



Çimentolu yongalevhaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine silis dumanı ve uçucu külün sinerjik etkisi

Hüsnü Yel ^{1*}

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstrisi Mühendisliği Bölümü, Artvin, Türkiye

MAKALE KÜNYESİ

Geliş Tarihi: 19/02/2025

Kabul Tarihi: 26/04/2025

<https://doi.org/10.53516/ajfr.1643332>

*Corresponding author:

yel33@artvin.edu.tr

ÖZ

Giriş ve Hedefler Bu çalışmada; çimento üretimi kaynaklı sera gazı emisyonunun azaltılması, enerji tasarrufunun artırılması, doğal kaynakların korunması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla bir endüstri yan ürünü olan silis dumanı ve uçucu külün çimentolu yongalevha üretiminde çimentoya ikame olarak birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Yöntemler Bu amaçla, Portland çimentosuna ikame olarak farklı oranlarda silis dumanı (%2,5, %5, %7,5, %10 ve %12,5) ve uçucu kül (%2,5, %5, %7,5, %10 ve %12,5) karışımları kullanılarak, 1200

kg/m³ hedef yoğunluk, 1/2,5 odun-çimento oranı, 450 mm x 450 mm x 10 mm boyutunda tek tabakalı çimentolu yongalevhalar üretilmiştir. 28 gün kürleme işleminden sonra çimentolu yongalevhalar; yoğunluk, rutubet, su alma, kalınlık artımı, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, vida tutma direnci ve yüzeye dik çekme direnci testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen verilerin istatistik analizi yapılarak standart değerlerle karşılaştırılmıştır.

Bulgular Silis dumanı-uçucu kül kullanımı arttıkça levhaların su alma ve kalınlık artımı değerleri de artmıştır. Silis dumanı-uçucu kül karışımı levhaların yoğunluğunu artırırken rutubet değerini düşürmüştür. Silis dumanı-uçucu kül kullanımı arttıkça, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve vida tutma direnci değerlerinde önce düşüş daha sonra bir artış gerçekleşmiştir. Çimentoya %15 oranına kadar silis dumanı-uçucu kül ikamesi yüzeye dik çekme direnci değerinde istatistiksel olarak bir önemli bir düşüşe neden olmamıştır.

Sonuç Direnç değerlerinde az da olsa düşüşler gerçekleşse de tüm levha grupları TS EN 634-2 standardındaki değerleri (kalınlık artımı hariç) karşılamaktadır. Bu nedenle, çimentoya ikame olarak %25 oranına kadar silis dumanı (%12,5)-uçucu kül (%12,5) karışımı kullanılarak yapısal kullanım amaçlı çimentolu yongalevhaların üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çimentolu yongalevha, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, silis dumanı, uçucu kül

The synergistic effect of silica fume and fly ash on the physical and mechanical properties of cement-bonded particleboards

ABSTRACT

Background and Aims In this study, the usability of silica fume and fly ash, industrial by-products, as substitutes for cement in the production of cement-bonded particleboard was investigated to reduce greenhouse gas emissions from cement production, increase energy savings, protect natural resources, and lower production costs.

Methods For this purpose, experimental cement-bonded particleboards were produced by partially replacing Portland cement with varying proportions of silica fume (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, and 12.5%) and fly ash (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, and 12.5%). The experimental boards were designed with a target density of 1200 kg/m³, a wood-to-cement ratio of 1/2.5, and dimensions of 450 mm × 450 mm × 10 mm in a single-layer configuration. After a 28-day curing process, the cement-bonded particleboards were subjected to tests for density, moisture content, water absorption, thickness swelling, bending strength, modulus of elasticity in bending, screw withdrawal resistance, and internal bond strength. The obtained data were statistically analyzed and compared to standard requirements.

Results As the usage of silica fume and fly ash increased the water absorption and thickness swelling values of the boards also increased. The silica fume-fly ash mixture increased the density of the boards while reducing their moisture content. While flexural strength, modulus of elasticity in bending, and screw withdrawal resistance initially exhibited a decline, these properties improved after a certain threshold. The replacement of up to 15% of cement with silica fume-fly ash mixture did not cause a statistically significant reduction in internal bond strength.

Conclusion Although there were slight decreases in mechanical strength properties, all board groups met the values specified in the TS EN 634-2 standard except for thickness swelling. Consequently, it was concluded that cement-bonded particleboards for structural use can be produced by using a mixture of silica fume (12.5%)-fly ash (12.5%) up to 25% as a substitute for cement.

Key Words: Cement-bonded particleboards, physical properties, mechanical properties, silica fume, fly ash

Bu makaleye atıf:

Yel, H., 2025. Çimentolu yongalevhaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine silis dumanı ve uçucu külün sinerjik etkisi. Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi, 11(1), 85-91.



Content of this journal is licensed under a Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International Licence.

