

## Kayın (*Fagus orientalis* L.) ve karaçam (*Pinus nigra*) odunu kullanılarak oluşturulan kavelalı mobilya köşe birleştirmeleri için sonlu elemanlar modellerinin karşılaştırılması

Şeydanur Şanlıhılal<sup>a</sup>, Ergün Güntekin<sup>a,\*</sup>

**Özet:** Bu çalışmada kayın ve karaçam kullanılarak üretilmiş kavelalı birleştirmelerin eğilme performansları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Birleştirmeler 10 mm çapında 48 mm uzunluğunda yivli kayın kavela ve PVAc tutkalı kullanılarak birleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında kullanılan malzemelerin yoğunluk ve rutubet gibi bazı fiziksel özellikleri ile elastikiyet modülü ve eğilme direnci gibi mekanik özellikleri belirlenmiştir. Eğilme testlerinde akma direnci ve tanjant modülü de hesaplanmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında bu ağaç türleri kullanarak köşe birleştirmeler üretilmiş ve eğilme testlerine maruz bırakılmıştır. Son olarak birleştirmelerin nümerik modelleri izotropik ve ortotropik malzeme özellikleri kullanılarak oluşturulmuştur. Laboratuvar ortamında test edilen karaçam ve kayın odunundan yapılan kavelalı birleştirmelerinin rijitlik değerleri sırasıyla 3705 ve 4776 N.m/rad olarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi bu rijitlik değerlerini karaçam ve kayın için ortotropik ve izotropik modeller ile sırasıyla 2727 ve 3363 N.m/rad, 4097 ve 4350 N.m/rad olarak tahmin etmiştir. Çalışma sonuçları kavelalı köşe birleştirmelerinin eğilme davranışı için geliştirilen ortotropik modellerin daha gerçekçi olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Karaçam, Kayın odunu, Kavelalı birleştirmeler, Sayısal modelleme

## Comparison of finite element models for doweled furniture corner joints made of beech (*Fagus orientalis* L.) and black pine (*Pinus nigra*) wood

**Abstract:** In this study, the bending performances of dowel joints produced using beech and black pine wood were examined experimentally and numerically. The joints were joined using 10 mm diameter and 48 mm long grooved beech dowels and PVAc glue. In the first stage of the study, some physical properties of the materials used, such as density and humidity, and mechanical properties such as elastic modulus and bending strength were determined. Yield strength and tangent modulus were also calculated in bending tests. In the second stage of the study, corner joints were produced using these wood species and were subjected to bending tests. Finally, numerical models of the joints were created using isotropic and orthotropic material properties. The stiffness values of dowel joints made of black pine and beech wood tested in the laboratory environment were calculated as 3705 and 4776 N.m/rad, respectively. The finite element method estimated these stiffness values as 2727 and 3363 N.m/rad, 4097 and 4350 N.m/rad for black pine and beech with orthotropic and isotropic models, respectively. The results of the study showed that orthotropic models developed for the bending behavior of doweled corner joints are more realistic.

**Keywords:** Black pine, Beech wood, Doweled joints, Numerical modelling

### 1. Giriş

Kavelalı birleştirmeler diğer birleştirmeler ile karşılaştırıldığında işlem kolaylığı ve düşük maliyeti nedeniyle mobilya üretiminde ve bazı yapısal elemanların birleştirilmesinde daha çok tercih edilmektedir (Eckelman, 2002; Efe vd., 2005; Hao vd., 2020). Kavelalı birleştirmelerin direnci ve rijitliği ağaç türü, kavela çapı, derinliği, kullanılan tutkal türü ve tolerans gibi parametrelere göre değişmektedir (Eckelman, 1971; Zhang, 2001; Hao vd., 2020). Kavelalar arasındaki mesafe de kavelalı birleştirme performansı etkileyen faktörler arasındadır (Warmbier ve Wilczynski, 2000). Poliüretan esaslı tutkal ile yapılandırılan kavelalı birleştirmelerin eğilme performansı PVAc kullanılarak üretilen birleştirmelere göre çok daha yüksektir

(Zaborsky vd., 2019). Diğer taraftan PVAc tutkalının önemli avantajları arasında çabuk kuruması, kokusuz oluşu ve malzemeyi renklendirmemesi gösterilebilir (Diler vd., 2013). Kavela ebatlarının artması da eğilme performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Zhang ve Eckelman, 1993; Chen vd., 2018).

