Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi
Furniture and Wooden Material Research Journal
Araştırma Makalesi - Research Article 2026 - 9(1), 103-114

Eğilmeye maruz bırakılan PVC köpük çekirdekli ahşap sandviç levhaların deneysel ve sayısal analizi

Ergün Güntekin*

ÖZ: Bu çalışmada, eğilmeye maruz bırakılan PVC köpük çekirdek ve kontrplak/MDF yüzeyler kullanılarak oluşturulan sandviç levhalar, deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. Sandviç levhalarda çekirdek olarak 60 kg/m^3 yoğunlukta PVC köpük, yüzey malzemeleri olarak kayın kontrplak ve MDF kullanılmıştır. Sandviç katmanları çift bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Çalışmada kullanılan kontrplak ve MDF malzemelerin eğilme özellikleri belirlenerek sayısal modellemede kullanılmıştır. PVC köpük için üretici tarafından belirtilen elastikiyet değeri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, yüzey malzeme türünün PVC köpük çekirdekli sandviç levhaların eğilme davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Kontrplak yüzeyler kullanıldığında, PVC köpük çekirdekli sandviç levhaların eğilmeye rijitliğinin ve dayanımının daha yüksek olduğu bulunmuştur. Test edilen sandviç levhalarda, baskın arıza türü yüzey malzemesinin kırılmasıdır. MDF yüzeylerde üst yüzeyde kırışma ve MDF/çekirdek kırılması gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, sayısal modellerin, malzemelerin akma gerilmesi ve teğet modülü (plastik bölge) kullanılarak sandviç levhaların kırılmaya kadar olan eğilme davranışını doğru bir şekilde tahmin etmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: MDF, Kontrplak, PVC köpük sandviç, Sonlu Eleman Analizi

Experimental and numerical analysis of PVC foam core wood sandwich panels subjected to bending

ABSTRACT: In this study, sandwich panels created using PVC foam core and plywood/ MDF surfaces subjected to bending were analyzed using experimental and numerical methods. The sandwich panels used PVC foam with a density of 60 kg/m³ as the core and beech plywood and MDF as the surface materials. The sandwich layers were bonded using a two-component epoxy adhesive. The bending properties of the plywood and MDF materials used in the study were determined and used in numerical modeling. The manufacturer's specified E value was used for the PVC foam. The results of the study showed that the type of surface material significantly affects the bending behavior of PVC foam core sandwich panels When plywood surfaces are used, PVC foam core sandwich panels have been found to have higher bending rigidity and strength. In the tested sandwich panels, the dominant failure type was fracture of the surface material. In MDF surfaces, wrinkling on the top surface and MDF/core fracture were observed. The results of the study demonstrate that numerical models can be used to accurately predict the bending behavior of sandwich panels up to fracture using the yield stress and tangent modulus (plastic region) of the materials.

Keywords: MDF, Plywood, PVC foam sandwich, Finite Element Analysis

Makale tarihçesi: Geliş:27.03.2026, Düzeltme: 05.06.2026, Kabül:05.06.2029, Yayınlanma:19.06.2026, *ergun.guntekin@btu.edu.tr
[1]Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye

Atıf: Güntekin, E., (2026), Eğilmeye maruz bırakılmış PVC köpük çekirdekli sandviç levhaların deneysel ve sayısal analizi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 9 (1), 103-114, https://doi.org/10.33725/mamad.1917335

1 Giriş

Sandviç levhalar yüksek elastikiyet modülü ve dirence sahip dış katmanlardan ve düşük yoğunluklu bir orta katmandan (çekirdek) oluşan yapısal malzemelerdir (Birman ve Kardomateas, 2018). Ahşap esaslı sandviç levhalarda, dış katmanlar genellikle yüksek mukavemetli ahşaptan yapılmış kaplama veya kontrplak (Plywood) olup, çekirdek ise yonga levha (PB), orta yoğunluklu lif levha (MDF), yönlendirilmiş şerit yonga levha (OSB), plastik, köpük, kağıt veya ahşap dışı malzemelerden meydana gelen çekirdek gibi ahşap esaslı malzemelerden oluşabilir (Klímek ve ark., 2016). Sandviç levhaların çekirdek katmanı esas olarak yükü iletmek için kullanılır. İşlevi, iki katman arasındaki mesafeyi sağlamak ve levhaların atalet momentini ve eğilme rijitliğini artırmaktır (Noor ve ark., 1996). Çekirdek malzemenin düşük yoğunluğu nedeniyle, sandviç levha aynı taşıma kapasitesi altında ağırlığını büyük ölçüde azaltabilir (Sandeep ve Srinivasa, 2020). Ayrıca, orman kaynaklarının sürekli azalması, malzeme tasarrufu ve ağırlığın azaltılması, ahşap esaslı endüstrilerde önemli hale gelmiştir (Labans ve Kalniņs, 2014). Ahşap esaslı ürünlerde sandviç levhaların kullanılması sadece kaynak tasarrufu sağlamakla kalmaz, aynı zamanda ticari ahşap kompozitlerde sıklıkla meydana gelen büyük deformasyonları da önleyebilir.

