Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi
Düzce University Faculty of Forestry Journal of Forestry

22 (1), 2026, 76-83.
https://doi.org/10.58816/duzceod.1825580

ISSN: 2148-7871 e-ISSN: 2148-7855
https://dergipark.org.tr/en/pub/duzceod

Araştırma Makalesi/Research Article

Miselyum Esaslı Kompozitlerin Üretim Süreçlerinde Fındık Zurufunun Kullanımı ve Malzeme Özelliklerine Etkisi

The Use of Hazelnut Husk in the Fabrication of Mycelium-Based Composites and Its Influence on Material Characteristics

Hande Akarca[1*], Simanur Çetin[1], Mesut Yalçın[2]

[1] Düzce Üniversitesi Sanat Tasarım ve Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Düzce, Türkiye.
ror.org/04175wc52

[2] Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü Düzce, Türkiye.
ror.org/04175wc52

*Sorumlu yazar / Corresponding author:
handeakarca@duzce.edu.tr

Öz: Miselyum esaslı kompozit malzemeler, doğal bileşenleri nedeniyle, sürdürülebilir, biyo-çözünür ve yüksek yalıtım kabiliyetine sahip bir yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde bu alanda yapılan araştırmalar artarak devam etmektedir. Bu çalışmanın amacı, Karadeniz Bölgesi'nde fındık üretimi sonrasında büyük miktarlarda (yaklaşık 200 bin ton/yıl) ortaya çıkan ve yakıt ve gübre dışında ekonomik herhangi bir değere sahip olmayan fındık zurufunun, miselyum esaslı kompozit yalıtım panelleri oluşturma süreçlerinde değerlendirilebilme potansiyelinin araştırılmasıdır. Bu kapsamda, fındık hasadı sonrası elde edilen zuruflar çeşitli işlemlerden geçirildikten sonra Pleurotus ostreatus mantarına maruz bırakılarak miselyum oluşturulmuş ve elde edilen numunelerin bir kısmı sıkıştırılarak yoğunluğu arttırılmış bir kısmı ise sıkıştırılmadan kurutulmuştur. Testler sırasında, zuruf katkılı miselyum levhaların morfolojik özellikleri, yoğunlukları, ısı geçirgenlik, su emme ve temas açısı gibi bazı fiziksel özellikleri test edilmiştir. Test sonuçları kompozit panellerin oldukça iyi bir ısıl direnç (0,69-1,66 m2K/W) özelliğinin yanı sıra, suda bekleme ile yüksek su alma oranına karşın oldukça düşük oranda kalınlığına şişme (%5-9) oranı elde edilmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada miselyum esaslı biyo-kompozit yapı malzemesi üretiminde zuruf kullanımının hem atıkların geri kazanımında hem de yüksek nitelikli yalıtım malzemesi üretiminde olumlu etkiler yaratma potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: *Miselyum esaslı kompozit, Pleurotus ostreatus, Fındık zurufu, Fiziksel özellik*

Abstract: Mycelium-based composite materials are defined as sustainable, biodegradable and high-insulation-capacity construction materials due to their natural components. Research in this field is continuously and increasingly progressing. The primary objective of this study is to investigate the potential use of hazelnut husk in the processes of forming mycelium-based composite insulation panels. Hazelnut husk is generated in large quantities (approximately 200 thousand tons/year) following hazelnut production in the Black Sea Region, and currently possesses little economic value beyond use as fuel or fertilizer. Within this scope, husks obtained after the hazelnut harvest were subjected to various treatments and subsequently inoculated with the fungus Pleurotus ostreatus to form mycelia. The resulting composite samples were processed in two ways: a portion was pressed to increase its density, while the remainder was dried without pressing. During testing, the morphological characteristics, densities, thermal conductivity, water absorption, and contact angle of the husk-incorporated mycelium boards were evaluated. Test results showed that the composite panels exhibited very good thermal resistance (0,69-1,66 m2K/W) properties, and despite a high water absorption rate when immersed in water, they also showed a very low thickness swelling rate (5-9%). In conclusion, this study has shown that the incorporation of hazelnut husk in the production of mycelium based bio-composite construction materials has the potential to yield positive impacts, both in terms of waste valorization and the manufacturing of high-quality insulation materials.

Keywords: *Mycelium based composites, Pleurotus ostreatus, Hazelnut husk, Material characteristics*

Geliş / Received: 17.11.2025
Revizyon / Revision: 07.03.2026
Kabul / Accepted: 08.03.2026
Yayımlanma / Online: 18.06.2026

This is an open access paper distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.
Bu makale, Creative Commons Atıf-GayriTicari 4.0 Uluslararası Lisansı (CC BY-NC 4.0) hükümleri ve koşulları kapsamında açık erişim olarak yayımlanmıştır.

