

PVC esaslı bazı OPK profillerin eğilme davranışının deneysel ve sonlu elemanlar analizi

Ergün Güntekin^{a,*} 

Öz: Ticari olarak üretilen polivinil klorür (PVC) esaslı bazı odun plastik kompozit (OPK) profillerin eğilme özellikleri deneysel ve sayısal yöntemler kullanılarak analiz edilmiştir. İlk olarak, PVC-odun unu kompozitlerinin elastikiyet modülü ASTM D790 standardına göre 3 nokta eğilme testleri kullanılarak küçük numuneler üzerinde belirlenmiştir. Üç farklı OPK profili deneysel olarak test edilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Sayısal modellemede izotropik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, sayısal modellerin OPK profillerinin eğilme davranışının gerçekçi bir şekilde tahmin edilmesinde kullanılabileceğini göstermektedir. OPK profillerinin eğilme rijitlikleri benzer, ancak direnç özellikleri önemli ölçüde farklı bulunmuştur. Çalışma sonuçları OPK profillerin izotropik malzeme özellikleri kullanılarak modellenebileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Eğilme özellikleri, OPK profil, Sonlu elemanlar analizi

Experimental and finite element analysis of some WPC profiles in bending

Abstract: The bending properties of some commercially manufactured WPC profiles were analyzed using both experimental and numerical methods. First, the MOE of PVC-wood flour composites was determined on small samples using 3-point bending tests according to the ASTM D790 standard. Three WPC profiles were experimentally tested and modelled using the finite element method. Isotropic material properties were used in numerical modelling. The study results demonstrate that numerical models can accurately predict the bending behavior of WPC profiles until failure. The bending stiffness of the WPC profiles was similar however the strength properties were significantly different. The results of the study indicate that WPC profiles can be modelled using isotropic material properties.

Keywords: Bending properties, Finite element analysis, WPC profiles

1. Giriş

Son yıllarda sürdürülebilir malzemelere olan talebin hızla artmasıyla, odun-plastik kompozitleri (OPK) birçok araştırmaya konu olmuş ve endüstrinin ilgisini çekmiştir (Echeverria vd., 2017). OPK'ların fiziksel ve mekanik özelliklerine bakıldığında, yeterli rijitlik ve direnç, düşük nem içeriği, düşük kalınlığına şişme, düşük su alma özelliklerine sahip olduğu ve çevresel etkilere karşı dayanıklı oldukları görülmektedir. Bu da OPK'ları hem iç hem de dış mekân uygulamaları için uygun hale getirmektedir (Oksman, 2000; Ashori vd., 2013; Bhaskar vd., 2021). OPK'ların en büyük dezavantajlarından bir ısıya karşı hassas olmalarıdır (Özdemir vd., 2018). OPK'ların fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen faktörler arasında yoğunluk, üretim yöntemi, odun-polimer oranı, odun türü, odun parçacık şekli ve büyüklüğü, polimer türü, odun ununun polimer matris içindeki dağılımı, odun unu ile polimer arasındaki ara yüz yapışması, kullanılan kimyasallar ve oranları gösterilebilir (Haque, 2021; Jian vd., 2022). OPK'ların en önemli uygulamaları yapı sektöründedir. OPK'lar, zemin, korkuluk veya çit, dış cephe kaplaması, otomobil parçaları gibi çok farklı alanlarda kullanılır (Moreno vd., 2021).

Birçok araştırmacı OPK'ların geliştirilmesinde polietilen tereftalat (PET) (Rahman vd., 2013), polipropilen (PP) (Mo vd., 2021), polietilen (PE) (Diouf vd., 2022), polilaktik asit

(PLA) (İlyas vd., 2022), polivinil klorür (PVC) (Mirowski vd., 2021) ve poliüretan (PU) (Mirski vd., 2021) gibi polimerler kullanmıştır. Bunlar arasında PE, PP ve PVC ticari olarak en yaygın kullanılan matrislerdendir. Bu polimerler arasında, ahşap dolgu maddeleriyle güçlendirilmiş polipropilen (PP), çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır (Sanvezzo vd., 2021). Son yıllarda üretilen plastik atık miktarında artış görülmüş ve bu atıkların çevreyle ilgili etkilerini azaltmak için OPK'ların üretimi için tüketici sonrası plastikleri geri dönüştürme girişimleri olmuştur (Ayrılmış vd., 2011).

Yeni OPK malzemelerin veya profillerin endüstriyel üretimi, uygulamadaki performans gereksinimlerini karşılamalıdır. Prototipler, bu yüzden uygun performansın elde edildiğinden emin olmak için kapsamlı denemelere tabii tutulur. Prototipler için bir dizi test gerçekleştirmek yerine, sonlu elemanlar modeli ile testlerdeki koşulları taklit edebilen bir model kullanmak tercih edilebilir. Bu, sayısal modeller çok hızlı bir şekilde istenilen performans özelliklerinin elde edilmesi için kolaylıkla değiştirilebilir. Sonlu elemanlar yöntemi ve analizi (SEM), teori ve uygulamada yapılan araştırmalar arasında en çok kullanılan benzetim yöntemidir (Ameen, 2001). Tasarım aşamasında performans özelliklerini tahmin etmek için SEM benzetimini kullanmak, parametreleri optimize etmek için etkili bir araçtır (Başboğa ve Güntekin, 2016).