1. Giriş

Çimento yaygın olarak kullanılan bir inşaat malzemesidir ve üretimi 19. yüzyılın ortalarından bu yana artmaktadır (Ige et al., 2024). Dünyada toplam çimento üretimi, 1995 yılında 1,39 milyar ton iken, 2023 yılında 4,1 milyar tona ulaşmıştır (Jaganmohan, 2024). 2022 yılında dünyada çimento üretimi nedeniyle açığa çıkan toplam karbondioksit miktarı yaklaşık 1,6 milyar tondur (Dünyadaki toplam karbondioksitin yaklaşık %8'ine karşılık gelmektedir) ve bu da çimento endüstrisini, dünyanın üçüncü veya dördüncü en büyük karbondioksit emisyon kaynağı yapmaktadır (Purton, 2024). Çimento üretimi, atmosfere büyük miktarda sera gazı (CO₂) salan enerji yoğun bir işlemdir. 1 ton Portland çimentosunun üretimi için, yakıt ve diğer materyaller dahil yaklaşık 2,8 ton hammadde gerekmede ve üretim esnasında yaklaşık 1 ton sera gazı (CO₂) açığa çıkmaktadır (Abo-El-Enein et al., 2015). Çimento ve beton üretiminin karbondan arındırılması, sürdürülebilir inşaat uygulamaları ve iklim değişikliğinin azaltılması açısından hayati önem taşımaktadır (Barbhuiya et al., 2024). Çimento üretimi kaynaklı sera gazı emisyonunun azaltılması, enerji tasarrufunun artırılması, doğal kaynakların korunması ve atıkların değerlendirilmesiyle üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla çimentoya belli oranda ikame olarak puzolanların kullanımı teşvik edilmektedir (Abo-El-Enein et al., 2015; Correa-Yepes et al., 2018).

Tamamlayıcı çimentolu malzemeler (uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, metakaolin vb.), çimentolarda klinkerin kısmen yerine veya beton karışımlarında Portland çimentosunun kısmen yerine kullanılan çözünür silisli, alüminosilisli veya kalsiyum alüminosilisli tozlar olup, çoğu diğer endüstrilerin bir yan ürünüdür. Tamamlayıcı çimentolu malzemeler, günümüzde beton üretimiyle ilişkili karbondioksit emisyonlarının azaltılmasında kullanılan temel araçlardan biri olarak hizmet vermektedir (Juenger et al., 2019). Tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak en çok kullanılan silis dumanı ve uçucu küldür. Silis dumanı, silikon veya ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında yüksek saflıkta kuvarsin bir elektrik ark ocağında indirgenmesiyle üretilen son derece ince, toz benzeri silisli puzolanik bir malzemedir. Silis dumanı, yüksek oranda amorf silis içeren (yaklaşık %85) küresel partiküllerden oluşmakta olup, partikül boyutu Portland çimentosunun partikül boyutundan yaklaşık 100 kat daha küçüktür (Sakulich, 2011). Dünyada yılda yaklaşık 900 bin ton silis dumanı üretildiği rapor edilmektedir (Arshad et al., 2021). Uçucu kül ise, termik santrallerde kömürün yakılması sonucu oluşan bir yan üründür. Dünyada her yıl yaklaşık 600 milyon ton kömür külü üretilmekte olup, bunun yaklaşık 500 milyon tonunu uçucu kül oluşturmakta ve bunun sadece ortalama %16'sı kullanılmaktadır (Dipta et al., 2023).

Patil et al. (2021), çimentoya ikame olarak %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı ve uçucu kül kullanarak ürettikleri betonların dayanım özelliklerini araştırmıştır. Üretilen beton örneklerinde en yüksek eğilme, basınç ve çekme direnci değerlerinin %5 silis dumanı ve %5 uçucu kül kullanılarak üretilen örneklerden elde edilirken, en düşük değerlerin ise %15 silis dumanı ve %15 uçucu kül içeren örneklerden elde edildiği rapor edilmiştir. Liu et al. (2014) tarafından çimentoya ikame olarak farklı oranlarda silis dumanı (%2, %5 ve %8) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) karışımı kullanarak beton örnekleri

üretilmiştir. Karışımda uçucu kül miktarı artıkça beton örneklerinin eğilme ve basınç direnci değerleri düşerken, silis dumanı miktarı artıkça basınç ve eğilme direnci değerlerinde önce artış sonra bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Benli ve Karataş (2019), kendiliğinden yerleşen harçlarda çimentoya ikame olarak farklı oranlarda uçucu kül (%10 ve %20) ve silis dumanını (%6, %10 ve %14) karışımı kullanmıştır. Çalışmada; %10 silis dumanı ve %10 uçucu kül içeren örneklerin kontrole göre %5 daha yüksek basınç direnci verirken, diğer karışım oranlarına sahip örneklerin daha düşük basınç direnci verdiği tespit edilmiştir. Eğilme direnci değerlerinde ise sadece %10 uçucu kül ve %14 silis dumanı karışımı içeren örnekler, kontrolden daha yüksek bulunmuştur.

Odun-çimento kompozit levhalar; yüksek mekanik özellikler, düşük üretim maliyeti, iyi işlenebilirlik, düşük yoğunluk, iyi akustik ve termal yalıtımı yanında suya, mantara, böceğe ve yangına karşı yüksek dayanım gibi mükemmel özelliklerinden dolayı inşaat ve yapı sektöründe yaklaşık 100 yıldır yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Nasser et al., 2016; Aras et al., 2019; Yel et al., 2025). Odun-çimento kompozit levhaların üretiminde odun, güçlendirici ve dolgu malzemesi olarak lif, yonga, şerit, etiket veya yün formlarında kullanılmakta ve genellikle buna göre adlandırılmaktadır (Aras et al., 2021). Ayrıca, üretimde bağlayıcı olarak çimento, reaksiyon başlatıcı olarak su ve odun-çimento uyumsuzluğunu azaltmak için ise CaCl₂, Al₂(SO₄)₃ gibi farklı kimyasal katkı maddeleri kullanılmaktadır. Odun-çimento kompozit levhaların en yaygın kullanılan türleri; çimentolu yonga levha, çimentolu lif levha, çimentolu odun yünü levhalar ve çimentolu şerit yonga levhalardır (Brahmia et al., 2020).