Sandviç yapıların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Ahşap esaslı sandviç levhalar, metal veya plastikten yapılmış benzer sandviç levhalara iyi bir alternatiftir, çünkü daha hafiftirler ve yoğunluklarına kıyasla daha iyi eğilme rijitliğine sahiptirler (Wei ve ark., 2021). Bu sandviçlerin üretiminde birçok ahşap esaslı veya bitkisel malzeme kullanılabilir (Smardzewski, 2019a). Köpük, mantar (Kawasaki ve Kawai, 2006; Lakreb ve ark., 2015) ve plastik (Kljak ve Brezović, 2007) çekirdekler, yalıtım amacıyla ahşap sandviç levhalarda yaygın olarak kullanılan çekirdek malzemelerdir. Çevre dostu geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak prizmatik çekirdekli sandviç levhaların üretilmesi de mümkündür (Schneider ve ark., 2016). Günümüzde karbon fiberle güçlendirilmiş sandviç levhalara da rastlanmaktadır (Susainathan ve ark., 2018). Ayrıca, sandviç sistemlerinin tipik ahşap esaslı levhaların laminat veya koruyucu ve dekoratif kâğıtlarla kaplanmasından oluştuğu da belirtilmelidir (Nemli ve Çolakoğlu, 2005). Katmanları birbirine yapıştırmak için genellikle ağaç işleme endüstrisinde yaygın olarak kullanılan Polivinil Asetat (PVAc), poliüretan (PU) ve üre-formaldehit (UF) gibi yapıştırıcılar kullanılabilir. Diğer ticari ahşap esaslı levhalarla karşılaştırıldığında, ahşap esaslı sandviç levhaların ısı yalıtımında avantajı vardır (Wei ve ark., 2021). Levha tipi yapıların mekanik özelliklerini kontrol etmenin en etkili yöntemlerinden biri sandviç yapıların kullanılmasıdır (Gozdecki ve Kociszewski, 2021). Çekirdek ve dış katmanların malzemesini, kalınlığını ve tipini değiştirerek, çeşitli özelliklere ve performanslara sahip sandviç levhalar elde edilebilir (Lakreb ve ark., 2015; Smardzewski, 2019b).

Ahşap esaslı sandviç levhaların birçok çeşidi olmasına rağmen, araştırmaların çoğu yoğunluk ve eğilme özelliklerine odaklanmıştır (Kljak ve Brezovic, 2007; Güler ve Ulay, 2010; Ayrılmış ve ark., 2015; Edgars ve ark., 2017; Gozdecki ve Kociszewski, 2021; Köhler ve ark., 2022). Bazı çalışmalar (Labans ve Kalnins, 2014; Schneider ve ark., 2016; Smardzewski, 2019a), sandviç levhaların eğilme rijitliğinin sonlu eleman yöntemiyle tahmin edilebileceğini göstermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi bu tür malzemelerin eğilme rijitliğinin tahmininde zamandan ve mali yönden tasarruf sağlayabilir.

Günümüzde, birçok alanda (denizcilik, otomotiv, inşaat, mobilya vb.) köpük çekirdek kullanımı yaygınlaşmaktadır (Al ve ark., 2024). Farklı köpük kullanılarak üretilen ahşap yüzeyli sandviç levhalar birçok araştırmanın konusu olmuştur. Güler ve Ulay (2010) 3.5 mm kalınlığında kavak ve okume kontrplak yüzey ve PU köpük çekirdek kullanılan sandviçlerden yaklaşık 120-300 kg/m^3 yoğunlukta sandviç levha üreterek ve levhalardan yaklaşık 10-16

MPa eğilme direnci, 1900-3000 MPa elastikiyet modülü elde etmiştir. Al ve ark. (2024) 5 mm kavak kaplama ve farklı kalınlıkta PU çekirdek kullanılarak üretilen sandviçlerde eğilme direncinin 1.2 ile 8.6 MPa, elastikiyet modülünün ise 27.8 ile 190.9 MPa arasında değiştiği göstermiştir. Güntekin ve Uysal (2025) tarafından kayın kontrplak yüzeyli Polistiren (PS) köpük sandviçlerde eğilme direnci ve elastikiyet modülünün sırasıyla 20.28 ve 2213 MPa civarında olduğu bulunmuştur. Polivinil klorür (PVC) köpük olarak da bilinen köpük PVC, dayanıklı, kapalı hücreli, serbest köpüklü bir PVC levha malzemesidir. PVC köpük, düşük yoğunluğu ve hafif ama güçlü bir yapı sağlama özelliğiyle bilinmektedir. PVC köpük çekirdekli sandviçler özellikle tekne ve otomotiv sanayinde cam elyaf ile birlikte kullanılmaktadır ve birçok araştırmaya konu olmuştur (Zniker ve ark., 2023).

Orman kaynaklarının sürekli azalmasıyla birlikte, kaynak tasarrufu ve kütlenin azaltılması mobilya sektöründe önemli bir konu haline gelmiştir (Labans ve Kalniņs, 2014). Yakın zamana kadar ahşap esaslı sandviç levhalar ile ilgili çalışmalar Wei ve ark. (2021) tarafından özetlenmiştir. Yapılan çalışmalarda birçok malzemenin ve konfigürasyonun sandviç levha üretiminde kullanılabileceğini gösterilmiştir. Bu çalışmanın amacı, PVC köpük çekirdekli ve MDF/kontrplak yüzey tabakalı sandviç kompozit levhaların eğilme özelliklerini incelemektir.