İlk olarak 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlanan "Sonlu Elemanlar Metodu (SEM ya da Finite Element Method, FEM)" terimi özellikle 2000'li yıllarda bilgisayar teknolojilerinin yaygınlaşmasına paralel olarak birçok mühendislik alanında üretimin bir parçası olmuştur. Gustafsson (1995, 1996, 1997) ve Smardzewski (1998) yaptığı çalışmalarda mobilya tasarımında ve optimizasyonunda sonlu elemanlar yönteminin adapte edilebileceğini göstermiştir. Kasal ve Püllela (1995) çubuk

✉ <sup>a</sup> Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16310, Yıldırım, Bursa

@ <sup>\*</sup> **Corresponding author** (İletişim yazarı): ergun.guntekin@btu.edu.tr

✓ **Received** (Geliş tarihi): 04.06.2024, **Accepted** (Kabul tarihi): 30.07.2024



**Citation** (Atf): Şanlıhılal, Ş., Güntekin, E., 2024. Kayın (*Fagus orientalis* L.) ve karaçam (*Pinus nigra*) odunu kullanılarak oluşturulan kavelalı mobilya köşe birleştirmeleri için sonlu elemanlar modellerinin karşılaştırılması. Turkish Journal of Forestry, 25(3): 313-319.  
DOI: [10.18182/tjf.1495635](https://doi.org/10.18182/tjf.1495635)

(2D) ve kabuk (3D) elemanlarını doğrusal olmayan yay eleman (1D) ile kullanarak rijitlik analizinde, Güntekin (2004) benzer yaklaşım kullanarak mobilya köşe birleştirmelerinin sünme davranışının modellenmesinde, Yılmaz ve Güntekin (2012), katı elemanlar (3D) ve izotropik malzeme özellikleri kullanarak sandalye yan çerçevelerinin rijitlik analizinde, Aydın ve Aydın (2017) katı elemanlar ve ortotropik malzeme özellikleri kullanarak zıvanalı birleştirilmiş sandalye yan çerçevelerinin rijitlik analizinde, Güray vd. (2022) kiriş elemanlar ve izotropik malzeme özellikleri kullanarak koltuk iskeletlerinin gerilme analizinde, Kaygın vd. (2016) kavelalı ve zıvanalı birleştirmelerin izotropik malzeme özellikleri ve dinamik yükleme kullanarak modellenmesinde, Kasal (2006) koltuk iskeletlerinin modellenmesinde Ceylan vd. (2021) sandalye iskeletlerinin tekrarlı yük altındaki davranışının modellenmesinde kullanmışlardır. SEM son yıllarda üretim süreçlerinin bir parçası olmuştur. SEM ile yapılan çalışmaların sayısı 1980 yılında binlerde 2000'li yıllarda milyonlar seviyelerine çıktığı söylenebilir (Tekkaya ve Soyarslan, 2014).

Bu çalışmada karaçam ve kayın kullanılarak üretilen kavelalı köşe birleştirmelerinin eğilme davranışları deneysel ve nümerik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Nümerik yöntemler izotropik ve ortotropik modellemeleri içermektedir.

## 2. Materyal ve yöntem

### 2.1. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Çalışmada kullanılan ağaç malzemeler ve birleştirmeler mobilya imalatı yapan bir firmadan temin edilerek %65±3 rutubet ve 21±1 °C sıcaklıkta ağırlıkları değişmeyinceye kadar bekletilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında kullanılan malzemelerin bazı fiziksel özellikleri ile eğilme özellikleri belirlenmiştir.

Rutubet miktarı TS ISO 13061-1 (2021) standardına göre eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$R_M = M - M_0 / M_0 \times 100 \quad (1)$$

Burada;

$R_M$ : Rutubet miktarı (%)

$M$ : Hava kuru ağırlık (g)

$M_0$ : Tam kuru ağırlık (g)

Yoğunluk TS ISO 13061-2 (2021) standardına göre eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$d = M / V \quad (2)$$

Burada;

$d$ : Hava kuru yoğunluk ( $g/cm^3$ ),

$M$ : Hava kuru ağırlık (g),

$V$ : Hava kuru hacim ( $cm^3$ ).