Beton üretiminde çimentoya belli oranlarda ikame olarak silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımı ile ilgili bazı araştırmalar yapılmıştır. Ancak odun-çimento kompozitlerinin üretiminde çimentoya ikame olarak silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımı ile ilgili herhangi bir araştırmaya rastlanılmamıştır. Bu nedenle, bu çalışmada farklı oranlarda çimentoya ikame olarak silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımının çimentolu yongalevhaların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen verilerin istatistik analizi yapılmış, kontrol örnekleriyle ve ilgili standart değerlerle karşılaştırması yapılmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Deneme levhalarının üretiminde kullanılan Portland çimentosu, silis dumanı ve uçucu kül, sırasıyla Trabzon Aşkale Çimento Sanayi Tic. A.ř., Antalya Etibank Elektrometalürji İşletmesi ve Kütahya ARES Çimento İnşaat Sanayi Tic. A.ř.'den temin edilmiştir. Şekil 1'de Portland çimentosu (CEM II 32.5R) ve puzolanik malzemelere (uçucu kül ve silis dumanı) ait görsel verilmiştir. Çizelge 1'de ise Portland çimentosu ve puzolanik malzemelerin kimyasal bileşiminin karşılaştırılması verilmiştir (Aşkale Çimento, 2021; Türker ve ark., 2009; Eti Elektrometalürji, 2024).



Şekil 1. Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı

Güçlendirici ve dolgu malzemesi olarak Titrek kavak (*Populus tremula* L.) yongaları kullanılmıştır. Odunlar önce yongalanmış, ardından üretime uygun yongalar elde etmek için elenmiştir. Üretimde 1,5 mm elekten geçen ve 0,5 mm elek üzerinde kalan yongalar kullanılmıştır. Eleme işleminden sonra hava kurusu rutubete (%12) ulaşınca kadar yongaların kuruması sağlanmıştır. Odundaki inhibitör maddelerin etkisini azaltmak ve odun-çimento uyumluluğunu artırmak için levhaların üretiminde sertleştirici olarak granül şeklinde piyasadan temin edilen kalsiyum klorür (CaCl_2) kullanılmıştır.

Çizelge 1. Portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal içeriği

Oksit	Portland Çimentosu (% ağırlık)	Uçucu Kül (% ağırlık)	Silis Dumanı (% ağırlık)
SiO_2	19,60	54,49	91,92
Fe_2O_3	2,13	9,27	0,20
Al_2O_3	4,20	20,58	0,42
CaO	57,85	4,26	2,06
MgO	1,50	4,48	3,69
SO_3	2,59	0,52	0,37

2.2 Yöntem

2.2.1 Deneme levhalarının üretimi

Deneme levhalarının üretiminde kullanılan malzemelerin oranları ve üretim şartları Çizelge 2'de verilmiştir. Portland çimentosu, silis dumanı ve uçucu kül Çizelge 2'de belirtilen oranlarda plastik bir kaba konularak homojen bir karışım elde etmek için bir mikser yardımıyla 10 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım, kavak yongası ile 10 dk daha karıştırılmıştır. Odun-çimento uyumluluğunu artırmak için %10'luk kalsiyum klorür çözeltisi ve su, karışıma ilave edilerek homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Elde edilen homojen karışım, 60 cm x 60 cm boyutundaki alüminyum plakalar üzerine 45 cm x 45 cm boyutundaki kalıp vasıtasıyla tek tabaka olacak şekilde serilerek levha taslağı oluşturulmuştur. Şekil 2'de soğuk presleme işleminden sonra kalıptan çıkarılan levha taslağı görülmektedir.

Çizelge 2. Deneme levhalarının üretim planı

Levha türü	P. çimentosu (% ağırlık)	Silis dumanı (% ağırlık)	Uçucu kül (% ağırlık)	Diğer üretim parametreleri
SF-1	100	0	0	Odun-çimento oranı: 1/2,5
SF-2	95	2,5	2,5	Su-çimento oranı: 0,61
SF-3	90	5	5	Levha boyutu: 45x45x1 cm ³
SF-4	85	7,5	7,5	Sertleştirici: CaCl_2 , %5 (çimento ağırlığına oranla)
SF-5	80	10	10	Pres basıncı: 18-20 kg/cm ²
SF-6	75	12,5	12,5	Pres sıcaklığı: 40 °C



Şekil 2. Soğuk preslemeden sonra kalıptan çıkarılmış levha taslağı.

Soğuk presleme işleminden sonra levha taslağı, 40 °C sıcaklık ve 18-20 kg/cm² basınç altında 24 saat sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur. Presten çıkarılan levhar (450x450x10 mm³), %60-70 bağıl nem ve 18-22 °C sıcaklığa sahip klimatize odada 28 gün bekletilerek çimento reaksiyonunun tamamlanması sağlanmıştır. Daha sonra levhalar, mekanik ve fiziksel testlerin yapılabilmesi için ilgili standartta belirtilen boyutlarda daire testere ile kesilmiştir.