✉ ^a Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yıldırım, Bursa

@ ^{*} **Corresponding author** (İletişim yazarı): ergun.guntekin@btu.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 10.06.2025, **Accepted** (Kabul tarihi): 18.11.2025



Citation (Atf): Güntekin, E., 2025. PVC esaslı bazı OPK profillerin eğilme davranışının deneysel ve sonlu elemanlar analizi. Turkish Journal of Forestry, 26(4): 602-609.
DOI: [10.18182/tjf.1714216](https://doi.org/10.18182/tjf.1714216)

SEM kullanılarak OPK davranışını inceleyen çalışma sayısı sınırlı sayıdadır. Dickson vd. (2017), SEM kullanarak karbon, kevlar ve cam elyaf takviyeli naylon kompozitlerin mekanik performansını araştırmıştır. Sonuçlar, kevlar takviyeli naylonun mukavemetinin en yüksek olduğunu, ardından cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin geldiğini göstermiştir. Caminero vd. (2018), kevlar elyaflarıyla takviye edilmiş 3B baskılı termoplastiğin darbe ve hasar direncini doğrulamıştır. Çalışmada, lif yüzdesi arttıkça darbe mukavemetinin arttığı bildirilmiştir. Alharbi vd. (2020), SEM kullanarak 3B baskılı polilaktik asidin (PLA) tek eksenli gerilme-şekil değiştirme tepkisini incelemiş ve deneysel verilerle doğrulamıştır. Bhandari vd. (2018), SEM kullanarak malzemelerin elastik tepkisini tahmin etmek için polieterimid malzemeden oluşan 3B yazdırılmış bir model oluşturmuştur. Model kullanarak yapılan tahmin ve deneysel verileri arasında %19,6'ya varan bir fark görülmüştür. Roy vd. (2018), %100 geri dönüştürülmüş odun + polipropilenden üretilmiş OPK'ların çekme ve eğilme analizini deneysel yöntemlerle ve SEM kullanarak gerçekleştirmiştir. SEM sonuçları ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum görülmüştür. Benzer şekilde, Bhaskar vd. (2021), geri dönüştürülmüş polimer ve çam odun unundan üretilen OPK'ların üç noktalı eğilme testinin sonuçlarını rapor etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Ezzaraa vd. (2023), 3B yazdırılmış ahşap-PLA kompozitlerin SEM modellerini oluşturmuş ve sonuçları deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, SEM'in 3B yazdırılmış OPK'ların mekanik özelliklerini tahmin etmek ve iç gözeneklerin etkilerini anlamak için etkili bir sayısal yöntem olduğunu göstermiştir. Çalışma, OPK'ların elastik özelliklerinin çoğunlukla ahşap hacim oranına göre değiştiğini ve elastikiyet modülünün ahşap parçacıklarının eklenmesine dayandığını göstermiştir. SEM ve deneysel sonuçlar arasında önemli ölçüde benzerlik olduğu görülmüştür. Fei vd. (2024), yaptıkları çalışmada prefabrik evlerde yük taşıyıcı kolon olarak OPK'ların kullanılabilirliği

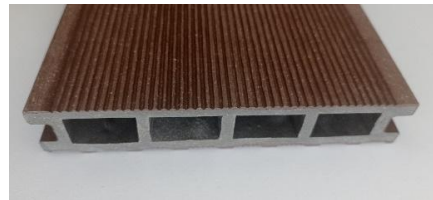
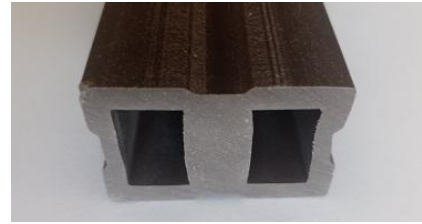
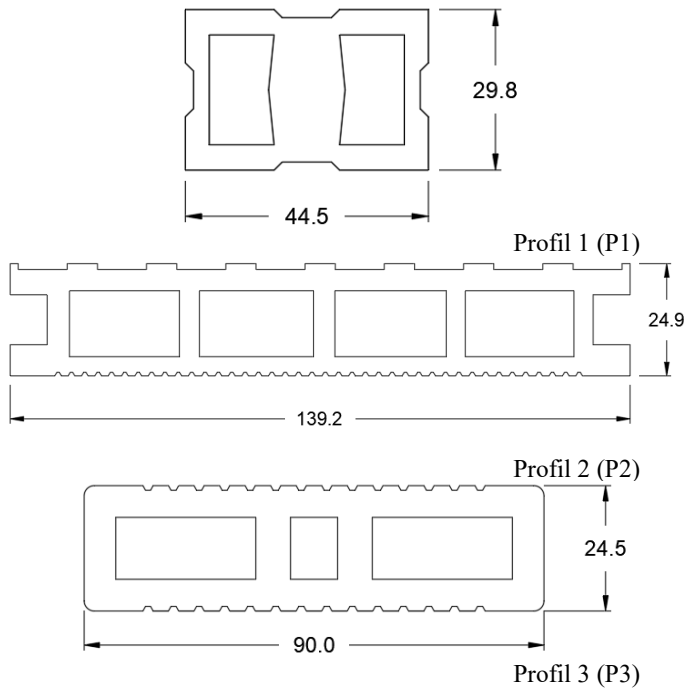
araştırılmıştır. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş edilmiş içi boşluklu OPK kolonlar eksenel basma testleri ile değerlendirilmiştir ve modellenmiştir. SEM sonuçları, deneysel test verileriyle oldukça tutarlı bulunup, modelleme yaklaşımının etkinliğini doğrulamıştır.