I. GİRİŞ

İnşaat sektörü, yıllık tüketilen enerjinin %40'ından, CO^2 emisyonunun %30'undan sorumlu tutulmaktadır. Diğer yandan bu enerji tüketimi ve CO^2 emisyonunun ilerleyen yıllarda katlanarak artacağı düşünülmektedir (Jiménez-Obando vd., 2025; Saez vd., 2022). Miselyum esaslı kompozitler paketleme, yenilikçi mimarlık uygulamaları ve yapılarda akustik ve termal izolasyon gibi alanlarda gittikçe yoğunlaşan bir kullanıma sahiptir (Barta vd., 2024; Biby vd., 2025; Volk vd., 2024). Miselyum esaslı kompozitler bu kapsamda düşük karbon ayak izine sahip olma, biyolojik olarak parçalanabilir olma, atık malzemeleri dönüştürme, ekonomik uygulanabilirliği yüksek, kaynağa bağımlılığı düşük olma gibi faydalara sahiptir (Camilleri vd., 2025; Kim vd., 2026).

Malzemenin oluşum sürecinde, mantar türü, bileşen türü, katkı maddeleri, yetiştirme koşulları, yetiştirme süresi, işleme ve şekillendirme yöntemleri gibi parametreler, malzemenin mekanik özellikleri, dayanıklılığı, su geçirgenliği gibi özellikleri üzerinde önemli bir yere sahiptir (Alaneme vd., 2023; Biby vd., 2025; Mohseni vd., 2023; Song vd., 2025).

Miselyum esaslı kompozitlerde, Pleurotus ostreatus, Ganoderma lucidum ve Trametes multicolor (Appels vd., 2019) gibi farklı mantar türü ve fıstık samanı gibi tarımsal atıklar (Song vd., 2025), kahve atıkları (Barta vd., 2024) yerelde kolay ulaşılabilen lignoselülozik kalıntılar, talaş ve cam parçacıkları gibi farklı malzemelerden oluşan bileşenlerle kullanılmaktadır (Aktaş, 2025; Canda vd., 2023; Jiménez-Obando vd., 2025). Diğer yandan, bileşen olarak tarımsal ve endüstriyel atıkların kullanılması, döngüsel ekonomiye de katkı sağlanmaktadır (Canda vd., 2023). Ancak bu üretimde verim ve mekanik özellikler konusunda henüz bir standardizasyon sağlanmamıştır (Camilleri vd., 2025). Benzer şekilde Alaneme vd., (2023) miselyum esaslı kompozitler için çok fazla bileşen çeşidi, mantar türü ve büyüme koşulları olduğunu belirterek bu yaklaşımlar kapsamında standartlaştırılmaya gidilmesini önermektedir. Diğer yandan miselyum esaslı kompozit üretim süreçlerinde bileşeni oluşturan malzemelerin bölgede hazır bulunması da önemli bir parametredir (Aktaş, 2025; Jiménez-Obando vd., 2025). Bu kapsamda bileşen içeriği, hem miselyum esaslı kompozit malzemelerin halk tarafından erişim ve kabulünü kolaylaştırma hem de malzemenin uzun dönemli üretimi için önemli bir potansiyele sahiptir.

Fındık zurufu ülkemizde bol miktarda ortaya çıkmakta ve yakılarak veya tarla kenarlarında yığın halinde bekletilerek doğada dönüşüme uğraması sağlanmaktadır. Ülkemizde yıllık yaklaşık 550 bin ton fındık üretimi gerçekleştirilmekte olup bu rakam, dünya toplam fındık üretiminin %60'ına karşılık gelmektedir. Fındık zurufu ise ülkemizde toplam miktarına ilişkin herhangi bir resmi veri olmasa da üretilen fındığın 1/3'ü kadar olduğu belirtilmektedir (Dok, 2014). Bu durumda ülkemizde yıllık ortalama ortaya çıkan zuruf miktarının yaklaşık 180-200 bin ton olduğu söylenebilir.

Yapılacak bu çalışmada ülkemiz açısından önemli bir tarımsal atık olan fındık zurufunun doğal bir miselyum bazlı kompozit malzemeye dönüştürülebilme potansiyeli araştırılacaktır. Daha önce literatürde fındık zurufunun miselyum esaslı kompozit üretiminde değerlendirilmesine yönelik bir bilimsel çalışmanın bulunmaması nedeniyle özgün bir çalışma niteliği taşımakla birlikte, yapı sektörü açısından gelecekte alternatif bir yapısal materyal oluşturma potansiyeli taşımaktadır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma kapsamında üretilen panellerde bileşen olarak bulunan zuruf ile uyum sağlayabildiği belirtilmiş olan (Pekşen, 2001) Pleurotus ostreatus mantar cinsi seçilmiştir. Mantar miselleri olarak ülkemize ithal yolla gelen ve Türkiye distribütörü (Bursa Mantar) tarafından satışa sunulan F1 ana kültüründen elde edilmiş miseller kullanılmıştır. Bu bölümde miselyum esaslı kompozit malzemeleri oluşturmak için kültürleme koşulları, üretim ve şekil verme koşulları anlatılmıştır. Üretim sürecinin ardından yapılan testler ve analizler aktarılmıştır.