2.2.2 Mekanik ve fiziksel testler

Levhaların fiziksel özelliklerinden rutubet, yoğunluk, su alma ve kalınlık artımı değerleri sırasıyla TS EN 322 (1993), TS EN 323/1 (1999), ASTM D1037 (2006) ve TS EN 317 (1993)'de belirtilen esaslara uygun olarak 50x50x10 mm³ boyutundaki örnekler kullanılarak belirlenmiştir.

Levhaların eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri TS EN 310 (1993) standardındaki esaslara uygun olarak 250x50x10 mm³ boyutundaki örnekler kullanılarak belirlenmiştir. Yüzeye dik çekme direnci, TS EN 319 (1993)'e göre 50x50x10 mm³ örnekler kullanılarak belirlenmiştir. Vida tutma direnci testleri ise TS EN 320 (2011)'e göre 75x75x10 mm³ boyutundaki örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm mekanik testler, ZwickRoell Z050 (50 kN) üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir.

2.2.3 İstatistik analiz

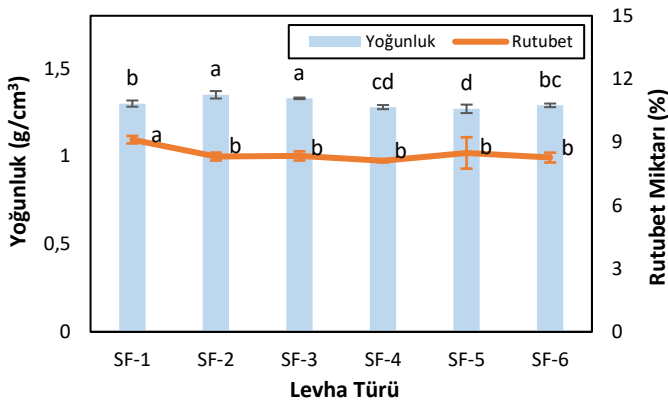
Yapılan fiziksel ve mekanik testler sonucu elde edilen veriler, IBM SPSS Statistics 25 paket programı kullanılarak basit varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Homojenlik grupları ise Duncan testi kullanılarak belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1 Fiziksel özellikler

Portland çimentosuna farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek üretilen tek tabakalı çimentolu yongalevhaların yoğunluk ve rutubet miktarı değerlerine ait aritmetik ortalama, standart sapma ve homojenlik grupları Şekil 3'te verilmiştir. En yüksek yoğunluk değeri %2,5 silis dumanı ve %2,5 uçucu kül karışımı içeren çimentolu yongalevha örneklerinden (SF-2) elde edilirken, en düşük değer ise %10 silis dumanı ve %10 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-5) elde edilmiştir. SF-2 ve SF-3 levha grupları aynı homojenlik grubunda yer alırken, diğer levha grupları farklı homojenlik grubunda yer almıştır.

SF-2 ve SF-3 levhalarının yoğunluk değerleri arasındaki fark, istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. SF-2 ve SF-3 levhalarındaki yoğunluk artışının sebebi silis dumanı ve uçucu külün mikro-dolgu etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimentodan daha küçük tanecik boyutuna sahip olan silis dumanı, boşlukları doldurarak levha hacminde bir değişikliğe neden olmadan ağırlık artışına neden olduğu ve bunun sonucu olarak bir yoğunluk artışı meydana geldiği düşünülmektedir. Ancak %5'ten daha fazla silis dumanı ve uçucu kül karışımı kullanımında ise levha yoğunluğunun düştüğü görülmüştür. Bu durum, silis dumanı ve uçucu külden kaynaklı, levhalarda yeterli iç bağlanmanın sağlanamaması nedeniyle prestren çıkan levhalarda meydana gelen geri yaylanmadan kaynaklanmış olabilir. Ayrıca silis dumanı ve uçucu külün çimentodan daha hafif olması da levha yoğunluğundaki azalmanın diğer bir sebebi olabilir.

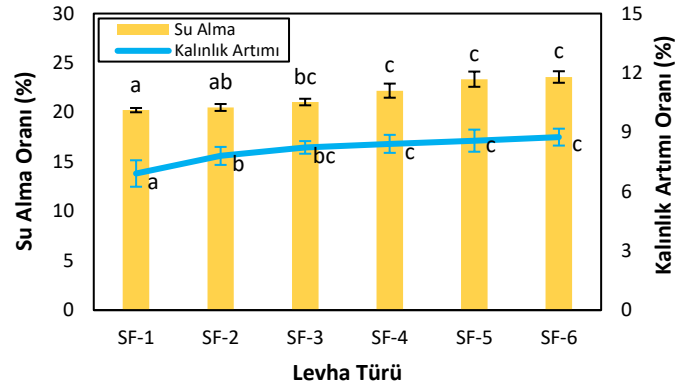


Şekil 3. Deneme levhalarının yoğunluk ve rutubet değerleri (Hata çubukları: Standart sapma; Küçük harfler: homojenlik grupları)

Lashari et al. (2023), silis dumanının beton örneklerinin yoğunluk değerinde artışa neden olduğunu ve bunun nedeninin ise silis dumanının betondaki boşluk miktarını azaltmasından kaynaklandığını ifade etmiştir. Chandra Sekar et al. (2016) ise çimento yerine uçucu kül kullanımı arttıkça betonun yoğunluğunun düştüğünü ve bunun çimento ve uçucu kül arasındaki yoğunluk farklılığından kaynaklandığını rapor etmiştir.