Bu amaçla, (i) sandviç levhaların eğilme davranışı deneysel olarak belirlemek için üç nokta eğilme testi uygulanmış ve (ii) deneysel sonuçlar ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2 Materyal ve Yöntem

2.1 Materyal

Çalışmada kullanılan malzemeler farklı tedarikçilerden sağlanmıştır. MDF levhalar yaklaşık 800 kg/m³ yoğunlukta, 4 mm kalınlıkta ve 210 x 280 cm ölçülerindedir. Kontrplak levhalar, 4 mm kalınlığında ve 759 kg/m³ yoğunluğa sahip yüksek neme dayanıklı olup, üç katmanlı doğu kayını ağacından (*Fagus orientalis* L.) üretilmiştir. MDF ve kontrplak levhalar, sırasıyla Starwood AŞ ve Turanlar Ahşap AŞ ürünleridir. PVC köpük levhalar 10 mm kalınlığında, 60 kg/m³ yoğunluğa ve 81 x 57 cm ölçülere sahiptir. Çekirdek malzeme olarak Maricell® M060 PVC köpük malzemesi seçilmiştir. Çalışmada sandviç levhaları üretmek için tam levhalar 400 x 400 mm ölçülerinde kesilmiş ve kontrollü koşullarda (sıcaklık 21°C, bağıl nem %65) muhafaza edilmiştir. Katmanlar arasında yapıştırıcı olarak çift bileşenli epoksi tutkalı kullanılmıştır. A bileşeni (reçine) ve B bileşeni (sertleştirici) karıştırma oranı üretici firma tarafından 2:1 olarak verilmiştir. A ve B bileşenleri bir spatula yardımıyla karıştırılarak yüzey katmalarına uygulanmıştır. Ahşap malzeme yüzeylerine herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Katmanların yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcı miktarı 200 g/m^2'dir (Uysal ve ark., 2022). Üretilen sandviç levhalar, oda sıcaklığında 24 saat boyunca yaklaşık 0.2 MPa basınç altında soğuk preste tutulmuş ve şartlandırmaya bırakılmıştır. Üretilen sandviç levhalardan 50 x 50 mm ölçülerinde yoğunluk örnekleri ve 50 mm genişliğinde eğilme numuneleri kesilmiştir. Eğilme örnekleri, kontrplak yüzeyler için yüzeylerin lif yönü boyunca alınmıştır. Her bir özelliğin belirlenmesinde 7 örnek kullanılmıştır.

2.2 Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında, sandviç üretiminde kullanılan malzemelerin elastikiyet modülü ve eğilme direnci belirlenmiştir. Malzemelerin yoğunluğu ve nem içeriği (MC, %) de hesaplanmıştır. MDF ve kontrplak levhaların eğilme direnci ve elastikiyet modülü TS-EN 310 (1999)'a göre, levhaların yoğunlukları TS-EN 323 (1999)'a göre ve nem içerikleri TS-EN 322 (1999)'a göre hesaplanmıştır. Eğilme elastikiyet modülünü (E, MPa) ve eğilme direncini (σ, MPa) hesaplamak için sırasıyla eşitlik 1 ve 2 kullanılmıştır.

$$E = \frac{\Delta P \times l^3}{4 \times \Delta d \times bh^3} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{3 \times P_{max} \times l}{2 \times b \times h^2} \quad (2)$$

Burada, *ΔP*, yük-deformasyon diyagramının orantılılık bölgesindeki yük artışı (N), *l* açıklık (mm), *Δd*, yükteki artışa bağlı deformasyonların karşılık gelen farklılaşmalar (mm), P_{max} maksimum yük (N), *b* test numunesinin genişliği (mm) ve *t* test numunesinin kalınlığıdır (mm).

Çalışmanın ikinci bölümünde, MDF, kontrplak ve PVC köpük kullanılarak üretilen sandviç levhaların eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Test hızı 6 mm/dakikadır. Eğilme testlerinde 300 mm destek açıklığı kullanılarak yük-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler kullanılarak eğilme rijitliği ve eğilme direnci hesaplanmıştır. Bazı çalışmalarda (Güler ve Ulay, 2010; Smardzewski ve Wojciechowski, 2023; Al ve ark., 2024) sandviç levhaların direnç ve elastikiyetini hesaplamak için eşitlik 1 ve 2'nin de kullanıldığı görülmektedir. ASTM standartlarına (C393/393M-11 ve ASTM D-7250/D-7250M-20) göre, sandviç levhaların yüzeylerinde oluşan gerilmeler (σ) ve eğilme rijitliği (*D*) sırasıyla eşitlik 3 ve 4 yardımıyla hesaplanabilir.

$$\sigma = \frac{P_{max} \times S}{2 \times t(d+c)b} \quad (3)$$

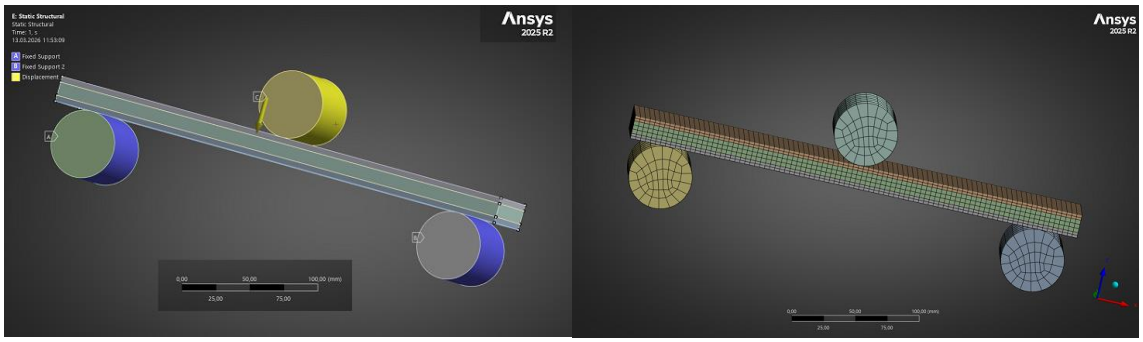
$$D = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12} \quad (4)$$

Burada; P_{max}, maksimum kuvveti (N); *S*, destek noktaları açıklık (mm); *t*, yüzey tabakasının kalınlığı (mm); *d*, sandviç kalınlığı (mm); c, çekirdek kalınlığı (mm); *b*, sandviç genişliğini; *D*, eğilme rijitliğini (N-mm^2); *E*, yüzey malzemesinin elastikiyet modülünü (N/mm^2) ifade etmektedir.