A. Kültürleme ve Üretim Koşulları

İlk olarak kaba haldeki zuruflar el aletleriyle küçültülmüş ve homojen bir yapıya getirilmişlerdir. Ardından zuruflar 3 kere yıkanmış ve son bir kez de saf su ile tekrar yıkanmıştır. Yıkanan zuruflar bir gün boyunca kurumaya bırakılmıştır. Bu şekilde zuruflar nemli bir halde kalmıştır (Şekil.1). Daha sonra zuruflar otoklavlanabilir torbalara doldurularak sterilize edilmiştir. Sterilizasyon laboratuvar ölçekli bir otoklavda 121 0C de 1 atm. basınç altında 20 dakika boyunca gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Yıkanma işlemi sonrası zurufların şartlandırılması.

Sterilize edilen zuruflara Pleurotus ostreatus mantarı kültürlerinden laminar hava kabininde ekim yapılmıştır. Bu mantar türü zuruf ile hazırlanan bileşenlerle uyum sağlayabildiği (Pekşen, 2001) için seçilmiştir. Ekim işlemi yapıldıktan sonra eşit ağırlıkta tartılarak yetiştirme kaplarına yerleştirilmiş ve elle sıkıştırılmıştır. Ardından bu kalıplar streç film ile kapatılarak sterilize edilmiş, iğne ile yüzey üzerinde delikler oluşturulmuştur. Bu deliklerin amacı miselyumun oksijene erişimini artırmaktadır. Son olarak numuneler %80'lik bir nem oranına ve 25 °C sıcaklığa sahip iklimlendirme cihazında 12 gün boyunca bekletilmiştir. İlk 12 günün sonunda kalıplaşmış miselyum aynı kapta ters döndürülerek 12 gün boyunca miselyum oluşumuna devam edilmiştir.

B. Numune Oluşturulması

Toplam 24 gün sonra inkübasyondan çıkarılan numunelerin bir kısmı, yüksekliği 25 mm olan takozlar ile yükseklik belirlenerek, sunta-lam levhaların arasına yerleştirilmiş, mengene aracılığıyla sabit kalınlığa gelene kadar sıkıştırılmıştır. Numuneler iki gün boyunca mengenede, oda şartlarında bekletilmiştir. Süreç sonunda, sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış miselyum levhalar kurutulmak üzere etüvde 60 °C sıcaklıkta 3 gün boyunca fırınlanmıştır. Bu süreç sonunda oda şartlarında (~23 °C) bekletilerek soğutulmuştur.

C. Morfolojik Analiz

Gerek taslak halindeki gerekse sıkıştırılmış ve kurutulmuş halindeki miselyumların stereo mikroskop altında incelemeleri yapılarak, hüf ve zurufların birlikte oluşturdukları yapılar incelenmiştir.

D. Yoğunluk Analizi

Yoğunluk için fırında kurutma sonrası toplam 12 adet numunenin 3 farklı yerden yükseklik, en, boy ölçümleri yapılmıştır. Ardından bu ölçümlerin ortalaması alınarak hacim hesaplanmış ve son olarak ağırlıkları da ölçülerek yoğunlukları hesaplanmıştır (Türk Standardları Enstitüsü, 1999a).

E. Su Emme Analizi

Her bir grup için 6 adet 50*50*25 mm sıkıştırılmış numune ve 50*50*50 mm boyutundaki sıkıştırılmamış kare formunda numune, oda sıcaklığındaki su ile dolu kaplara yerleştirilmiştir. Ardından sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numunelerden oluşan her bir grup için ayrı ayrı 1, 2, 4, 8, 24, 48 ve 96 saat sonra ölçümler tekrarlanmıştır. Her ölçüm için numuneler su dolu kaptan alınarak, yüzeydeki su, kâğıt havlu ile alınarak 1 dakika içinde tartılmıştır (Appels vd., 2019). Her ölçümde numunelerin ağırlıkları ve boyutlarındaki değişimler tespit edilerek kayıt altına alınmıştır.

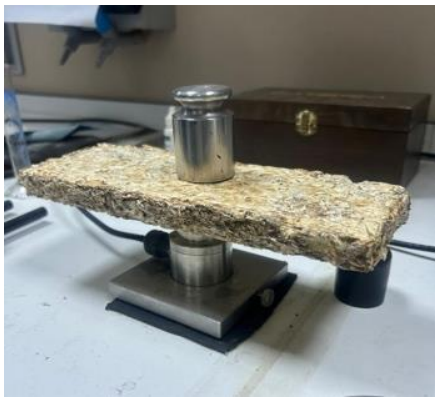
F. Temas Açısı Ölçümü

Temas açısı testi, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde gerçekleştirilmiştir. Testler, Attension Theta temas açısı ölçüm cihazı kullanılarak oda şartlarında 4 µl su damlası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi fazlasıyla parçalı ve düzensiz formda olan sıkıştırılmamış numuneler için bu test için anlamlı sonuçlar elde edilememiş ve testler sadece 50*50*25 mm boyutlu sıkıştırılmış 2 adet numunede 5 farklı ölçüm sonucu ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir.