Her örnek grubu için on örnek test edilmiştir. Tüm testler 21°C'lik oda sıcaklığında ve %65'lik sabit bağıl nemde gerçekleştirilmiştir. Test edilen örneklerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü sırasıyla TS ISO 13061-3 (2021) ve TS ISO 13061-4 (2021) standartlarına göre eşitlik 3 ve 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E.D. = 3P_{max}l / 2bh^2 \quad (3)$$

$$E.M. = Pl^3 / 4bh^3f \quad (4)$$

Burada:

$E.D.$  = eğilme direnci ( $N/mm^2$ ),

$E.M.$  = elastikiyet modülü ( $N/mm^2$ ),

$P$  = elastik deformasyon bölgesindeki yüklemenin alt ve üst limitlerinin aritmetik ortalaması arasındaki farka eşit bir kuvvettir (N),

$P_{max}$  = test sırasındaki maksimum kuvvet (N)

$l$  = dayanaklar arasındaki mesafe (mm),

$b$  = test numunesinin yıllık halkalara dik genişliği (mm),

$h$  = test numunesinin yıllık halkalara teğet genişliği (mm),

$f$  = elastik deformasyon bölgesindeki  $P$  kuvvetine karşılık gelen net eğilme.

Kullanılan karaçam ve kayın örneklerin %0.2'lik akma direnci ve plastik bölgedeki tanjant modülleri de hesaplanmıştır. Bu değerler kayın ve karaçam kullanılarak üretilmiş kavelalı birleştirmelerin doğrusal olmayan plastik davranışının modellenmesinde kullanılmıştır.

### 2.2. Birleştirmelerin test edilmesi

Çalışmada kullanılan birleştirmelerin ölçüleri Şekil 1a'da gösterilmiştir. Eleman kalınlıkları 22 mm'dir. Birleştirme elemanları 10 mm çapında 48 mm uzunluğunda kayın kavela ve PVAc tutkalı kullanılarak birleştirilmiştir. Kavelalar için her iki elemanda da 10 mm çapında ve 24 mm derinliğinde delik açılmıştır. Birleştirmeler, Şekil 1b'de verilen deney düzeneği ile 50 kN yük kapasitesine sahip SHIMADZU üniversal test cihazında 6 mm/dk test hızı ile statik yüke maruz bırakılarak yük-deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Birleştirmelerin rijitliği ve direnci (maksimum moment) eşitlik 5 ve 6 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$k = \frac{\Delta M}{\Delta \gamma} \quad (5)$$

$$M_{max} = P_{max} l \quad (6)$$

Burada:

$P_{max}$  = maksimum yük (N),

$l$  = moment kolu (m).

$\Delta M$  = moment artışı (Nm),

$\Delta \gamma$  = rotasyon açısı artışı (rad),

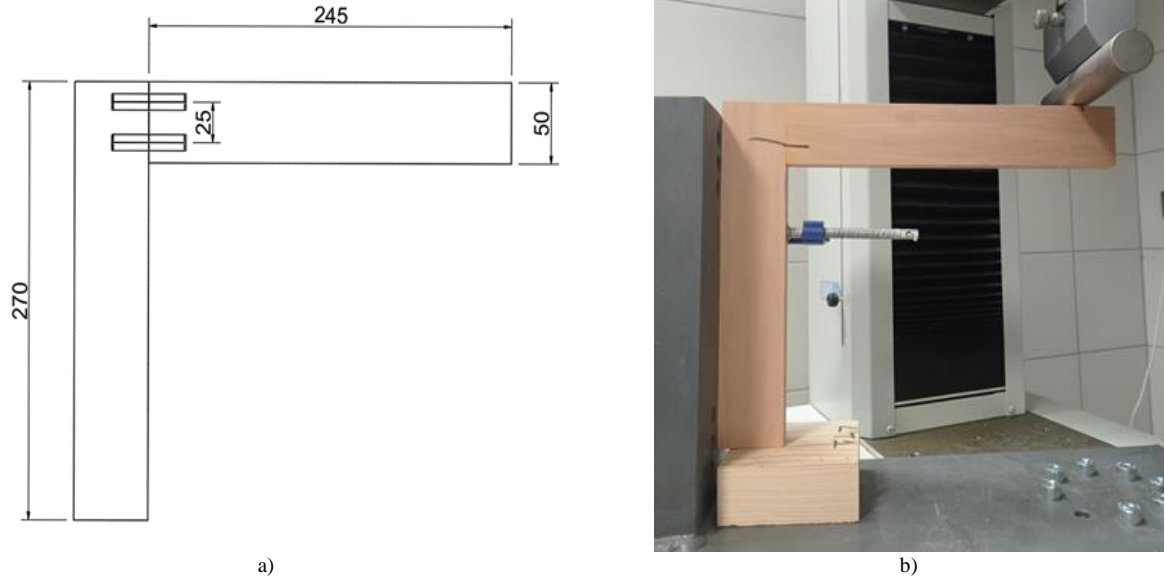
$M_{max}$  = Maksimum moment (N.m).