Eğilme testleri SHIMADZU® UTM kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 1). Her örnek grubunda tekrar sayısı yedidir. Tüm testler 21 °C oda sıcaklığında ve %65 sabit bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 1. Çalışmada üretilen sandviç levhaların eğilme testleri

Sayısal hesaplamalar, ANSYS Workbench (Yapısal, statik) v.2025 R2 (ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, ABD) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada izotropik malzeme özellikleri ile beraber akma direnci ve tanjant modülü kullanılmıştır. Akma direnci elastik eğrinin % 0.2'lik kalıcı şekil değiştirme noktasına paralel çizilen bir doğruyla kesiştiği nokta olarak belirlenmiştir. Tanjant modülü ise plastik bölgenin eğimidir. Akma direnci sayısal modelin ayrıklaştırılması, yaklaşık olarak 5000 eleman ve 31000 düğüm noktası kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan modeller (Sonlu Elemanlar Modeli, SEM) ve ağ yapısı şekil 2'de gösterilmiştir. Destek noktaları ve yükleme başlığı için ANSYS kütüphanesinde bulunan çelik malzeme özellikleri atanmıştır. Destek noktaları, yükleme başlığı ve sandviç malzeme arasında 0.2 sürtünme katsayısı tanımlanmıştır. Sandviç levhalara yükleme başlığı ile -12,-15 mm olarak yer değiştirme uygulanmıştır. Sayısal analiz sonucunda, yükleme başlığında oluşan reaksiyon kuvvetleri ve yüzeylerdeki çeşitli noktalardaki gerilmeler çıktı olarak elde edilmiştir. ANSYS kullanılarak yük/deformasyon (rijitlik) eğrileri oluşturulmuştur ve laboratuvarda test edilen gerçek sandviç levhaların rijitlik eğrileriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 2. ANSYS - Statik Yapısal kullanılarak oluşturulan model ve ağ yapısı

3 Bulgular ve Tartışma

Çalışmada sandviç yapımında kullanılan malzemelerin yoğunluğu, nem içeriği (%) ve eğilme özellikleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

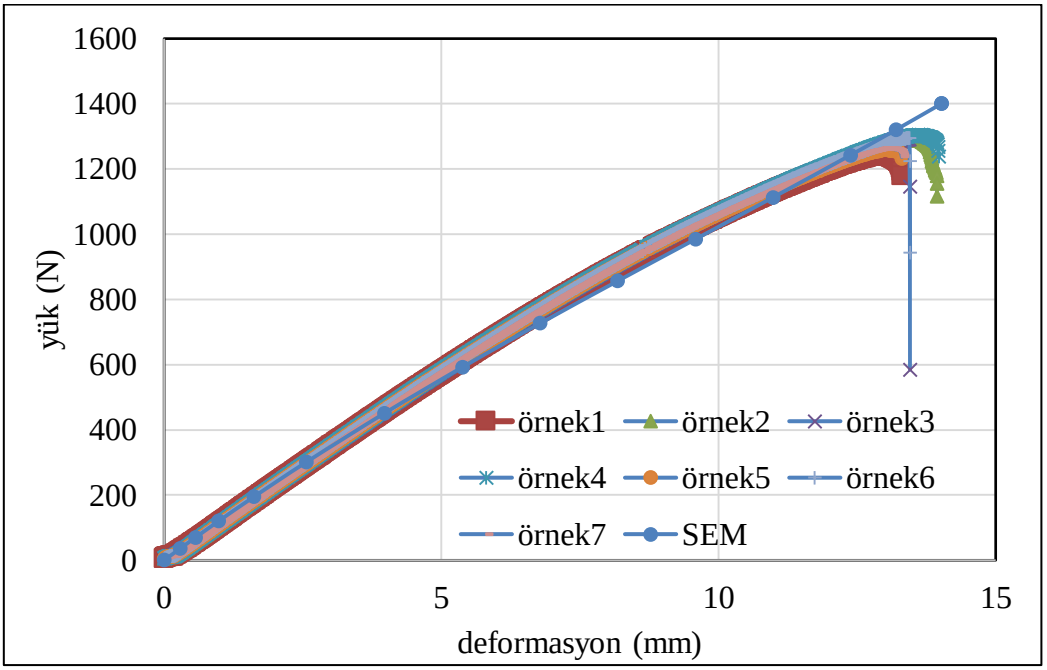
Çizelge 1. Çalışmada test edilen malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Malzeme	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Rutubet (%)**	**E (N/mm^2)**	**σ (N/mm^2)**	**Akma Direnci (N/mm^2)**	**Tanjant modülü (N/mm^2)**
MDF	799 (4.16)	8.1 (0.13)	3200 (55)*	31,98 (1.25)	28,73 (1.12)	1250 (23)
Kontrplak	769 (38.4)	11.3 (0.42)	10066 (765)	118 (4.6)	92 (2.52)	4220 (218)
PVC köpük (Maricell© M060)**	60		67	0.98		