G. Termal İletkenlik

Isıl iletkenlik ölçümleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır (Şekil 2). C-Term TCI (Termal Geçirgenlik Analizi) ile yapılan testlerde, 100*250 mm boyutlarında ve yaklaşık 24 mm yüksekliğinde sıkıştırılmış ve yine 100*250 mm boyutlarında ve yaklaşık 50 mm yüksekliğinde sıkıştırılmamış kompozit levhalar kullanılmıştır. Her bir grup için 6 tekrarlı ölçüm alınmıştır. Numuneler üzerinde termal iletkenliğinin,

20,81 °C ile 21,71 °C arasında değişen sıcaklığa tepkisi ölçülmüştür. Ayrıca, üretilen miselyum kompozit gruplarının kalınlıkları farklı olduğundan her bir grubun ısıl geçirgenlik değeri (R=m2K/W) hesaplanarak karşılaştırılmıştır. Hesaplamada R değeri, kompozit levha kalınlığının ısıl iletkenlik hesap değerine bölünmesi ile elde edilmiştir (Türk Standardları Enstitüsü, 1999b).



Şekil 2. Isı iletkenlik test düzeneği.

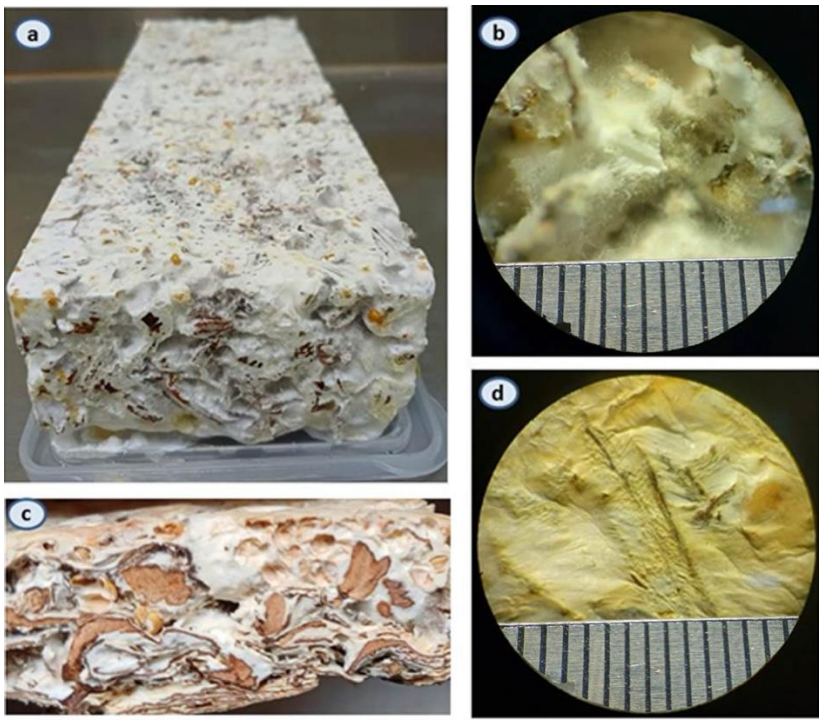
H. İstatiksel Analiz

Miselyum esaslı kompozit levhalarda sıkıştırma durumunun su alma ve kalınlığına şişme oranları üzerine etkisinin test edilmesinde iki yönlü varyans analizi (Two-Way ANOVA) uygulanmıştır. Ayrıca sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış levhaların yoğunluk ve termal iletkenlik değerleri bağımsız örneklem t-testi ile karşılaştırılmıştır.

III. BULGULAR ve TARTIŞMA

A. Morfolojik Analiz

İnkübasyonu tamamlanmış miselyumlar yetiştirme kabından çıkarıldığında bütünlüğünü koruyabilecek şekilde kalıp haline geldiği gözlemlenmiştir. Yüzey kısımlarında miselyum ağ tabakası ile kaplanmış (Şekil 3a) ve zuruf yüzeylerinin de tamamen beyaz bir ağ tabakası ile kaplanmış şekilde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3b). Sıkıştırılan miselyum levhadan kesit alındığında ise miselyumun iç kısımlarında zurufların mantar hüfleri ile sıkıca sarıldığı görülmektedir (Şekil 3c). Ayrıca sıkıştırılan miselyum levhanın kurutulduktan sonra yüzeyinin keçeleşerek sağlam bir katman oluşturduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3d).



Şekil 3. Kalıptan çıkarılmış kompozit bloklar (a ve c) ve Stereo mikroskop yardımı ile yapılan morfolojik analizler (b ve d, 10x [Ölçekteki iki çizgi arası bir mm'yi temsil etmektedir.]).