### 2.3. Sayısal analiz

Sayısal hesaplamalar ANSYS Mechanical APDL v.2023 (ANSYS, Inc. Canonsburg, Pa, ABD) kullanılarak yapılmıştır. Kavelalı birleştirmelerin sayısal modellerinde izotropik ve ortotropik malzeme özellikleri kullanılmıştır. Çalışmada izotropik modelleme için elastikiyet modülü değerleri olarak test edilen malzemelerin elastikiyet modülleri ve Poisson oranı olarak 0.3 kullanılmıştır. Ortotropik modellemede kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Ayrıca, izotropik malzeme özelliklerinin yanında akma gerilmesi ve tanjant modülü değerleri kullanılmıştır. Sayısal modelin ayrıklaştırılması, yaklaşık 6.000 eleman ve 10.000 düğüm içeren solid186 elemanı kullanılmıştır. Solid186, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı sergileyen, yüksek dereceli, 3 boyutlu, 20 düğümlü bir katı elemandır. Şekil 1b'de gösterildiği gibi modellenen kavelalar ve birleştirme elemanları arasında mükemmel bir bağ olduğu varsayılarak yazılımın yapılandırma

komutu (Vglue) uygulanmıştır. Test edilen birleştirmeler ile karşılaştırma yapmak için farklı yüklemeler altında deformasyon değerleri okunmuştur. Sayısal analizin bir çıktısı olarak farklı noktadaki gerilmeler ve gerilme yoğunlaşmaları ayrıca görülebilmektedir. Şekil 2'de ANSYS

kullanılarak oluşturulan model ve ağ yapısı (mesh) gösterilmektedir. Plastiklik, akma ve tanjant modülü, ANSYS aracılığıyla sunulan gerinim sertleşmesi (strain hardening ya da pekleşme) seçeneği kullanılarak tanıtılmıştır.



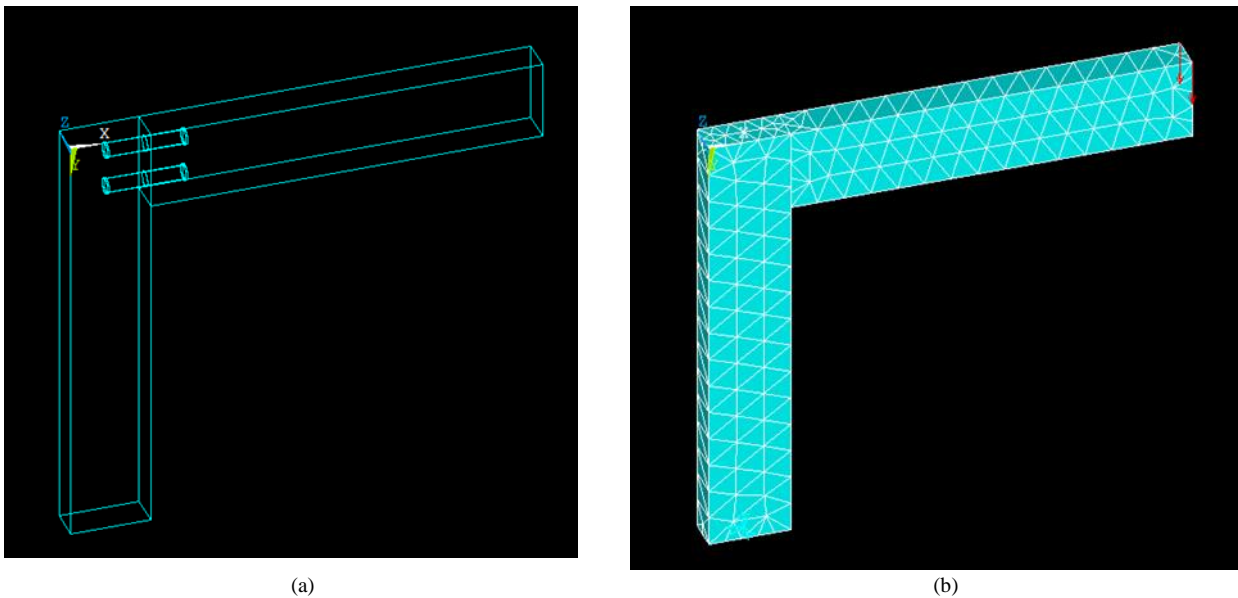
Şekil 1. Çalışmada test edilen birleştirmelerin ölçüleri, mm (a) ve yükleme şekli (b)

