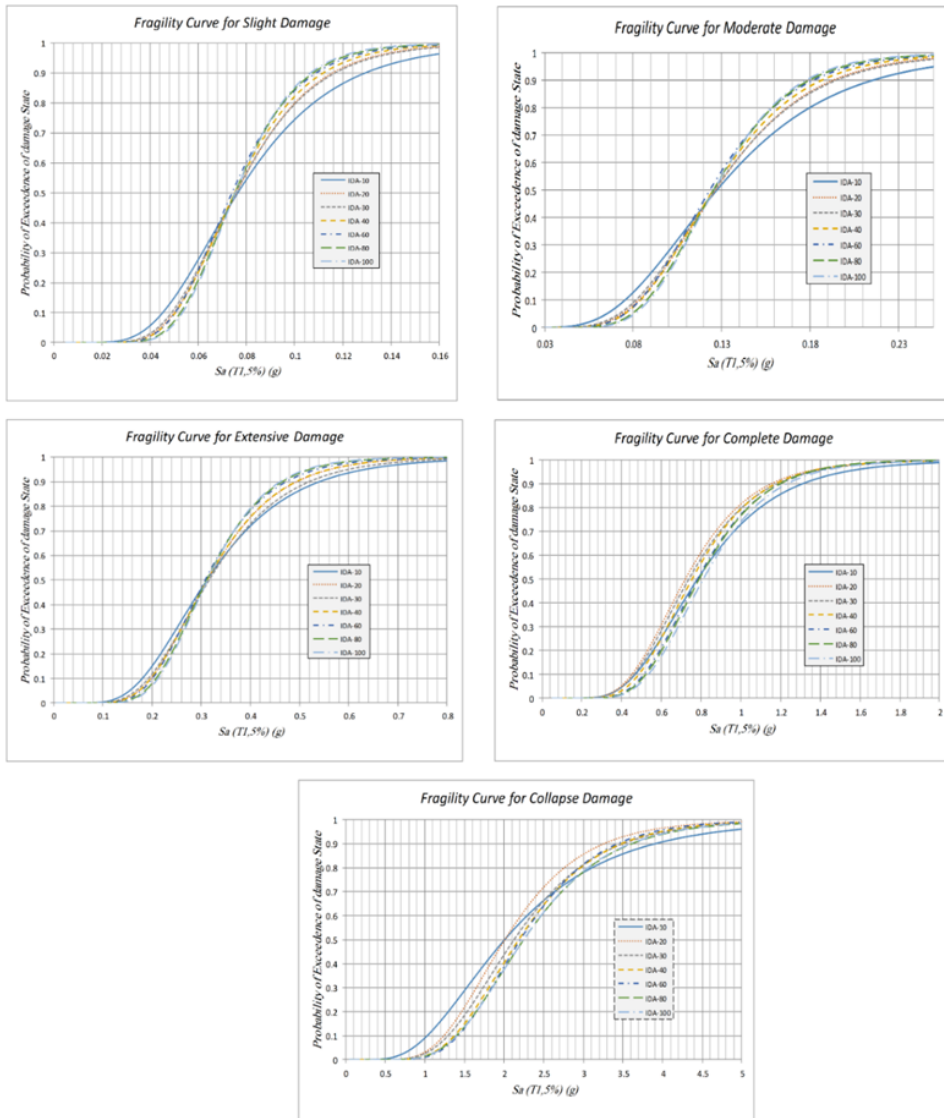


Figure 11. Fragility curves for five damage-states applying alternative number of records.

There are three parts to numerical attention. Firstly, the capability of predicting by the ANN is tested. As was shown, 40 training and testing samples (IM) are enough for efficient training, testing, and validation of the ANN to estimate the seismic demand presented by the $S_a(T1)$ for the five damage states. Second Based on the trained ANN's

estimation, we have successfully derived a set of five damage state fragility curves. On the other hand, the analytical cost of the proposed ANN is tested. It was represented that the analytical cost applied by the predicted ANN would be reduced by comparing various fragility curves in different limit states.

References

- 2800 SN. (2007). Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Iran: *Building and Housing Research Center*.
- Baker J. W, Allin Cornell. C. (2005). A Vector-Valued Ground Motion Intensity Measure Consisting of Spectral Acceleration and Epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34(10), 1193-1217.
- Celarec D, Dolšek M. (2013). The Impact of Modelling Uncertainties on the Seismic Performance Assessment of Reinforced Concrete Frame Buildings. *Engineering Structures*, 52, 340-354.
- FEMA F. (2003). Hazus-Mh-Mr1. Multi-Hazard Loss Estimation Methodology.
- Foutch. D. A. (2000). State of Art Report on Performance Prediction and Evaluation of Moment-Resisting Steel Frame Structures. *SAC Rep. No. FEMA 355f*.
- Jough. F. K. G, Şensoy S. (2016). Prediction of Seismic Collapse Risk of Steel Moment Frame Mid-Rise Structures By Meta-Heuristic Algorithms. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15(4), 743-757.
- Karimi ghaleh jough F, Veghar M, Beheshti-Aval, S. B. (2021). Epistemic Uncertainty Treatment Using Group Method of Data Handling Algorithm in Seismic Collapse Fragility. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 18,355.
- Karimi Ghaleh Jough F, Ghasemzadeh B. (2023). Uncertainty Interval Analysis of Steel Moment Frame by Development of 3D-Fragility Curves Towards Optimized Fuzzy Method. *Arab J Sci Eng* <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08223-8>.
- Karimi Ghaleh Jough F, Şensoy S. (2020). Steel Moment-Resisting Frame Reliability via the Interval Analysis by FCM-PSO Approach Considering Various Uncertainties. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(1), 109-128.
- Karimi Ghaleh Jough. F, Beheshti Aval. S. (2018). Uncertainty analysis through development of seismic fragility curve for an SMRF structure using an adaptive neuro-fuzzy inference system based on fuzzy C-means algorithm. *Scientia Iranica*, 25(6), 2938-2953. doi: 10.24200/sci.2017.4232
- Kircher. C. A, Whitman. R. V, Holmes. W. T. (2006). HAZUS earthquake loss estimation methods. *Natural Hazards Review*, 7(2), 45-59.
- Lagaros. N. D, Fragiadakis. M. (2007). Fragility Assessment of Steel Frames Using Neural Networks. *Earthquake Spectra*, 23(4), 735-752.
- Lagaros. N. D, Tsompanakis. Y, Psarropoulos. P. N, Georgopoulos. E. C. (2009). Computationally Efficient Seismic Fragility Analysis of Geostuctures. *Computers & Structures*, 87(19-20), 1195-1203.
- Li, X. (1996). Simultaneous Approximations of Multivariate Functions and Their Derivatives by Neural Networks with One Hidden Layer. *Neurocomputing*, 12(4), 327-343.
- McKenna, F. (2011). OpenSees: a framework for earthquake engineering simulation. *Computing in Science & Engineering*, 13(4), 58-66.
- Papadrakakis. M, Papadopoulos V, Lagaros, N. D, Oliver. J, Huespe. A. E, Sánchez P. (2008). Vulnerability Analysis of Large Concrete Dams Using the Continuum Strong Discontinuity Approach and Neural Networks. *Structural Safety*, 30(3), 217-235.
- Riedmiller. M, Braun. H. (1993). A Direct Adaptive Method for Faster Back propagation learning: The RPROP Algorithm. *In IEEE international conference on neural networks* (pp. 586-591). IEEE.
- Wyllie LA, Filson JR, Agbabian M, Der Kiureghian A. (1989). Armenia earthquake Reconnaissance report: *Earthquake Engineering Research Institute*.