Silis dumanı-üçucu kül kullanımı çimentolu yonga levhaların rutubet değerlerinde az da olsa bir düşüşe neden olmuştur. Ancak kontrol levhası hariç tüm levha grupları aynı

homojenlik grubunda yer almıştır. TS EN 634-1 (1999)'a göre çimentolu yongalevhaların rutubet miktarı %6-%12 arasında olması gerekmektedir. Buna göre, tüm levha grupları standart değerleri karşılamaktadır.



Şekil 4. Deneme levhalarının 24 saatlik su alma ve kalınlık artımı (şişme) oranları (Hata çubukları: Standart sapma; Küçük harfler: Homojenlik grupları)

Deneme levhalarının 24 saat suda bekletildikten sonra ölçülen su alma ve kalınlık artımı değerlerine ait aritmetik ortalama, standart sapma ve homojenlik grupları Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te de görüldüğü üzere, çimentolu yongalevhada çimento yerine silis dumanı-üçucu kül miktarı arttıkça su alma ve kalınlık artımı oranı da artmıştır. En yüksek su alma ve kalınlık artımı oranı %12,5 silis dumanı ve %12,5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-6) elde edilmiştir, en düşük değerler ise kontrol levhasından (SF-1) elde edilmiştir.

Hem su alma hem de kalınlık artımı değerlerinde SF-4, SF-5 ve SF-6 levha grupları aynı homojenlik grubunda yer alırken, diğer levhalar farklı homojenlik grubunda yer aldığı gözlemlenmiştir. Başka bir ifadeyle, silis dumanı ve uçucu külün %5'ten daha fazla kullanımının, levhaların su alma ve kalınlık artımı değeri üzerinde istatistiksel olarak bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Bu duruma silis dumanı-üçucu kül karışımının çimento hidrasyon ürünlerinden biri olan kalsiyum hidroksit ile yeterli bir reaksiyon gerçekleştirilememesi ve ikameden dolayı levhada çimento miktarının azalması sonucu levhada zayıf iç bağlanmaya neden olmuş olabilir. Bu da levhanın kalınlık artımı ve su alma oranındaki artışın sebebi olabilir. Ayrıca, bu artışlara silis dumanının yüksek yüzey alanı ve uçucu külün yüksek su tutma kapasitesi de katkı yapmış olabilir.

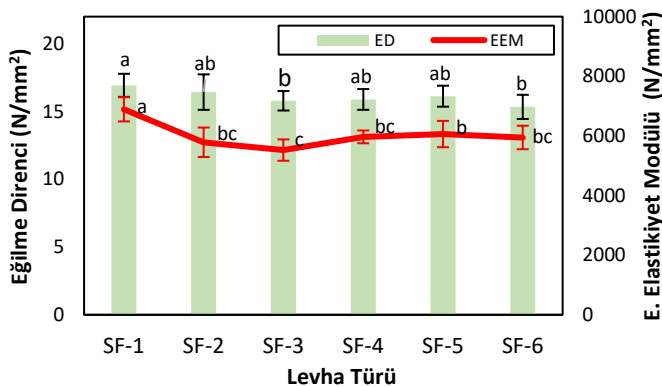
Benli ve Karataş (2016), çimento yerine silis dumanı (%6, %10 ve %14) ve uçucu kül (%10 ve %20) karışımı kullanarak ürettikleri beton örneklerinde sadece %10 silis dumanı ve %20 uçucu kül içeren örneklerin kontrolden daha düşük su alma değeri verdiği, diğer tüm örnek gruplarının kontrolden daha yüksek su alma değeri verdiğini rapor etmiştir. Bunun silis dumanının çok ince taneli olmasından dolayı yüzey alanın çok fazla olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Yel and Ürün (2022), çimento yerine uçucu kül kullanılarak ürettikleri çimentolu yongalevhada uçucu kül kullanımı arttıkça su alma miktarının arttığı ve kalınlık artımı oranında ise istatistiksel olarak bir farklılığın meydana gelmediğini rapor etmiştir. Bu durumun, uçucu külün yüksek su tutma kapasitesi ve uçucu külün Ca(OH)₂ ile reaksiyonu sonucu oluşan C-S-H jelinin yüksek yüzey alanına sahip olmasından kaynaklandığını ifade

etmiştir. TS EN 634-2 (2009) standardına göre, çimentolu yongalevhaların 24 saat suda bekletildikten sonra kalınlık artımı (şişme) oranının maksimum %1,5 olması gerekmektedir. Ancak kontrol grubu dahil tüm levha grupları bu standart değerin üzerinde kalınlık artımı değeri vermiştir. Bu durum, odun/çimento oranının yüksek olmasından kaynaklanmıştır.