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan ortotropik malzeme özellikleri,

Ağaç türü	$E_L$ N/mm <sup>2</sup>	$E_R$ N/mm <sup>2</sup>	$E_T$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{LR}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{LT}$ N/mm <sup>2</sup>	$G_{RT}$ N/mm <sup>2</sup>	$\nu_{LR}$	$\nu_{LT}$	$\nu_{RT}$
Karaçam <sup>1</sup>	8552	1395	376	1058	1002	130	0.64	0.69	0.6
Kayın <sup>2</sup>	13960	2284	1160	1645	1082	471	0.45	0.33	0.78

<sup>1</sup>Güntekin ve Demiralp, 2017, <sup>2</sup>Smardzewski, 2015.

$E_i$  = Elastikiyet modülü,  $G_{ij}$  = Kesme modülü,  $\nu_{ij}$  = Poisson oranı



Şekil 2. Çalışmada test edilen model (a) ve ağ yapısı (b)

### 3. Bulgular

Çalışmada test edilen malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de bulunmaktadır. Çalışma sonuçlarına göre karaçam eğilme örnekleri daha yüksek varyasyon katsayısına sahip olduğu söylenebilir. Test edilen karaçam ve kayın örneklerinin yoğunluk ve eğilme özelliklerinin literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir (Güntekin vd., 2016; Güntekin ve Demiratlı, 2017)

Test edilen karaçam ve kayın için ortalama gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 3'te gösterilmiştir. Eğilme eğrileri bu ağaç türü odunlarının eğilme davranışının çift doğrusal olduğunu göstermektedir. Bu kayın odununda daha belirgindir.

Test edilen birleştirmelerin maksimum moment taşıma kapasiteleri (N.m) ve rijitlik değerleri (N.m/rad) Çizelge 3'te sunulmuştur. Karaçam'dan üretilen birleştirmelerin daha yüksek varyasyona sahip oldukları görülmektedir.

Test edilen birleştirmelerde elde edilen yük-deformasyon eğrileri Şekil 4 ve 5'te gösterilmiştir. Test edilen eğrilerin doğrusala yakın özellikte olduğu görülmektedir. Çalışmada hesaplanan maksimum moment taşıma kapasiteleri ile rijitlik

değerlerinin literatürde bulunan çalışmalar ile uyumlu olduğu söylenebilir. Hao vd., (2020) kavak kullanarak üretilen, 8 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda kayın kavelalı birleştirmelerinin moment taşıma kapasitelerini teorik olarak tahmin etmiş ve kavala çapına bağlı olarak yaklaşık 50-60 N.m arasında olduğunu göstermiştir. Karaman (2021) tarafından yapılan bir çalışmada aynı kavala ölçüleri kullanıldığında elde edilen maksimum moment ağaç türüne bağlı olarak yaklaşık 81 ile 116 N.m arasında bulunmuştur. Test edilen birleştirmelerin rijitlik değerleri ise Warmbier ve Wilczynski (2000) tarafından belirtilen değerlerin altında bulunmuştur.