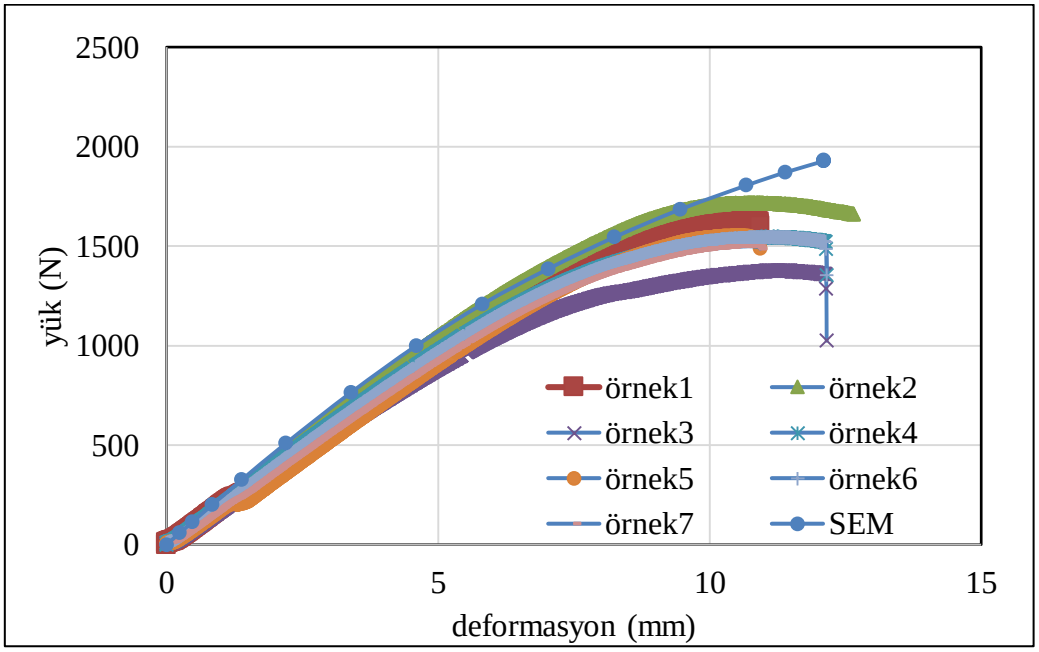
* Parantez içindeki değerler standart sapmayı göstermektedir, **üretici firma basma testi verileri

Şekil 3 ve 4, MDF ve kontrplak yüzeylere sahip PVC köpük sandviç levhalardan elde edilen eğilme testi sonuçlarını ve sayısal modellemeyi göstermektedir. MDF yüzeye sahip PVC köpük sandviç levhaların yük-deformasyon eğrileri doğrusala yakındır. Buna karşılık, kontrplak yüzeye sahip PVC köpük sandviç numunelerin yük-deformasyon davranışı doğrusal

değildir. Kontrplak orta katmanlarında liflere dik gerilmelerin oluşması bu sandviçlerin davranışına yansıdığı sonucuna varılabilir. Kontrplak yüzeye sahip sandviçler için doğrusal olmayan davranış Kljak ve Brezovic (2007), Smardzewski (2019a), Güntekin ve Uysal (2024) ve Güntekin ve Uysal (2025) tarafından da gösterilmiştir. Ahşabın liflere paralel veya dik yöndeki basmadaki gerilme-şekil değiştirme davranışının doğrusal olmadığı iyi bilinmektedir (Goodman ve Bodig, 1971).



Şekil 3. MDF yüzeye sahip PVC köpük sandviç levhaların eğilme davranışı ve nümerik modelleme.



Şekil 4. Kontrplak yüzeye sahip PVC köpük sandviç levhaların eğilme davranışı ve nümerik modelleme.

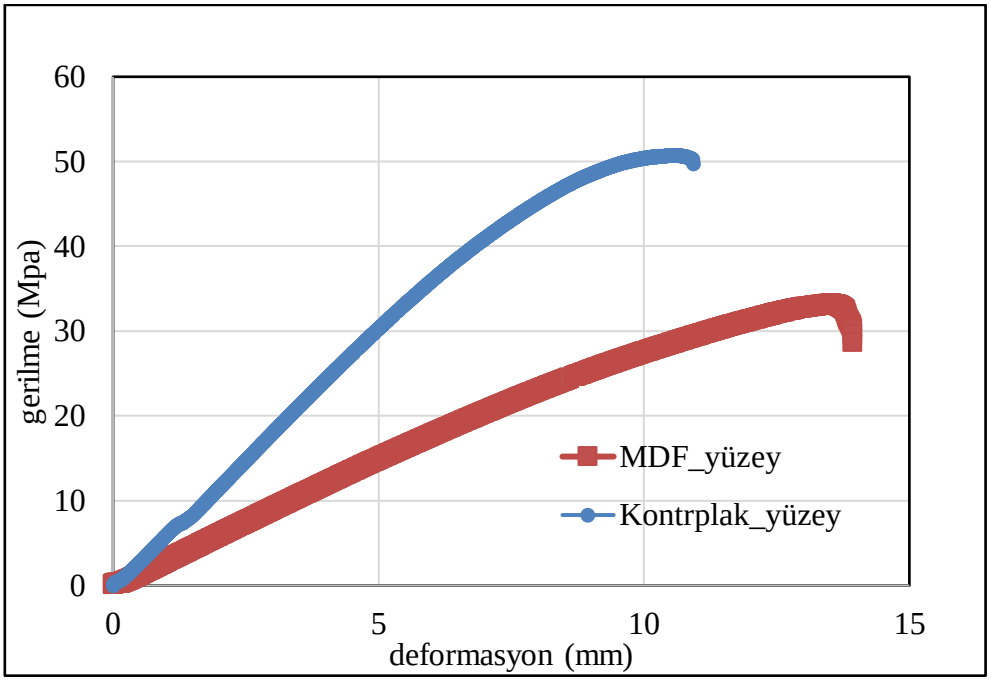
Çalışmada test edilen PVC köpük çekirdekli sandviçlerin yoğunluk, maksimum eğilme dayanımları, elastikiyet değerleri, özgül eğilme dayanımları ve kırılma anındaki deformasyon miktarları çizelge 2'de gösterilmiştir. MDF yüzeyli sandviç levhaların ortalama eğilme direnci, eğilme rijitliği ve kırılma anındaki deformasyon sırasıyla 32.85 N/mm^2. 73.3x10^6 N-mm^2 ve 13.91 mm olarak belirlenmiştir. Kontrplak yüzeyli sandviç levhalar için bu değerler sırasıyla 50.51 N/mm^2. 224.5x10^6 N-mm^2 ve 12.11 mm'dir. Kontrplak yüzeyli sandviç levhaların eğilme dirençleri Kljak ve Brazovic (2007) tarafından bulunanlara benzerdir. Güntekin ve Uysal (2025) tarafından PS köpük için bulunandan yüksektir. Bu araştırmada kullanılan kayın kontrplak yüzeye sahip PVC köpük sandviç levhaların eğilme dirençleri, literatürdeki Güler ve Ulay (2010)'ın yaptığı farklı kalınlıktaki yüzey malzemesi okume ve kavak kontraplak olan PUR köpüklü sandviç levhaların eğilme dirençlerinden yüksek bulunmuştur. Şekil 5 te sandviç levhaların ortalama gerilme-deformasyon eğrileri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları test edilen sandviç levhaların geleneksel ahşap esaslı levhalara göre önemli ölçüde hafif olduklarını göstermiştir. Kontrplak yüzeyli sandviç levhalar, MDF yüzeyli sandviç levhalara göre önemli ölçüde daha dirençli ve daha rijit davranış göstermişlerdir. ANOVA testi sonuçlarına göre; $p<0.000$, F-değeri=30607,366 bulunmuştur. Kontrplak yüzeyli sandviç levhaların, özgül eğilme dayanımı ve özgül rijitlik değerleri karşılaştırıldığında, MDF yüzeyli sandviç levhalara göre sırasıyla yaklaşık %70 ve %260 oranında daha dayanıklı ve rijit olduğunu görülmektedir (Şekil 5). Çekirdekte kullanılan PVC köpük kalınlığı artırılırsa sandviç levha yoğunlukları azaltılabilir.