3.2 Mekanik özellikler

Portland çimentosuna farklı oranlarda silis dumanı ve uçucu kül ikame edilerek üretilen tek tabakalı çimentolu yongalevhaların eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerine ait aritmetik ortalama, standart sapma ve homojenlik grupları Şekil 5'te verilmiştir. Çimentoya ikame olarak silis dumanı ve uçucu kül karışımının çimentolu yongalevhaların eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerini az da olsa düşürdüğü görülmüştür. En düşük eğilme direnci değeri %12,5 silis dumanı ve %12,5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-6), en yüksek değer kontrol grubundan (SF-1) elde edilmiştir. En düşük eğilmede elastikiyet modülü değeri ise %5 silis dumanı ve %5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF3), en yüksek değer ise kontrol grubundan (SF-1) elde edilmiştir.

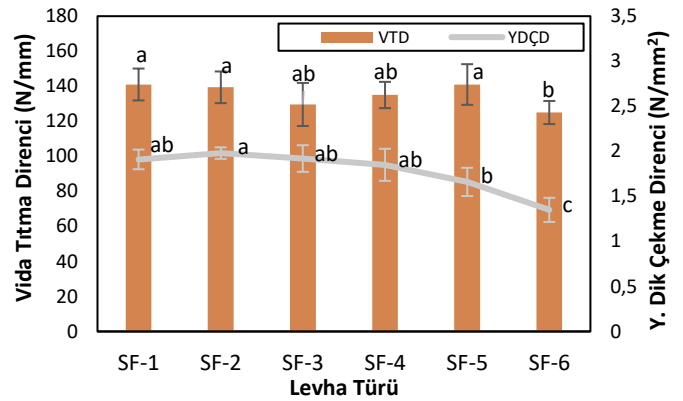
Üretilen çimentolu yongalevhalarında silis dumanı-uçucu kül kullanımı arttıkça çimento miktarı da aynı derecede azalmıştır. Silis dumanı ve uçucu külün, kalsiyum hidroksit ile yeterli düzeyde reaksiyon gerçekleştirmediği ve çimento miktarındaki azaldan dolayı, levhaların eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde az da olsa düşüşler meydana gelmiştir (Lin et al., 2017; Patil et al., 2021). Hem eğilme direnci değerleri hem de eğilmede elastikiyet modülü değerleri %5'ten daha fazla silis dumanı-uçucu kül kullanımıyla artsa da kontrol levhasını geçememiştir. Silis dumanı ve uçucu külün çimentoya göre daha hafif ve daha hacimli olması, sıkıştırma faktörünü artırdığından dolayı levhalar daha kompakt bir yapıya sahip olmaktadır. Bu nedenle, %5'in üzerinde silis dumanı-uçucu kül kullanımı arttıkça eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde az da olsa bir artış olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Deneme levhalarının eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri

TS EN 634-2 (2009) standardına göre, çimentolu yongalevhaların minimum eğilme direnci değeri 9 N/mm² ve minimum eğilmede elastikiyet modülü değeri ise 4500 N/mm² olması gerekmektedir. Buna göre, tüm levha gruplarının eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri standart değerlerin çok üzerinde olup, standardı karşılamaktadır. Bu da

çimentoya ikame olarak %25'e kadar tamamlayıcı çimentolu malzemelerin (%12,5 silis dumanı ve %12,5 uçucu kül) kullanılabileceğini göstermektedir. Benli ve Karataş (2016), çimentoya ikame olarak farklı oranlarda silis dumanı (%6, %10 ve %14) ve uçucu kül (%10 ve %20) karışımı kullanarak ürettikleri beton örneklerinin eğilme direnci değerleri ile bu çalışmada elde edilen eğilme direnci değerleri benzer bir trend göstermektedir. Liu et al. (2014), çimentoya ikame olarak farklı oranlarda silis dumanı (%2, %5 ve %8) ve uçucu kül (%10, %20 ve %30) karışımı kullanarak ürettikleri beton örneklerinde uçucu kül miktarı arttıkça eğilme ve basınç direnci değerlerinin düştüğünü rapor etmiştir. Ayrıca, silis dumanı miktarı arttıkça basınç ve eğilme direnci değerlerinde önce artış sonra bir düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 6. Deneme levhalarının vida tutma direnci ve yüzeye dik çekme direnci değerleri

Üretilen deneme levhalarının vida tutma direnci ve yüzeye dik çekme direnci değerlerine ait aritmetik ortalama, standart sapma ve homojenlik grupları Şekil 6'da verilmiştir. En yüksek vida tutma direnci kontrol (SF-1) ve SF-5 levha grubundan elde edilirken, en düşük değer ise %12,5 silis dumanı ve %12,5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-6) elde edilmiştir. Vida tutma direnci değerlerinde SF-1, SF-2 ve SF-5 levha grupları aynı homojenlik grubunda yer almıştır. Levhaların vida tutma direnci değerleri, eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerleri ile benzer bir trend göstermiştir. Silis dumanı-uçucu külün %5'e kadar kullanımında vida tutma direncinde azalma olurken, %5'ten daha fazla kullanımda ise vida tutma direncinde bir artış gözlemlenmiştir.