Literatürdeki çalışmalarda daha çok standartlarda belirtilen çekme veya eğilme test numunelerinin sonlu elemanlar kullanılarak modellendiği görülmüştür. OPK'lar en çok zemin kaplaması olarak kullanılmaktadır. Bu tür uygulamalarda OPK'lar sıkça eğilme yüklerine maruz kalmakta olup, profil şekilleri kullanım amacına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada, farklı kullanım amacına sahip PVC esaslı OPK profillerin eğilme davranışı deneysel yöntemlerle analiz edilmiş ve mikro yapı özellikleri SEM ile incelenmiştir. SEM analizlerinden elde edilen bulgular, eğilme testlerinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

2. Materyal ve yöntem

2.1. Materyal

Testlerde kullanılan PVC esaslı OPK profilleri, Burplast® firması tarafından ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiştir. OPK'ların üretilmesinde %50 oranında iğne yapraklı ağaç türlerinden elde edilen odun unu ve %50 polivinil klorür (PVC) ile birlikte uyum sağlayıcı, renklendirici ve yağlayıcı kimyasallar kullanılmıştır. Odun unu tanecek boyutu 40 – 60 mesh aralığındadır. Hazırlanan OPK profillerinden 300 mm uzunluğunda eğilme test numuneleri kesilmiştir. Çalışmada kullanılan OPK profil numuneleri ve bunlara ait enine kesit ölçüleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Üretilen üç tip OPK profilinden P2 zeminlerde, P1 ve P3 tipleri ise korkuluk ve çit uygulamalarında kullanılmaktadır. OPK numuneleri, testten önce en az 7 gün boyunca 20°C ve %50 bağıl nemde bekletilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada test edilen OPK profiller ve ölçüleri (mm)
Figure 1. WPC profiles and dimensions (mm) tested in the study

2.2. Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında profillerden yaklaşık 3 mm kalınlığında, 22 mm genişliğinde ve 120 mm uzunluğunda numuneler kesilerek eğilme özellikleri (elastikiyet modülü ve eğilme direnci) ASTM D790 (2017) standartlarına göre belirlenmiştir. Eğilmede elastikiyet modülü ve eğilme direnci eşitlik 1 ve 2 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (1)$$

$$\sigma_f = 3PL / 2bd^2 \quad (2)$$

Burada,

E_B = eğilmede elastikiyet modülü, N/mm²

m = yük-deformasyon eğrisinin başlangıç düz çizgi kısmına teğetin eğimi, N/mm,

L , destek noktaları arasındaki açıklık (mm),

b , test numunesinin genişliği (mm)

d , test numunesinin kalınlığı (mm).

σ_f = orta noktada dış yüzeydeki gerilme, N/mm²,

P = yük-deformasyon eğrisindeki belirli bir noktadaki yük, N,

OPK malzemenin yoğunlukları TS-EN 323 (1999)'a göre belirlenmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde OPK profiller laboratuvarda SHIMADZU® UTM kullanılarak eğilme

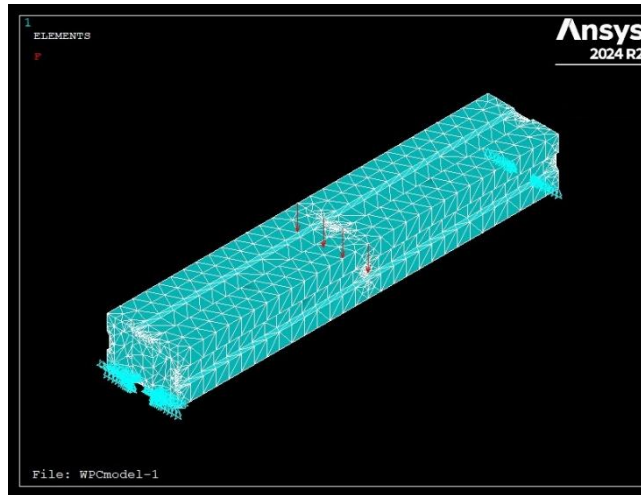
testine tabi tutularak yük-deformasyon eğrileri (P/δ) elde edilmiştir (Şekil 2). Her numune grubu için tekrar sayısı beştir. Tüm testler 21 °C oda sıcaklığında ve % 65 bağıl nemde gerçekleştirilmiştir.

2.3. OPK profillerin sonlu elemanlar analizi

OPK profillerin eğilme davranışını simüle etmek için ANSYS Mechanical APDL (Yapısal, statik) v.2023 (ANSYS, Inc. Canonsburg, Pa, ABD) yazılımı kullanılmıştır. OPK profillerinin tamamen izotropik olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla bir E ve Poisson oranı malzeme özelliği olarak girilmiştir. Li vd. (2022)'ye göre PVC esaslı OPK'larda Poisson oranı sıcaklığa bağlı olarak 0.236 ile 0.312 arasında değişmektedir, 20 °C'deki Poisson oranı 0.248 olarak kabul edilmiştir. Sayısal modelin ayrıklaştırılmasında, SOLID186 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman ile ilgili detaylı bilgi ANSYS kaynaklarında bulunabilir. Profiller modellemede eğilme testlerinde olduğu gibi üst orta açıklıktaki düğümlerinden yüklenmiş ve her iki uçtan basitçe desteklenmiştir. Orta açıklıktaki deformasyon ve gerilmeler sayısal analizin çıktısı olarak kullanılmıştır. Yük/deformasyon (rijitlik) eğrileri ANSYS çıktıları kullanılarak oluşturulmuş ve laboratuvar test edilen gerçek OPK profillerin eğilme eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 3, ANSYS Mechanical APDL kullanılarak oluşturulan modellerden birini göstermektedir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan OPK profillerin eğilme testleri
Figure 2. Bending tests of WPC profiles used in the study