Çalışmada test edilen birleştirmelerin yük-deformasyon eğrileri ile sayısal modellerden elde edilen eğrilerin karşılaştırması Şekil 6 ve 7'de gösterilmiştir. Sayısal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, kavelalı birleştirmelerde maksimum moment noktasına kadar olan deformasyon davranışının, ANSYS'in simülasyon sonuçlarıyla çoğunlukla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Nümerik modeller, kavala ve birleştirme elemanları arasında mükemmel bir yapışma olduğunu varsaymaktadır.

Çizelge 2. Kullanılan malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

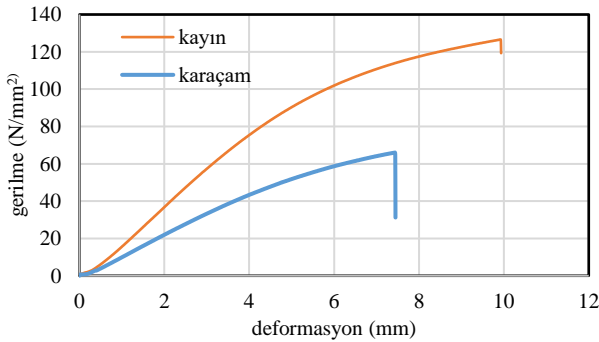
Ağaç türü	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Rutubet (%)	E.M. N/mm <sup>2</sup>	E.D. N/mm <sup>2</sup>	Akma direnci N/mm <sup>2</sup>	Tanjant Modülü N/mm <sup>2</sup>
Karaçam	0.5 (0.01)*	10.21 (0.18)	7323 (1844)	66.86 (15.5)	62.42 (17)	4125 (1055)
Kayın	0.65 (0.007)	9.77 (0.25)	13595 (847)	124.5 (9.7)	106.1 (6)	5966 (568)

\*parantez içindeki değerler standart sapmayı göstermektedir.

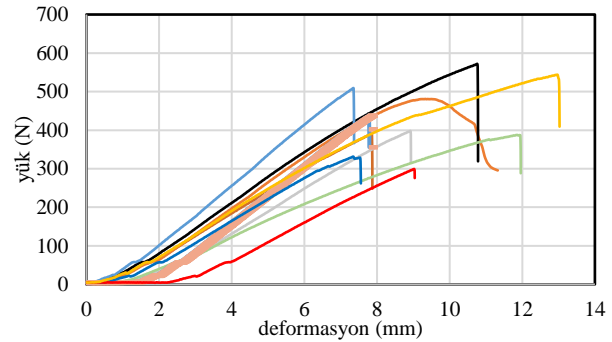
Çizelge 3. Çalışmada test edilen birleştirmelerin esneklik ve direnç değerleri

Ağaç türü	Rijitlik (k) (N.m/rad)	Direnç (M <sub>max</sub> ) (N.m)
Karaçam	3701 (552)*	107 (22)
Kayın	4776 (609)	156 (20)

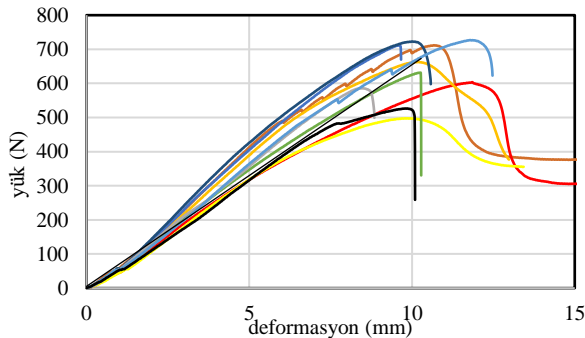
\*parantez içindeki değerler standart sapmayı göstermektedir.