Çizelge 2. Çalışmada test edilen PVC köpük çekirdekli sandviçlerin maksimum eğilme dayanımları ve rijitlik değerlerinin karşılaştırılması.

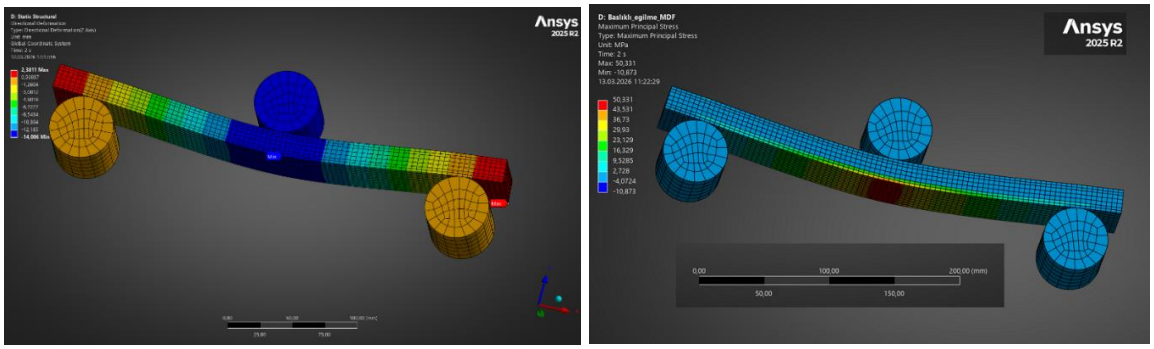
Malzeme	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**σ (N/mm^2)**	**D (N-mm^2)**	**Özgül eğilme direnci N/mm^2/kg/m^3**	**Özgül rijitlik N-mm^2/kg/m^3**	**Kırılma anında deformasyon (mm)**
MDF-PVC köpük sandviç	462 (7.04)	32.85 (0.65)*	73.3x10^6 (566x10^3)	0.071	0.15x10^6	13.91
Kontrplak – PVC köpük sandviç	414 (9.07)	50.51 (2.72)	224.5x10^6 (2.2x10^6)	0.122	0.542 x10^6	12.11

* Parantez içindeki değerler standart sapmayı göstermektedir.

Sayısal ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, sandviç levhaların yük-deformasyon davranışının ANSYS simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu (veya kontrplak yüzeyli sandviçler için gösterildiği gibi kırılamaya yakın biraz daha yüksek bir tahmin içerdiğini) görülmektedir. Sayısal modeller daha ayrıntılıdır ve daha yüksek bir kırılma olasılığının işareti olan gerilme yoğunlaşmalarını göstermiştir (Şekil 6). Literatürde, eğilme yükü altında sandviç levhaların sonlu elemanlar modellemesiyle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Çoğu çalışma, sayısal modeller ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymuştur. Bazı çalışmalarda modellerin sandviç levhaları daha rijit tahmin ettiği görülmektedir (Alade ve ark., 2023). Ahşap malzemedeki iç kusurlar veya düzensizlikler kaçınılmaz olduğundan, sayısal modellerin daha rijit sonuçlar vermesi beklenebilir. Modellemede ortotropik malzeme özelliklerin kullanılması eğilme davranışların modellenmesinde daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlayabilir (Labans ve Kalnin, 2014; Fang ve ark., 2015; Smardzewski, 2019a; Mohammadabadi ve ark., 2019; Mohammadabadi ve ark., 2020).