B. Yoğunluk

Miselyum esaslı kompozit malzemelerin yoğunluğunun, 0,097 ila 0,21 g/cm3 arasında değiştiği tespit edilmiştir (Tablo 1). Yapılan istatistiki değerlendirmede, sıkıştırılmış levhaların yoğunluğunun sıkıştırılmamış levhalara göre istatistiksel olarak daha yüksek olduğu tespit edilmiştir ($p<0,05$). Elde edilen bu yoğunluk değerleri yalıtım malzemesi olarak değerlendirme potansiyeli olan ahşapla karşılaştırıldığında, iğne yapraklı ağaçlar (0,35 – 0,55 g/cm^3) ve geniş yapraklı ağaçlar (0,45 – 0,90 g/cm^3) göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir (Green vd., 1999; UNECE, 2010). Çalışma kapsamında elde edilen yoğunluk değerleri, daha önce ayçiçeği saplarından Pleutorus ostreatus mantarı ile yapılan miselyum esaslı kompozitlerde elde edilen 0,173 g/cm^3'lük yoğunluk değeri ile benzerlik göstermektedir (Bayomei vd., 2026).

Tablo 1. Yoğunluk testi.

	Sıkıştırılmış	Sıkıştırılmamış
Ortalama hacim(cm^3)	570,2	1245
Ortalama ağırlık (g)	121,4	121
Ortalama yoğunluk (g/cm^3)	**0,210 ± 0,0032**	**0,097 ± 0,0030**

C. Su Emme Testi

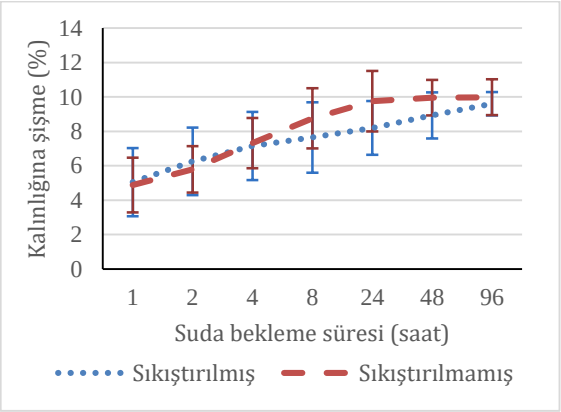
Yapılan su emme testi sonucunda, levha kalınlığında şişme ve su alma oranları tespit edilmiştir (Şekil 4). Elde edilen sonuçlara göre, sıkıştırılmış numunelerde kalınlığına şişme oranı ilk 1. saatte %5 iken, 96 saatlik süre sonunda yaklaşık %9 seviyelerine ulaşmıştır. Sıkıştırılmamış numunelerde ise ilk 1. saatte ortalama %5 ile başlayan şişme oranının, 24. saatte yaklaşık ortalama %8 seviyesine ulaştığı ve 96. saatin sonunda %9,6 seviyesine ulaştığı görülmüştür. İki tür numunede de kalınlığına şişme oranında 96 saat içinde toplam yaklaşık %9'luk bir fark oluşmuştur.

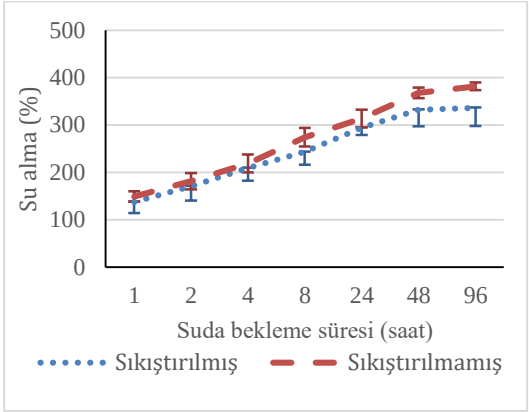


Şekil 4. Su emme test süreci ve 96 saat sonunda bütünlüğünü koruyan numuneler.

Su alma oranları bakımından incelendiğinde ise sıkıştırılmış numunelerde ilk 1. saatte %140 artış olurken 48. saat sonunda %340 seviyelerine ulaşmış ve bu değer 96 saat sonrasında da sabit olarak kalmıştır. Sıkıştırılmamış numunelerde ise bu değişimin 1. saatte yaklaşık %150 artış göstermiş, 48. saatte bu oran %368 seviyesine ulaşmış ve 96. saattin sonunda ise %380 seviyesine ulaştığı görülmüştür. Numunelerin su emmelerine karşılık, yapısal bir dağılma ve şekil değişimine uğramadıkları gözlemlenmiştir (Şekil 5). İstatistiksel analiz sonuçlarına göre sıkıştırma durumu ($F=24,005$, $p<0,05$) su alma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye sahipken kalınlığına şişme üzerinde sıkıştırma durumu tek başına anlamlı bir etki göstermemiştir ($F=3,959$, $p>0,051$). Ancak suda bekleme süresinin gerek su alma, gerekse kalınlığına şişme oranlarının üzerindeki etkisi istatistiki olarak anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$).