Şekil 3. ANSYS mekanik APDL kullanılarak oluşturulan sayısal model (P1)
Figure 3. Numerical model (P1) created using ANSYS mechanical APDL

3. Bulgular ve tartışma

Çalışmada test edilen OPK malzemelerin yoğunluk ve eğilme özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

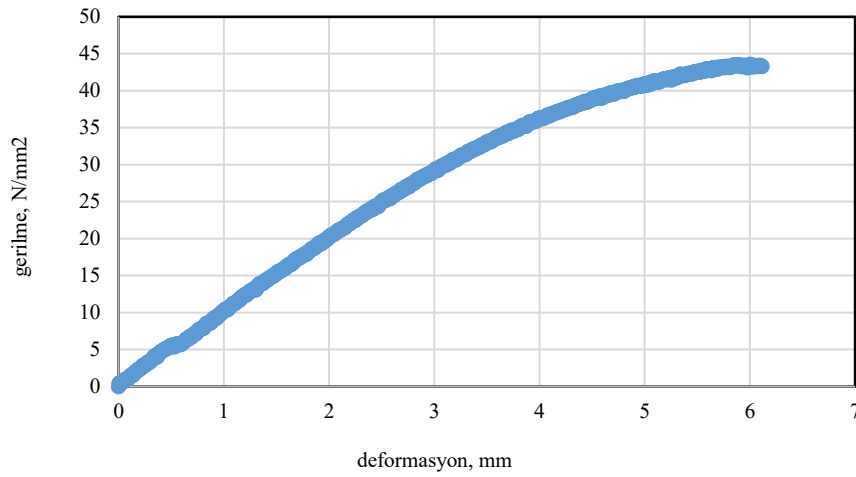
Laboratuvarda test edilen malzemeleri temsil eden ortalama gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4’te gösterilmiştir. OPK numunelerinin eğilme grafikleri sırasıyla doğrusal bölge, akma ve bunu izleyen plastik bölgeye sahip iki doğrusal olarak kabul edilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada test edilen OPK malzemenin eğilme davranışı Duan vd. (2023) tarafından bildirilenlere benzerdir.

Şekil 5-7, 3 faklı farklı profilden elde edilen eğilme testi sonuçlarını ve sayısal modellemeyi göstermektedir. OPK profillerin yük-deformasyon eğrileri, çoğunlukla doğrusal bölgeyi ve ardından kırılmayı içeren plastik davranışı içermektedir.

Çizelge 1. Test edilen OPK malzemelerin yoğunluk ve eğilme özellikleri

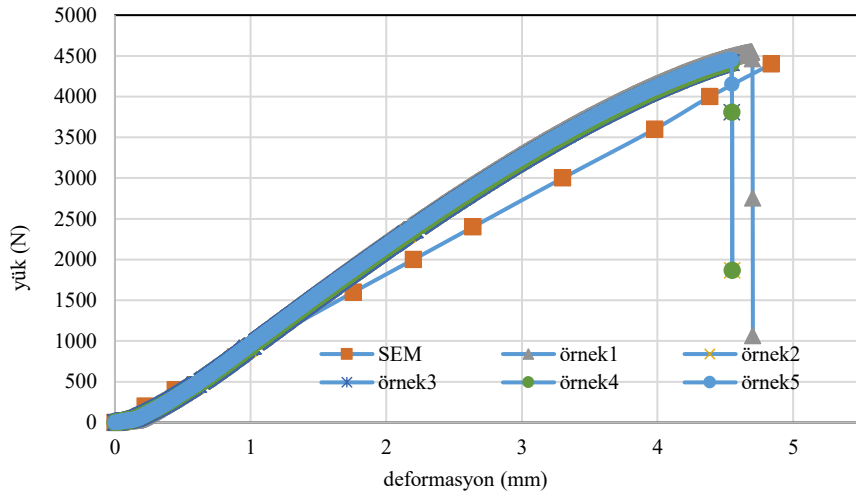
Table 1. Density and flexural properties of the tested WPC materials

Özellik	Ortalama	Standart sapma	Varyasyon katsayısı (%)
Yoğunluk (g/cm ³)	1.11	0.09	8.1
Elastikyet modülü (N/mm ²)	3985	497	12.4
Eğilme direnci (N/mm ²)	43.5	4.38	10



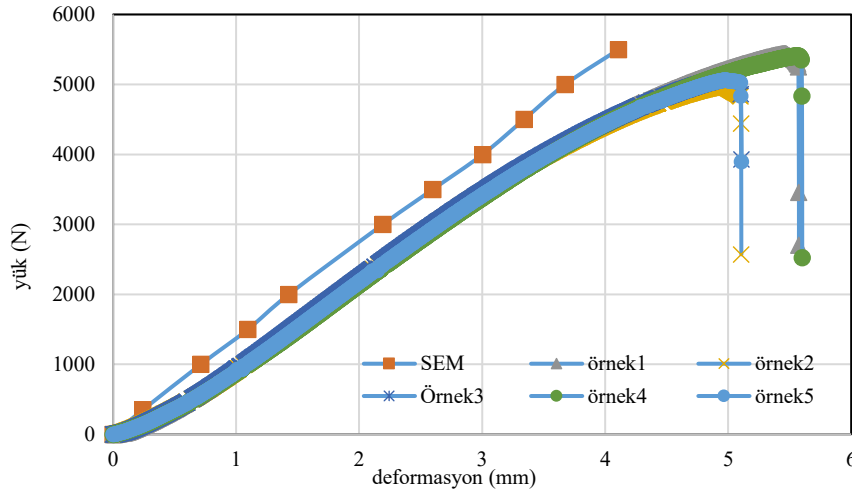
Şekil 4. 3-nokta eğilme testlerinden elde edilen ortalama gerilme-deformasyon eğrisi