En yüksek yüzeye dik çekme direnci değeri %2,5 silis dumanı ve %2,5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-2), en düşük değer ise %12,5 silis dumanı ve %12,5 uçucu kül içeren levha grubundan (SF-6) elde edilmiştir. Yüzeye dik çekme direnci değerlerinde SF-1, SF-3 ve SF-5 levha grupları aynı homojenlik grubunda yer almıştır. Çimentoya ikame olarak %15 oranına kadar tamamlayıcı çimentolu malzemelerin (silis dumanı-uçucu kül karışımı) kullanımı sonucunda çimentolu yongalevhaların yüzeye dik çekme direnci değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir azalma gözlemlenmemiştir. Ayrıca SF-2 ve SF-3 levha grupları kontrol grubundan (SF-1) daha yüksek yüzeye dik çekme direnci değeri vermiştir. Silis dumanı-uçucu kül kullanımı levhaların yüzeye dik çekme direnci değerini %3,66 oranına kadar arttırmıştır. Fakat %15 oranından daha fazla kullanımda ise yüzeye dik çekme direncinde hızlı bir azalma gözlemlenmiştir. Patil et al. (2021),

kompozit lif takviyeli yüksek performanslı betonlarının üretiminde farklı oranlarda silis dumanı (%5, %10 ve %15) ve uçucu kül (%5, %10 ve %15) karışımını çimentoya ikame olarak kullanmıştır. Üretilen betonların çekme direnci değerleri, bu çalışmada elde edilen verilerle benzer bir trend göstermiştir. TS EN 634-2 (2009) standardına göre, çimentolu yongalevhaların sahip olması gereken minimum yüzeye dik çekme direnci değeri $0,5 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Buna göre, tüm levha grupları standart değerin çok üzerinde yüzeye dik çekme direnci vermiş olup, standart karşılamaktadır.

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, çimento üretimi kaynaklı sera gazı emisyonunun azaltılması, enerji tasarrufunun artırılması, doğal kaynakların korunması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla bir endüstri yan ürünü olan silis dumanı ve uçucu külün çimentolu yongalevha üretiminde çimentoya ikame olarak birlikte kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen verilerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Çimentoya %10'a kadar silis dumanı-uçucu kül ikamesi çimentolu yonga levhaların yoğunluğunda bir artışa neden olmuştur. %10'dan daha fazla kullanımda ise geri yaylanmadan ve daha düşük yoğunluklu silis dumanı-uçucu kül içeriğinden dolayı levhaların yoğunluğunda azalma meydana gelmiştir.
- Silis dumanı-uçucu kül çimentolu yongalevhanın rutubetini düşürmüştür. Ancak tüm levha grupları standart değeri (%6-%12) karşılamıştır.
- Silis dumanı ve uçucu kül kullanımı artıkça, çimentolu yongalevhaların 24 saatlik su alma ve kalınlık artımı (şişme) oranı da artmıştır.
- Silis dumanı-uçucu kül kullanımı artıkça, eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde önce düşüş daha sonra bir artış gerçekleşmiştir. Direnç düşüşünün sebebi, silis dumanı ve uçucu külün kalsiyum hidroksit ile yeterli düzeyde reaksiyon gerçekleştirememesi ve çimento miktarındaki azalmadan dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir. Silis dumanı ve uçucu külün daha hafif ve daha hacimli olmasından dolayı levhanın sıkıştırma faktörünü artırdığı için %5'in üzerinde silis dumanı-uçucu kül kullanımında az da olsa levhanın eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde artış olmuştur.
- Çimentoya ikame olarak %15 oranına kadar silis dumanı-uçucu kül karışımı kullanımı çimentolu yongalevhaların yüzeye dik çekme direnci değerlerinde istatistiksel olarak anlamlı bir düşüşe neden olamamıştır. Ayrıca çimentoya ikame olarak %20 oranına kadar silis dumanı-uçucu kül karışımının kullanımı çimentolu yongalevhaların vida tutma direncinde önemli bir düşüşe neden olmamıştır.
- Üretilen tüm levha grupları, kalınlık artımı (şişme) hariç TS EN 634-2 standardındaki tüm değerleri karşılamıştır. Bu nedenle, çimentolu yongalevha üretiminde çimentoya ikame olarak %25 oranına kadar silis dumanı-uçucu kül karışımının kullanılabilirliği ve üretilen levhaların yapısal amaçlı kullanıma uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Farklı odun-çimento oranı, ağaç türü, su/çimento oranı, çimento türü ve kürlenme süreleri ile üretilmiş çimentolu yongalevhalar üzerine farklı silis dumanı ve uçucu kül

karışım oranlarının etkisini belirlemek için daha fazla araştırma yapılmalıdır.