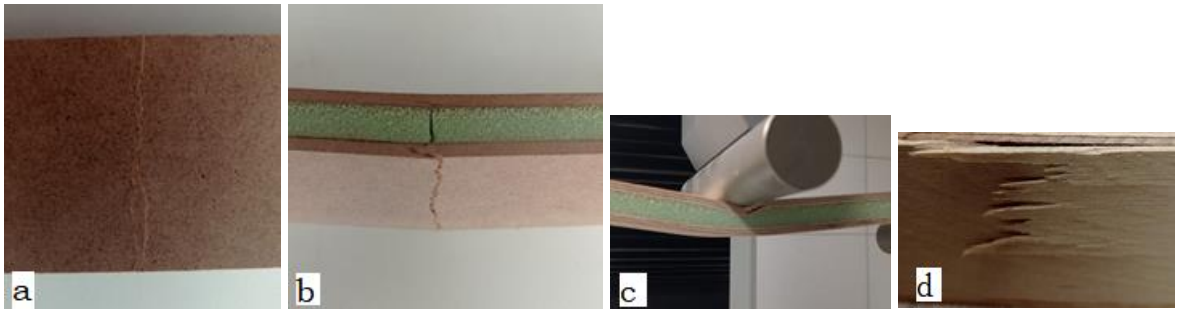
Şekil 5. Kontrplak ve MDF yüzeyli PVC köpük sandviçlerin ortalama gerilme-deformasyon eğrileri.



Şekil 6. ANSYS sonuçları a) deformasyon, b) gerilmeler

PVC köpük çekirdekli levhaların eğilme testlerinde, yaygın arıza türü esas olarak MDF veya kontrplakta meydana gelen üst yüzey buruşması ve ardından oluşan çekirdek ezilmesi ve bunu takip eden çekme yüzeyindeki kırılmalardır (Şekil 7). Köpük malzemelerin daha yüksek kesme dayanımı, gerilme yığılmalarının çekirdekten yüzey malzemesine kaymasına neden olabilir. Kontrplak yüzeylerde görülen tabaka ayrılması veya çatlama bu fikri desteklemektedir. Literatürde belirtildiği gibi, sandviç kirişler için en yaygın arıza modelleri kesme arızası, üst yüzey buruşması ve yüzey kırılmasıdır (Hao ve ark., 2018).

Sonuçlar, gerilme yoğunlaşmasının sandviç levhaların orta kısmında olduğunu göstermiştir. Sandviç levhalar eğilmeye maruz kaldığında, yüzeyde basınç gerilmeleri, alt kısımda ise çekme gerilmeleri etki eder. Sandviçlerin yapımında kullanılan malzemelerin akma gerilmeleri farklı olduğundan, arızaya neden olmaya başlayacak bu gerilmelerin alt değerlerini bilmek önemlidir. Ahşap ve ahşap kompozitlerinde liflere dik yönde direnç ve akma gerilmesi daha düşüktür, dolayısıyla kırılmanın üst yüzeyde başlaması beklenen bir davranıştır.



Şekil 7. MDF yüzeyli sandviçlerde üst yüzey kırışıklığı (a) ve çekmede kırılma (b). Kontrplak yüzeyli sandviçlerde üst yüzey kırışıklığı (c) ve çekmede kırılma (d).

4. Sonuç ve Öneriler

Çalışmanın sonuçları, yüzey malzeme türünün PVC köpük sandviç levhaların eğilme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

- Kontrplak yüzeyli levhaların, MDF yüzey levhalara kıyasla eğilme dayanımı daha yüksektir.
- Kontrplak yüzeyli levhaların, MDF yüzey levhalara kıyasla eğilme rijitlikleri daha yüksektir.
- Sayısal modeller, çalışmada üretilen sandviç levhaların eğilme davranışının tahmininde başarıyla kullanılmıştır.
- Sayısal modeller, farklı kalınlıklara sahip yeni sandviç malzemelerin davranışını tahmin etmek için uyarlanabilir.
- Sandviç bileşenlerinin doğrusal olmayan davranışı, akma direnci ve tanjant modülü gibi malzeme özellikleri kullanılarak daha gerçekçi tahmin edilebilir.
- Zamanın ve maliyetin çok önemli olduğu özel sektörde PVC çekirdekli sandviç yapıların sonlu elemanlar analiz programları ile tasarım sürecine dahil etmenin zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayacak bir çözüm olduğu düşünülmektedir.

Yazar Katkıları

Ergün Güntekin: Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yapay zekâ (YZ) katkı beyanı

Makalenin herhangi bir bölümünde Yapay Zeka (YZ) araçları kesinlikle kullanılmamıştır.

Kaynaklar

Al, G., Aydemir, D. ve Bakır, K., (2024), Poliüretan köpük esaslı kavak kompozit panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri, *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 26(2), 98 – 106, https://doi.org/10.24011/barofd.1357963

Alade, A. A. and Ibrahim, A., (2023), Application of finite element method for mechanical characterization of wood and reconstituted lignocellulosic-based composites – A review. *Recent Progress in Materials*, 5 (1), 1-24, https://doi.org/10.21926/rpm.2301003

ASTM C393/C393M – 11, (2011), Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D7250 / D7250M-20, (2020), Standard practice for determining sandwich beam flexural and shear stiffness, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Ayrılmış, N., Ulay, G., Bağlı, E. F., ve Özkan, İ. (2015), Ahşap sandviç kompozit levhaların yapısı ve mobilya endüstrisinde kullanımı, *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 15(1), 37-48, https://doi.org/10.17475/kuofd.75615

Birman, V. and Kardomateas, G. A., (2018), Review of current trends in research and applications of sandwich structures, *Composite Part B*, 142: 221-240, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027

Edgars, L., Kaspars, Z. and Kaspars, K., (2017), Structural performance of wood based sandwich panels in four-point bending, *Procedia Engineering*, 172: 628 – 633, https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.073

Fang, H., Sun, H., Liu, W., Wang, L., Bai, Y. and Hui, D., (2015). Mechanical performance of innovative GFRP-bamboo-wood sandwich beams: Experimental and modelling investigation, *Composite Part B*, 79, 182-196, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.04.035

Goodman, J.R. and Bodig, J., (1971), Orthotropic strength of wood in compression. *Wood Science*, 4, 83-94.