Su alma oranlarının yüksek olması malzemenin fiziksel olarak boşluklu bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Miselyumun hem zuruf parçalarının yüzeylerini sarması hem de hüflerin kendi içerisinde oluşturduğu ağ yapısı sayesinde her ne kadar boşluklu yapıya su girip malzeme ağırlığında zamanla artış sağlamış olsa da miselyum levhanın kalınlığına şişmesi miselyumun su itici etkinliği nedeniyle 96 saatlik bekleme sonunda %9'larda kalmıştır.



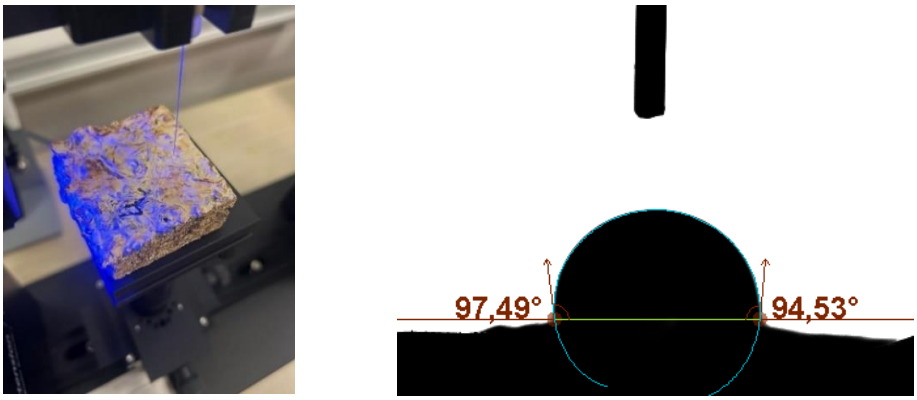


Şekil 5. Sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numunelerin kalınlığına şişme ve su alma oranları.

Daha önce miselyum bazlı kompozit levhalar üzerine yapılan çalışmalarda 48 ile 192 saatlik suda beklemeleri sonucunda, %40-580 arasında su alma oranları elde edilmiştir (Gezer vd., 2024).

D. Temas Açısı Ölçümü

Yüzey özellikleri dikkate alınarak temas açısı testi sadece daha düzgün yüzey özelliklerine sahip olan sıkıştırılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Temas açısı ölçüm sonuçlarına göre damlanın miselyum yüzeyine temas anındaki açının 95°'ye kadar çıkan bir değerde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6). Temas açısının damlanın miselyum üzerinde bekletilmesi ile uzun bir süre (50 sn) değişim göstermediği belirlenmiştir. Bu durumda üretilen miselyum yüzeylerinin yüzey gerilimlerinin oldukça yüksek olduğu ve miselyum ile kaplanmış yüzeylerin rutubete karşı itici bir özellik kazandığı söylenebilir. Daha önce farklı mantar türleri ile yapılan selüloz lif esaslı köpük miselyumunun farklı temas açısı değerleri verdiği tespit edilmiştir. Örneğin Trametes versicolor mantarında temas açısı ~120° iken, P. ostreatus mantarında ~70° olduğu belirtilmiştir (Amstislavski vd., 2024).



Şekil 6. Sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numunelerin kalınlığına şişme ve su alma oranları.

E. Termal İletkenlik

Sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numunelerin, 20,8 °C ile 21,7 °C arasında değişen sıcaklığa karşı tepkisi ölçülmüştür. 90 dakika sürdürülen testler sonucunda sıkıştırılmış numunede lambda değerinin 0,036 ± 0,001 W/mK değerinde, sıkıştırılmamış numunede ise 0,030 ± 0,001 W/mK değerinde olduğu tespit edilmiştir. İstatistiksel olarak sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numuneler arasında fark anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Isıl geçirgenlik direnç değerleri sıkıştırılmış numunelerde ortalama 0,69 m2K/W iken sıkıştırılmamış numunelerde ortalama 1,66 m2K/W olarak tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen sıkıştırılmış ve sıkıştırılmamış numunelerin taşyünü, camyünü ve mineralyün ile karşılaştırılması Tablo 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. Termal iletkenlik.

Grup	Kalınlık (d)	Isıl İletkenlik (λ)	Isıl Direnç (R=d/λ)
Sıkıştırılmış	25 mm	0,036	0,69
Sıkıştırılmamış	50 mm	0,030	1,66
Taşyünü, cam yünü ve mineral yün (Jelle, 2011)	50 mm	0,030-0,040	1,66-1,25