Kaynaklar

- Abo-El-Enein, S.A., El-kady, G., El-Sokkary, T. M., Gharieb, M., 2015. Physico-mechanical properties of composite cement pastes containing silica fume and fly ash. HBRC Journal 11(1), 7-15.
- Aras, U., Kalaycıoğlu, H., Yel, H., Çok, A., 2019. Effect of cement and accelerator types on the physico-mechanical properties of cement-bonded particleboards. Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences, 4(4), 627-630.
- Aras, U., Kalaycıoğlu, H., Yel, H., 2021. The Effect of using umice powder and plasticizer on physico-mechanical and thermal properties of cement-bonded particleboards. Drvna industrija, 72(1), 31-37.
- Arshad, M.T., Ahmad, S., Khitab, A., Hanif, A., 2021. Synergistic use of fly ash and silica fume to produce high-strength self-compacting cementitious composites. Crystals, 11(8), 915.
- ASTM D1037, 2006. Standard test method for evaluating properties of wood-based fibers and particle panel materials, ASTM, USA.
- Aşkale Çimento, 2021. Erzincan çimento fabrikası ürün analiz raporu, <https://www.askalecemento.com.tr/tesis-detay/erzincan-cimento-fabrikasi> (Erişim Tarihi: 25.012.2024).
- Barbhuiya, S., Kanavaris, F., Das, B.B., Idrees, M., 2024. Decarbonising cement and concrete production: Strategies, challenges, and pathways for sustainable development. Journal of Building Engineering, 86, 108861.
- Benli, A., Karataş, M., 2019. Uçucu kül ve silis dumanı ikameli üçlü karışımlardan üretilen kendiliğinden yerleşen harçların durabilite ve dayanım özellikleri. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 10(1), 335-345.
- Brahmia, F.Z., Horvath, P.G., Alpar, T.L., 2020. Effect of pre-treatments and additives on the improvement of cement wood composites: a review, Bioresources 15(3), 7288-7308.
- Chandra Sekar, G., Ch, H.K., Manikanta, V., Simhachalam, M., 2016. Effect of fly ash on mechanical properties of lightweight vermiculite concrete. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 5, 4106-4112.
- Correa-Yepes, J.A., Rojas-Reyes, N., Tobón, J.I., 2018. Effect of fly ash and silica fume on rheology, compressive strength and self-compacting in cement mixtures. Dyna, 85(206), 59-68.
- Dipta, O.B., Sobhan, S.F., Shuvo, A.K., 2023. Assessment of the combined effect of silica fume, fly ash, and steel slag on the mechanical behaviour of concrete. Journal of Civil Engineering and Construction, 12(2), 78-85.
- Eti Elektrometalurji, 2024. Silis dumanı ürün analiz raporu <https://www.etimet.com/> (Erişim tarihi: 25.12.2024).
- Ige, O.E., Von Kallon, D.V., Desai, D., 2024. Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model. Clean Technologies and Environmental Policy, 26(3), 579-597.

- Jaganmohan, M., 2024. Global cement production 1995-2023, Statista, <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/> (Erişim tarihi:10.01.2025).
- Juenger, M.C., Snellings, R., Bernal, S.A., 2019. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122, 257-273.
- Lashari, A.R., Kumar, A., Kumar, R., Rizvi, S.H., 2023. Combined effect of silica fume and fly ash as cementitious material on strength characteristics, embodied carbon, and cost of autoclave aerated concrete. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27875-27883.
- Lin, C., Kayali, O., Morozov, E.V., Sharp, D.J., 2017. Development of self-compacting strain-hardening cementitious composites by varying fly ash content. *Construction and Building Materials*, 149, 103-110.
- Liu, J., Zhang, Y., Liu, R., Zhang, B., 2014. Effect of fly ash and silica fume on hydration rate of cement pastes and strength of mortars. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 29(6), 1225-1228.
- Nasser, R.A., Salem, M.Z.M., Al-Mefarrej, H.A., Aref, I.M., 2016. Use of tree pruning wastes for manufacturing of wood reinforced cement composites, *Cement and Concrete Composites*, 72, 246-256.
- Patil, S., Somasekharaiah, H.M., Rao, H.S., Ghorpade, V.G., 2021. Effect of fly ash, silica fume, glass fiber and polypropylene fiber on strength properties of composite fiber reinforced high performance concrete. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69, 69-84.
- Purton, M. 2024. Cement is a big problem for the environment. Here's how to make it more sustainable <https://www.weforum.org/stories/2024/09/cement-production-sustainable-concrete-co2-emissions/#:~:text=It%27s%20been%20said%20that%20if,the%20world%27s%20total%20CO2%20emissions> (Erişim tarihi: 15.01.2025).
- Sakulich, A.R., 2011. Reinforced geopolymer composites for enhanced material greenness and durability. *Sustainable Cities and Society*, 1(4), 195-210.
- TS EN 310, 1999. Ahşap esaslı levhalar-eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 317, 1999. Yonga levhalar ve lif levhalar-su içerisine daldırma işleminde sonra kalınlığına şişme tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 319, 1999. Yonga levhalar ve lif levhalar-levha yüzeyine dik çekme dayanımının tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 320, 2011. Yonga levhalar ve lif levhalar-vida tutma mukavemetinin tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 322, 1999. Ahşap esaslı levhalar-rutubet miktarının tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 323, 1999. Ahşap esaslı levhalar-birim hacim ağırlığının tayini, TSE, Ankara.
- TS EN 634-1. 1999. Çimentolu yonga levhalar- özellikler-bölüm 1: genel özellikler, TSE, Ankara.
- TS EN 634-2. 2009. Çimentolu yonga levhalar- özellikler-bölüm 2: kuru, nemli ve açık hava şartlarında kullanılan normal portland çimentosu (NPÇ) ile yapıştırılmış yonga levhaların özellikleri, TSE, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A., 2009. Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri, TÇMB/AR-GE ENSTİTÜSÜ, Fersa Matbaacılık, Ankara.
- Yel, H., Aras, U., Kalaycıoğlu, H., Aykan, R., 2025. Cement-bonded wood panels filled with duroplast sanitary ware wastes. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 27(4), 1-14.
- Yel, H., Urun, E., 2022. Performance of cement-bonded wood particleboards produced using fly ash and spruce planer shavings. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24, 1-12.