Gozdecki, C. and Kociszewski, M., (2021), The properties of sandwich panels made of standard wood-based panels, *Ann. WULS - SGGW, Forestry and Wood Technol*ogy, 114, 125-130.

Güler, C. ve Ulay, G., (2010), Köpüklü kompozit (sandviç) levhaların bazı teknolojik özellikleri, *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, A(2), 88-96.

Güntekin, E. and Uysal, M., (2025). Experimental and numerical analysis of sandwich panels made of different core materials with plywood facing, *Drvna Industrija*, 76 (1), 47-55, https://doi.org/10.5552/drvind.2025.0201

Güntekin, E. ve Uysal, M., (2024), Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kontrplak ile güçlendirilmiş yongalevha ve liflevhanın eğilme davranışının deneysel ve nümerik analizi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 26-37, https://doi.org/10.33725/mamad.1464366

Hao, J., Wu, X., Oporto, G., Wang, J., Dahle, G. and Nan, N., (2018), Deformation and failure behavior of wooden sandwich composites with Taiji honeycomb core under a three-point bending test, *Materials*, 11: 2325, https://doi.org/10.3390/ma11112325

Kawasaki, T. and Kawai. S., (2006), Thermal insulation properties of wood-based sandwich panel for use as structural insulated walls and floors, *Journal of Wood Science*, 52, 75-83.

Klímek, P., Wimmer, R., Brabec, M. and Sebera, V., (2016), Novel sandwich panel with interlocking plywood kagome lattice core and grooved particleboard facings, *BioResources*, 11(1), 195-208, https://doi.org/10.15376/biores.11.1.195-208

Kljak, J. and Brezović, M., (2007), Influence of plywood structure on sandwich panel properties: Variability of veneer thickness ratio, *Wood research*, 52(2), 77-88.

Köhler, R., Jurisch, M., Mayer, A. K., Mai, C. and Viöl, W., (2022), Loofah sandwich panels: The effect of adhesive content on mechanical and physical properties, *Materials*, 15, 7129, https://doi.org/10.3390/ma15207129

Labans, E. and Kalnins, K, (2014), Experimental validation of the stiffness optimization for plywood sandwich panels with rib-stiffened core, *Wood Research*, 59(5), 793-802.

Lakreb, N., Bezzazi, B. and Pereira, H., (2015), Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates, *Materials & Design*, 65, 627-636, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.059

Mohammadabadi, M., Yadamab, V. and Smith, L., (2019), An analytical model for wood composite sandwich beams with a biaxial corrugated core under bending, *Composite Structures* 228, 111316, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111316

Mohammadabadi, M., Jarvis, J., Yadama, V. and Cofer, W., (2020), Predictive models for elastic bending behavior of a wood composite sandwich panel, *Forests*, 11(624), 16, https://doi.org/10.3390/f11060624

Nemli, G. ve Çolakoğlu G., (2005), The influence of lamination technique on the properties of particleboard, *Building and Environment*, 40(1), 83-87.

Noor, A. K., Burton, W. S. and Bert, C. W. (1996), Computational models for sandwich panels and shells, *ASME Applied Mechanics Reviews*, 49(3), 155–199.

Sandeep, S.H. and Srinivasa, C.V., (2020), Hybrid sandwich panels: A Review. *Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*, 25(3), 64-85.

Schneider, C., Zenkert, D., Deshpande, V. S. and Kazemahvazi, S., (2016), Bending energy absorption of self-reinforced poly(ethylene terephthalate) composite sandwich beams, *Composite Structures*, 140, 582-589, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.12.043

Smardzewski, J., (2019a), Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells, *Materials & Design*, 183, 108159, https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108159

Smardzewski, J., (2019b), Wooden sandwich panels with prismatic core – Energy absorbing capabilities, *Composite Structures*, 230, 111535, https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111535

Smardzewski, J. and Wojciechowski, K.W. (2023), Study on the bending and failure behavior of wooden sandwich panels with corrugated core, randomized gaps, and wood defects, *Construction and Building Materials*, 409:133924, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133924

Susainathan, J., Eyma F., De Luycker E., Cantarel A. and Castanie B., (2018), Experimental investigation of impact behavior of wood-based sandwich structures, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 109, 10-19, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.02.029

TS EN 310, (1999), Ahşap esaslı levhalar-Eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, TSE, Ankara, 1999.

TS EN 322, (1999), Ahşap esaslı levhalar-Rutubet miktarının tayini, TSE, Ankara, 1999.

TS EN 323, (1999), Ahşap esaslı levhalar-Birim hacim ağırlığının tayini, TSE, Ankara, 1999.

Uysal, M., Eren, O., Karatay, H. ve Memis, D., (2022), Uludağ göknarı ve karaçam odunlarından elde edilen çapraz lamine kerestelerinin eğilme özeliklerinin incelenmesi, *Türkiye Ormancılık Dergisi*, 23(4), 313-319, https://doi.org/10.18182/tjf.1166361

Wei, P., Chen, J., Zhang, Y. and Pu, L., (2021), Wood-based sandwich Panels: A review, *Wood Research*, 66(5), 875-890, https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.5.875890

Zniker, H., Feddal, I., Ouaki, B. and Bouzakraoui, S., (2023), Experimental and numerical investigation of mechanical behavior and failure mechanisms of PVC foam sandwich and GRP laminated composites under three-point bending loading, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 23, 66–78, https://doi.org/10.1007/s11668-023-01596-w