Figure 4. Average stress-deformation curve obtained from 3-point bending tests

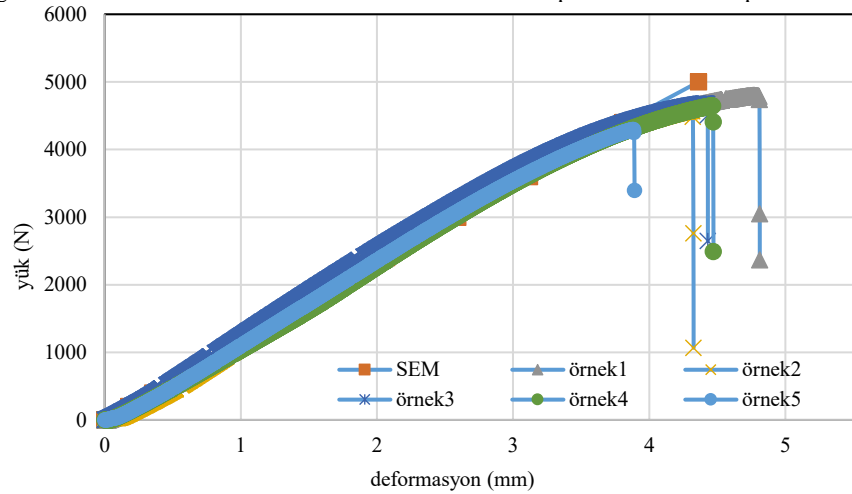


Şekil 5. P1 numunelerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri ve SEM ile karşılaştırılması

Figure 5. Load-deformation curves obtained from P1 samples and their comparison with FEM



Şekil 6. P2 numunelerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri ve SEM ile karşılaştırılması
Figure 6. Load-deformation curves obtained from P2 samples and their comparison with FEM



Şekil 7. P3 numunelerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri ve SEM ile karşılaştırılması
Figure 7. Load-deformation curves obtained from P3 samples and their comparison with FEM

Test edilen profillerden P2 diğer iki profile göre daha yüksek eğilme direncine sahiptir, profillerin rijitlikleri ise benzerdir (Şekil 8). P2 profilin daha çok zemin malzemesi olarak kullanıldığı düşünüldüğünde, bu profilin daha dirençli davranması beklenebilir. Alves ve Martins (2009)'a göre PVC farklı çekme ve basma direncine sahiptir ve maksimum gerilmeye kadar gerilme-şekil değiştirme eğrisi doğrusala yakındır. Bu özellikleri ile ahşap malzemenin basma ve çekme davranışına benzediği söylenebilir. Profillerde kırılmaya yakın davranışın doğrusal olmaması basma yüzeyinde maksimum gerilmeye ulaşılmış olmasına rağmen çekme yüzeyinde yük taşıma kapasitesinin devam etmesi olabilir. Birçok plastik malzeme gibi PVC de sünek gerilme-şekil değiştirme davranışına sahiptir. Ahşap ise çekmede kırılma, basınç altında ise sünek davranır. Bu çalışmada test edilen OPK profillerin eğilme davranışının bu özellikleri yansıttığı söylenebilir.

P1 ve P2 profillerin kırılma anındaki ortalama toplam deformasyonu yaklaşık 4.5 mm olarak bulunmuş, P2 profillerde bu değer yaklaşık 5.65 mm'dir. Bu farkta atalet momenti ile ilgili olabilir.

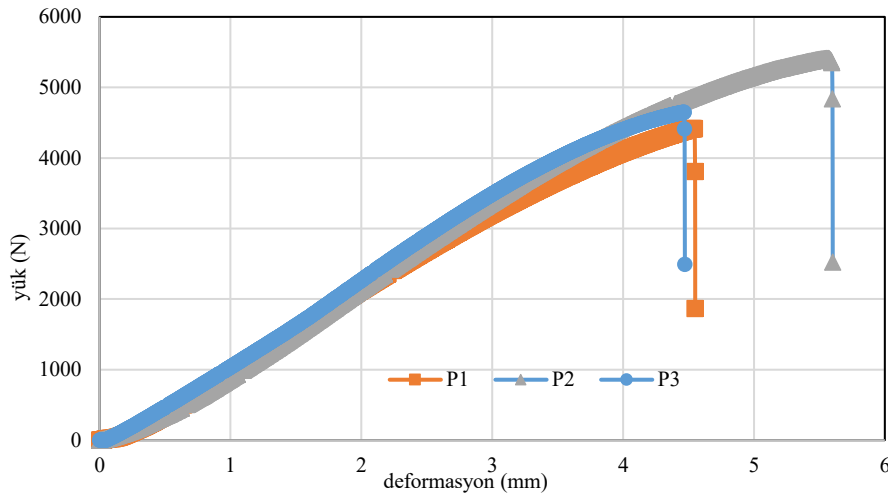
Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, OPK profillerinin kırılma anına kadar eğilme davranışının ANSYS sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Sayısal modeller OPK profillerin kusursuz yapıda olduğunu varsaymaktadır. Üretim sırasında odun-plastik arasında oluşabilecek mikro boşluklar (Şekil 9) ve bunların profil içerisindeki dağılımı özellikle P2 profilin benzetim ve laboratuvar sonuçları arasındaki farkın oluşmasına sebebiyet vermiş olabilir. Geniş yüzeylerde oluşabilecek kesme gerilmelerinden kaynaklanan şekil değişiklikleri de bu farkın oluşmasına katkıda bulunabilir.