IV. SONUÇ

Araştırma kapsamında, fındık zurufu içerisinde geliştirilmiş mantar misellerinin kalıplar içerisinde bekletilmesi ile elde edilen numunelerin üretim süreçleri ve elde edilen malzemeler üzerinde gözlem ve incelemeler yapılmış, testler uygulanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda bio-kompozit panel numunelerinde dış yüzeylerin misel ile örtülme oranlarının oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir. Stereo mikroskop incelemeleri ile levhaların iç kısımlarında da yoğun bir misel oluşumunun bulunduğu ve zuruf ile hüflerin birbirleri ile bütünleşmiş olduğu görülmüştür. Özellikle sıkıştırılmış numunelerde, düzgün yüzey ve ince panel kalınlığına ek olarak elde edilen diğer performans değerlerinin de olumlu çıkması, malzemenin yapılarda yalıtım amaçlı kullanım potansiyelinin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. Diğer yandan, sıkıştırılmamış numunelerde elde edilen oldukça düşük termal iletkenlik değeri (0,030 ile 0,032 W/mK), dış yüzeyleri düzgün olmasa da malzemenin sıkıştırılmadan da kullanılabileceği alanlar olabileceğini göstermektedir. Üretilen miselyum levhaların yoğunluğu düşük ve boşluk oranının yüksek olmasından dolayı yüksek su emme oranına (1. saatte %140, 96. saatte %380) sebep olmuştur. Ancak misellerin bağ yapısı oluşturması nedeniyle genişleme oranının (%5-9) az olmasına ve biçimsel deformasyona uğramamalarına neden olmuştur. İleride malzemenin su alma oranlarının azaltılmasına yönelik yeni çalışmalar ile yüksek rutubet riskinin hâkim olduğu alanlarda kullanım olanaklarını daha da arttıracaktır.

Tüm bu sonuçlar dikkate alınarak, başlangıçta hedeflenen, bio-kompozit ısı yalıtımı paneli elde etme amacının; üretim süreçleri ve panel boyutlarıyla ilgili yapılabilecek farklı denemeler ve bazı akustik ve mukavemet testleri ile yüksek mukavemet gerektirmeyen özellikle iç mekân dikey yüzeyler için yalıtım panelleri geliştirmeye doğru evrilebileceği söylenebilir. Çalışma temelde tarımsal atık olan zuruftan miselyum esaslı kompozit üretim süreç ve koşullarına odaklanmakta olup, mekanik ve akustik testlerin yapılmaması bu çalışmanın temel sınırlılığını oluşturmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, miselyum esaslı biyo-kompozit yapı malzemesi üretiminde zuruf kullanımının hem atıkların geri kazanımında hem de yüksek nitelikli yalıtım malzemesi üretiminde olumlu etkiler yaratma potansiyeline sahip olduğu ortaya konmuştur.

BEYANLAR

Teşekkürler: Makaleye yazarlar dışında katkı sağlayan herhangi bir kişi veya kurum bulunmamaktadır.

Yazar Katkıları: Kavramsallaştırma: HA, MY, SÇ; Veri düzenleme: SÇ, MY; Biçimsel çözümleme: HA, MY, SÇ; Araştırma: HA, MY, SÇ; Yöntembilim: HA, MY, SÇ; Kaynaklar: HA, SÇ; Yazılım: HA, MY, SÇ, Denetim: HA, MY, SÇ; Doğrulama: HA, MY, SÇ; Görselleştirme: SÇ; Yazım–özgün taslak: HA, MY, SÇ; Yazım–gözden geçirme ve düzenleme: MY.

Çıkar Çatışması: Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

Destekleyen Kuruluşlar: Bu araştırma için herhangi bir dış finansman alınmamıştır.

Etik Onay: Bu çalışma insan veya hayvan katılımcıları içermemektedir. Tüm prosedürler bilimsel ve etik ilkelere uygun olarak gerçekleştirilmiş olup, atıfta bulunulan tüm çalışmalar uygun şekilde kaynak gösterilmiştir.

İntihal Beyanı: Bu makale intihal açısından değerlendirilmiş ve herhangi bir intihal vakası tespit edilmemiştir.

YZ Araçlarının Kullanımı: Yazarlar, bu makalenin hazırlanmasında Yapay Zeka (AI) araçlarının kullanılmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR

Aktaş, S. (2025). Thermal conductivity analysis of mycelium- based composites derived from *Pleurotus Ostreatus* and sunflower seed husks. *Applied Ecology and Environmental Research*, *23*(5), 9603-9615. https://doi.org/10.15666/aeer/2305_96039615

Alaneme, K. K., Anaele, J. U., Oke, T. M., Kareem, S. A., Adediran, M., Ajibuwa, O. A., & Anabaranze, Y. O. (2023). Mycelium based composites: A review of their bio-fabrication procedures, material properties and potential for green building and construction applications. *Alexandria Engineering Journal*, *83*, 234–250. https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.10.012

Amstislavski, P., Pöhler, T., Valtonen, A., Wikstörm, L., Harlin, A., Salo, S., Jetsu, P., & Szilvay, G. R. (2024). Low-density, water-repellent, and thermally insulating cellulose-mycelium foams. *Cellulose*, *31*, 8769–8785 https://doi.org/10.1007/s10570-024-06067-5

Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti , M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., Krijgsheld, P., & Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials and Design*, *161*, 64–71. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027