Plastik ve OPK malzemelerin nümerik modellenmesinde izotropik malzeme özellikleri kullanılmakta ve gerçekçi sonuçların alınması için bu yeterli olmaktadır (Feng vd., 2023; Nukala vd., 2023; Hosseini vd., 2024). Mishra ve Sain (2007), OPK esaslı sandalye tabanının sonlu elemanlar yöntemi ile mukavemet analizinde izotropik malzeme özelliklerini kullanmıştır. Soury vd. (2009) OPK paletlerin tasarım ve optimizasyonunda izotropik malzeme özelliklerini kullanmışlardır. Roy vd. (2018), çekme ve eğilme testi numuneleri için izotropik malzeme özellikleri ve akma dayanımı kullanarak yapılan modellemelerden gerçekçi sonuçlar almıştır. Nukala vd. (2023), geri dönüşümden elde edilmiş PP kullanılarak üretilmiş OPK'ların çekme testini izotropik malzeme özellikleri kullanarak modellemiştir. Ezzarara vd. (2023), 3B baskı ile üretilmiş OPK için izotropik malzeme özelliklerinin kullanılmasının yeterli olduğunu

göstermiştir. Sayısal modellerin doğruluğu kullanılan elemanların türüne ve sayısına, geometrisine ve yükleme şemasına da bağlı olabilir. Katı elemanlar (solid) düzlem elemanlara (plane) göre daha gerçekçi sonuçlar verebilir, İkinci dereceden elemanlar (orta düğüm noktasına sahip) birinci dereceden elemanlardan daha yüksek doğruluk derecesine sahiptir (Güntekin ve Uysal, 2024). Sayısal modeller daha ayrıntılıdır ve daha yüksek bir arıza olasılığının işareti olan gerilme yoğunlaşmalarını da göstermektedir (Şekil 10).

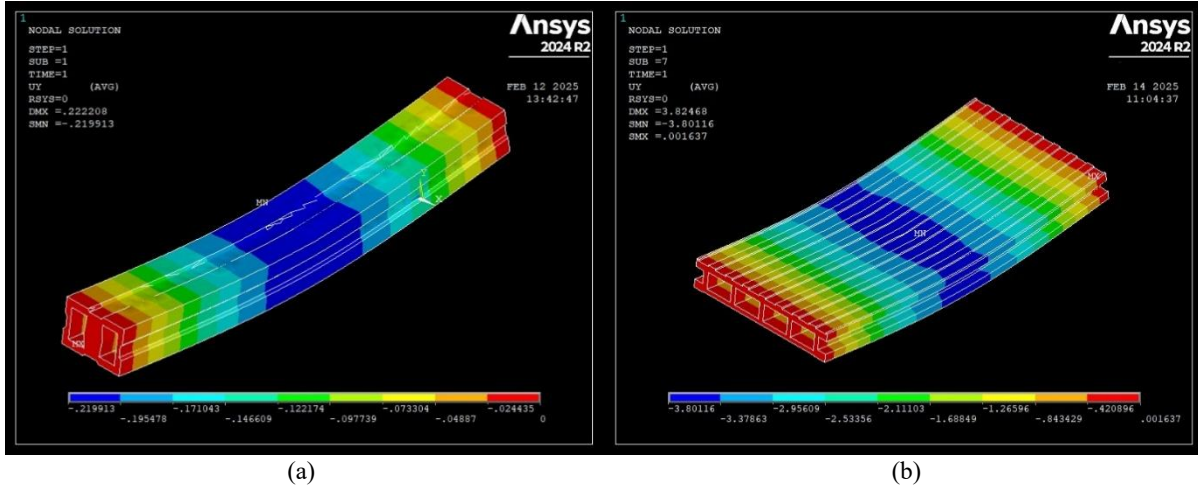
Çalışmada test edilen OPK profillerin hepsi çekme yüzeyinden kırılmıştır (Şekil 11). Bu da kırılmada ahşabın etkili olduğu söylenebilir. Ahşap ve plastik arasındaki etkileşimin zayıf olduğu iyi bilinmektedir; bu özellikle kusurların varlığı ve iç bağ mukavemetindeki tutarsızlıkların kırılmaya katkıda bulunabileceği söylenebilir. ANSYS sonuçları, gerilme yoğunluğunun OPK profillerin orta kısmında yer aldığını göstermiştir. OPK profilleri eğilmeye maruz kaldığında, basma gerilmeleri üst yüzeye etki ederken, çekme gerilmeleri alt yüzeye etki etmektedir.



Şekil 8. OPK profillerinin eğilme eğrilerinin karşılaştırılması
Figure 8. Comparison of bending curves of WPC profiles

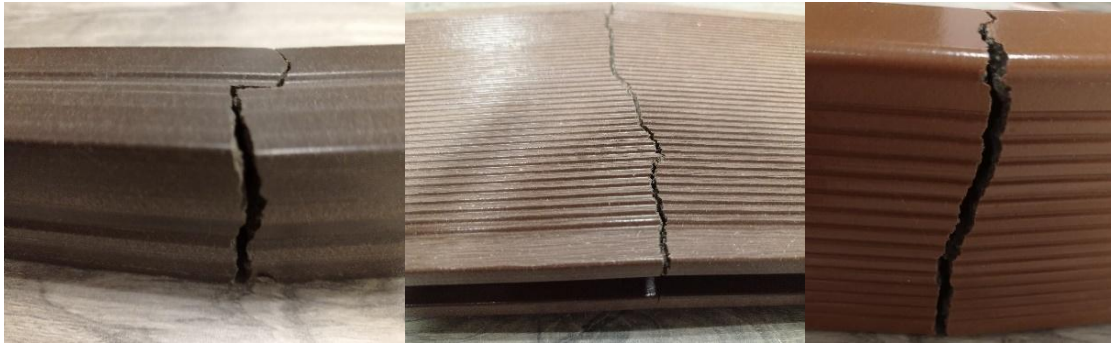


Şekil 9. P2 profilde görülen boşluklar
Figure 9. Voids observed in P2 profile



Şekil 10. ANSYS kullanılarak elde edilen; (a) deformasyon (P1), (b) DMX: Maksimum deformasyon, SMN: Minimum gerilme ve SMX: Maksimum gerilme (P2)

Figure 10. Results obtained using ANSYS; (a) Deformation (P1), (b) DMX: Maximum deformation, SMN: Minimum stress and SMX: Maximum stress (P2)



Şekil 11. OPK profillerinde gözlemlenen kırılma şekilleri
Figure 11. Fracture patterns observed in WPC profiles

4. Sonuç ve öneriler

Çalışma sonuçları, PVC esaslı OPK profillerin eğilme yükleri altında kırılmaya kadar doğrusal olmayan davranışlarının SEM kullanılarak modellenebileceğini göstermiştir. Test edilen OPK profillerin eğilme rijitliklerinin benzer, eğilme dirençlerinin ise farklı olduğu görülmüştür. Çalışma sonuçları OPK'ların izotropik olarak modellenebileceğini göstermiştir. Sayısal modeller, farklı geometrilere sahip yeni OPK profillerin davranışını tahmin etmek için uyarlanabilir. Modellerin sadece eğilme yükleri altında onaylanması modellerin davranışının farklı yükler için geçerli olmayacağı anlamına gelmez. Modeller farklı yüklemeler için de analiz edilerek davranışları tahmin edilebilir. Ayrıca modeller için geometri optimizasyonu yapılabilir.

Kaynakça

- Alharbi, M., Kong, I. Patel, V.I., 2020. Simulation of uniaxial stress-strain response of 3D-printed polylactic acid by nonlinear finite element analysis. *Applied Adhesion Science*, 8(1): 5 <https://doi.org/10.1186/s40563-020-00128-1>
- Alves, L. M., Martins, P. A. F., 2009. Understanding invert forming of thin-walled polyvinyl chloride tubes using a die based on a mechanical flow formulation. *Materials and Manufacturing Processes*, 24 (12): 1398 -1404. doi: 10.1080/10426910902997530
- Ameen, M., 2001. *Boundary Element Analysis: Theory and Programming*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA.
- Ashori, A., Matini Behzad, H., Tarmian, A., 2013. Effects of chemical preservative treatments on durability of wood flour/HDPE composites. *Composites Part B: Engineering*, 47: 308–313. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.022>
- ASTM D790-17, 2017. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Ayrılmis, N., Jarusombuti, S., Fueangvivat, V., Bauchongkol, P., 2011. Effect of thermal-treatment of wood fibres on properties of flat-pressed wood plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, 96: 818–822. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.02.005>
- Bhandari, S., Lopez-Anido, R., 2018. Finite element analysis of thermoplastic polymer extrusion 3D printed material for mechanical property prediction. *Additive Manufacturing*, 22, 187–196. doi:10.1016/J.ADDMA.2018.05.009
- Başboğa, H.I., Güntekin, E., 2016. The optimization of wood trusses connected with metal plates using ANSYS. *Pro Ligno*, 12(4): 12-20.
- Bhaskar, K., Jayabalakrishnan, D., Vinoth Kumar, M., Sendilvelan, S., Prabhakar, M., 2021. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. *Materials Today: Proceedings*, 45(7): 5886-5891. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.570>
- Caminero, M.A., Chacón, J.M., García-Moreno, I., Rodríguez, G.P., 2018. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*, 148: 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.04.054>