Barta, D.-G., Simion, I., Tiuc, A.-E., & Vasile, O. (2024). Mycelium-based composites as a sustainable solution for waste management and circular economy. *Materials*, *17*(2), Article 404. https://doi.org/10.3390/ma17020404

Bayomei, A., Bassuoni, M. T., & Shalaby, A. (2026). Evaluation of mycelium-based composites grown on sunflower seed shell and oat husk substrates inoculated with *Trametes versicolor* and *Pleurotus ostreatus*. *Materials Today Sustainability*, *33,* Article 101319. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2026.101319

Biby, S. R., Surendran, V., & Kundanati, L. (2025). Mycelium biocomposites from agricultural and paper waste: Sustainable alternative to plastic foam based secondary packaging. *Bioresource Technology Reports*, *31,* Article 102177. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102177

Camilleri, E., Narayan, S., Lingam, D., & Blundell, R. (2025). Mycelium-based composites: An updated comprehensive overview. *Biotechnology Advances, 79,* Article 108517. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108517

Canda, K., Ducut, E., Laxamana, J. C., Manganti, J. M., Mercado, J. P., Velasco, B. J., Culala, J., & Malonzo, A. (2023). Mycelium-based composite: An experimental study on the utilization of sawdust and glass fines as substrates for potential fungi-based bio-formed insulation board. *International Journal of Progressive Research in Science and Engineering, 4*(6), 103–112. https://journal.ijprse.com/index.php/ijprse/article/view/901/869

Dok, M. (2014, 28–29 Mayıs). Karadeniz bölgesinin tarımsal atık potansiyeli ve bunlardan pelet yakıt olarak yararlanılması. *Enerji Tarımı ve Biyo Yakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı*, Samsun, Türkiye (pp. 211–222).

Gezer, E. D., Uçar, E., & Gümüşkaya, E. (2024). Physical and mechanical properties of mycelium-based fiberboards. *BioResources, 19*(2), 3421–3435. https://doi.org/10.15376/biores.19.2.3421-3435

Green, D. W., Winandy, J. E., & Kretschmann, D. E. (1999). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-113). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. https://research.fs.usda.gov/treesearch/7149

Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions–properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*, *43*(10), 2549-2563. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015

Jiménez-Obando, G., Arcila, J. S., Tolosa-Correa, R. A., Valencia-Cardona, Y. L., & Montoya, S. (2025). Development and characterization of mycelium-based composite using agro-industrial waste and *Ganoderma lucidum* as insulating materia. *Journal of Fungi*, *11*(6), Article 460. https://doi.org/10.3390/jof11060460

Kim, J. W., Dognini, C., Shams, A., Pecchia, J., Zhu, Y., Yang, Y., Jing, Y., & Gürsoy, B. (2026). From edible mushrooms to sustainable materials: Sound absorption of mycelium-based composites cultivated on spent mushroom substrates. *Applied Acoustics*, *241,* Article 111000. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.111000

Mohseni, A., Vieira, F. R., Pecchia, J. A., & Gürsoy, B. (2023). Three-dimensional printing of living mycelium-based composites: Material compositions, workflows, and ways to mitigate contamination. *Biomimetics*, *8*(2), Article 257. https://doi.org/10.3390/biomimetics8020257

Pekşen, A. (2001). Fındık zurufundan hazırlanan yetiştirme ortamlarının *Pleurotus Sajor-Caju* mantarının verimine ve bazı kalite özelliklerine etkisi. *Bahçe, 30*(1–2), 37–43. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/39571

Saez, D., Grizmann, D., Trautz, M., & Werner, A. (2022). Exploring the binding capacity of mycelium and wood-based composites for use in construction. *Biomimetics, 7*(2), 78. https://doi.org/10.3390/biomimetics7020078

Song, X., Chen, S., Wu, J., Cai, Z., Zhang, Y., Na, R., Lv, H., He, C., Wu, T., & Wang, X. (2025). The effects of the substrate length and cultivation time on the physical and mechanical properties of mycelium-based cushioning materials from *Salix psammophila* and peanut straw. *Biomimetics*, *10*(6), Article 371. https://doi.org/10.3390/biomimetics10060371

Türk Standardları Enstitüsü. (1999a). *Ahşap esaslı levhalar – Birim hacim ağırlığının tayini (TS EN 323)*. https://www.tse.org.tr

Türk Standardları Enstitüsü. (1999b). *Binalarda ısı yalıtım kuralları (TS 825)*. https://www.tse.org.tr

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). (2010). *Forest product conversion factors for the UNECE region* (Discussion Paper No. 49). United Nations. https://unece.org/fileadmin/DAM/timber/publications/DP-49.pdf

Volk, R., Schröter, M., Saeidi, N., Steffl, S., Javadian, A., Hebel, D. E., & Schultmann, F. (2024). Life cycle assessment of mycelium-based composite materials. *Resources, Conservation & Recycling*, *205,* Article 107579. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107579