- Dickson, A.N., Barry, J.N., McDonnell, K.A., Dowling, D.P., 2017. Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 16, 146–152. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.06.004>.
- Diouf, P.M., Thiandoume, C., Abdulrahman, S.T., Ndour, O., Jibin, K.P., Maria, H.J., Thomas, S., Tidjani, A., 2022. Mechanical and rheological properties of recycled high-density polyethylene and ronier palm leaf fiber based biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(9), 51713. <https://doi.org/10.1002/app.51713>
- Duan, G., Chunxia, He., Min, W., Xingxing, Y., Wei, W., Yanping, W., 2023. Effect of silica on thermal and mechanical properties of eucalyptus-PVC wood-polymer composites. *BioResources*, 18(1):1803-1811. doi: 10.15376/biores.18.1.1803-1811
- Echeverria, C., Pahlevani, F., Gaikwad, V., Sahajwalla, V., 2017. The effect of microstructure, filler load and surface adhesion of marine bio-fillers, in the performance of hybrid wood-polypropylene particulate bio-composite. *Journal of Cleaner Productions*, 154:284–294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.020>
- Ezzaraa, I., Ayrlmis, N., Abouelmajd, M., Kuzman, M. K., Bahlouai, A., Arroub, I., Bengourram, J., Lagache, M., Belhouideg, S., 2023. Numerical modeling based on finite element analysis of 3D-printed wood-polyactic acid composites: A Comparison with Experimental Data. *Forests*, 14(1): 95. <https://doi.org/10.3390/f14010095>
- Fei, G., Yuyu, L., Wenhui, H., Xiaolong, H., Rongxian, O., Qingwen, W., 2024. Experimental study and finite element analysis of wood-plastic composite hollow columns subjected to axial compression. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 38(3): 40-48. doi:10.12326/j.2096-9694.2024044
- Feng, L., Wang, D., Yan, J., 2023. Reliability study of wood–plastic composites based on probabilistic finite elements. *Polymers*, 15: 312. <https://doi.org/10.3390/polym15020312>
- Güntekin, E., Uysal, M., 2024. Doğru 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. doi: 10.33725/mamad.1464366
- Haque, M.M.U., 2021. Property improvements of wood and wood-plastic composites. In: *Wood Polymer Composites*. (Ed: Mavinkere Rangappa, S., Parameswaranpillai, J., Kumar, M.H., Siengchin, S.) *Composites Science and Technology*, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8_4
- Hosseini, S.B., Gaff, M., Smardzewski, J., 2024. Plastic deformation assessment of sawdust-rPET composites under bending load. *Composites Part C: Open Access*, 15: 100538: 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100538>
- Ilyas, R.A., Zuhri, M.Y.M., Aisyah, H.A., Asyraf, M.R.M., Hassan, S.A., Zainudin, E.S., Sapuan, S.M., Sharma, S., Bangar, S.P., Jumaidin, R., Nawab, Y., Faudzi, A. A. M., Abral, H., Asrofi, M., Syafri, E., Sari, N.H., 2022. Natural fiber-reinforced polylactic acid, polylactic acid blends and their composites for advanced applications. *Polymers*, 14(1): 202. <https://doi.org/10.3390/polym14010202>
- Jian, B., Mohrmann, S., Li, H., Li, Y., Ashraf, M., Zhou, J., Zheng, X., 2022. A Review on flexural properties of wood-plastic composites. *Polymers*, 14, 3942. <https://doi.org/10.3390/polym14193942>
- Li, J., Huo, R., Liu, W., Fang, H., Jiang, L., Zhou, D., 2022. Mechanical properties of PVC-based wood–plastic composites effected by temperature. *Frontiers in Materials*, 9: 1018902. doi: 10.3389/fmats.2022.1018902
- Mirowski, J., Oliwa, R., Oleksy, M., Tomaszewska, J., Ryszkowska, J., Budzik, G., 2021. Poly(vinyl chloride) composites with raspberry pomace filler. *Polymers*, 13(7): 1079. <https://doi.org/10.3390/polym13071079>
- Mirski, R., Dukarska, D., Walkiewicz, J., Derkowski, A., 2021. Waste wood particles from primary wood processing as a filler of insulation PUR foams. *Materials*, 14(17): 4781. <https://doi.org/10.3390/ma14174781>
- Mishra, S., Sain, M., 2007 Strength analysis of chair base from wood plastic composites by finite element method. *Materials Research Innovations*, 11(3): 137-143, doi:10.1179/143307507X225623
- Mo, X., Zhang, X., Fang, L., Zhang, Y., 2022. Research progress of wood-based panels made of thermoplastics as wood adhesives. *Polymers*, 14(1): 98. <https://doi.org/10.3390/polym14010098>
- Moreno, D.D.P., de Camargo, R.V., dos Santos Luiz, D., Branco, L.T.P., Grillo, C.C., Saron, C., 2021. Composites of recycled polypropylene from cotton swab waste with pyrolyzed rice husk. *Journal of Polymers and the Environment*, 29: 350–362. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01883-9>
- Nukala, S.G., Kong, I., Kakarla, A.B., Patel, V.I., Abuel-Naga, H., 2023. Simulation of wood polymer composites with finite element analysis. *Polymers*, 15: 1977. <https://doi.org/10.3390/polym15091977>
- Oksman, K., 2000. Mechanical properties of natural fibre mat reinforced thermoplastic. *Applied Composite Materials*, 7: 403–414. <https://doi.org/10.1023/A:1026546426764>
- Özdemir, F., Çota, A., Alma, H., 2018. Odun plastik kompozit malzemelerin termal ve ısı iletkenliği özellikleri üzerine sepiolit mineralinin etkisi. *Turkish Journal of Forestry*, 19(2): 205-209. doi:10.18182/tjf.415069
- Rahman, K.S., Islam, M.N., Rahman, M.M., Hannan, M.O., Dungani, R., Abdul Khalil, H.P.S., 2013. Flat-pressed wood plastic composites from sawdust and recycled polyethylene terephthalate (PET): physical and mechanical properties. *Springer Plus*, 2: 629. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-629>
- Roy, H., Pahlevani, F., Cholake, S., Echeverria, C., Banerjee, A., Sahajwalla, V., 2018. Simulation of marine bio-composite using empirical data combined with finite element technique. *Journal of Composites Science*, 2(3): 48. <https://doi.org/10.3390/jcs2030048>
- Sanvezzo, P.B., Branciforti, M.C., 2021. Recycling of industrial waste based on jute fiber-polypropylene: Manufacture of sustainable fiber-reinforced polymer composites and their characterization before and after accelerated aging. *Industrial Crops and Products*, 168: 113568 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113568>
- Soury, E., Behraves, A.H., Rouhani Esfahani, E., Zolfaghari, A., 2009. Design, optimization and manufacturing of wood–plastic composite pallet. *Materials & Design*, 30(10): 4183-4191. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.035>
- TS-EN 323, 1999. Ahşap esaslı levhalar-Birim hacim ağırlığının tayini. TSE, Ankara.