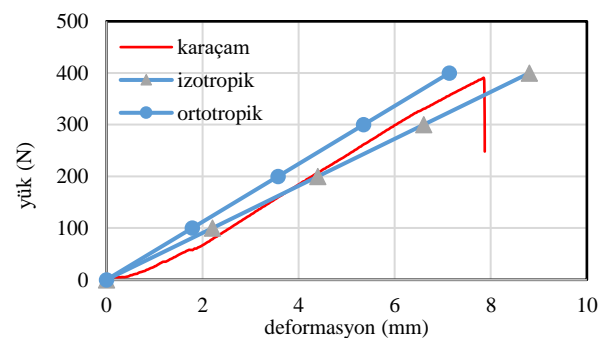
Şekil 3. Test edilen ağaç türlerinin ortalama gerilme-deformasyon eğrileri



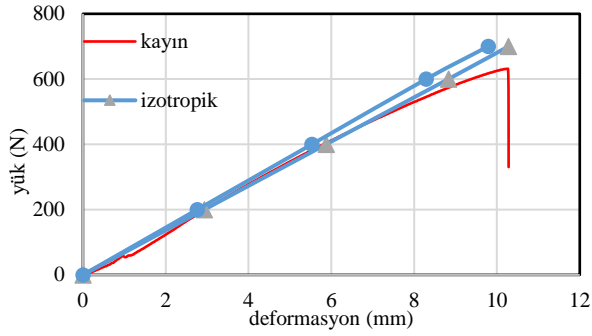
Şekil 4. Test edilen karaçam birleştirmelerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri



Şekil 5. Test edilen kayın birleştirmelerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri.



Şekil 6. Test edilen karaçam birleştirmelerinden elde edilen ortalama yük-deformasyon eğrisinin sayısal modeller ile karşılaştırılması.



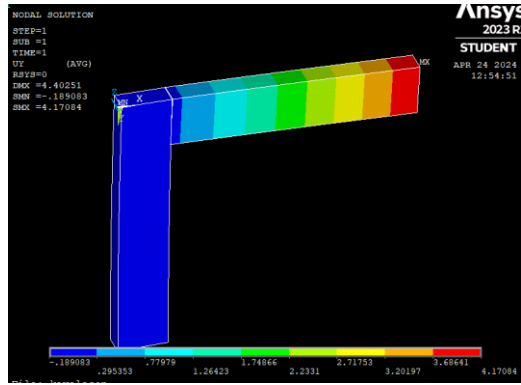
Şekil 7. Test edilen kayın birleştirmelerinden elde edilen ortalama yük-deformasyon eğrisinin sayısal modeller ile karşılaştırılması.

Kayın birleştirmelerin modellenmesinde izotropik ve ortotropik malzeme özellikleri kullanılarak elde edilen yük-deformasyon eğrileri birbirine çok benzerken, karaçam birleştirmelerin modellenmesinde iki eğri arasında fark olduğu görülmektedir. Bu karaçamın yüksek oranda varyasyona sahip olmasından kaynaklanabilir. Ülkemizde yapılan çalışmalarda karaçam odunun elastikiyet modülünün 6000 ile 11000 N/mm<sup>2</sup> arasında değiştiği görülmektedir (Güntekin ve Demiratlı, 2017). Yapılan istatistik analizde ortotropik modeller ile hesaplanan birleştirme rijitliği ile deneysel sonuçlar arasında anlamlı bir fark olmadığı, izotropik modellerin ise küçükte olsa bir fark oluşturduğu görülmüştür.

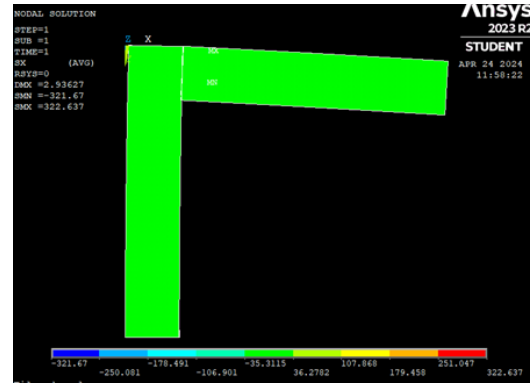
Birçok çalışma, yük altındaki ahşap elemanların sayısal modeller kullanılarak analiz edilebileceğini göstermiştir (Alade ve Ibrahim, 2023). Bazı çalışmalarda deformasyonun test sonuçlarına göre daha az olduğu sonucuna varmıştır. Ahşabın görünmeyen kusurları ve düzensizlikleri olduğunu kabul ettiğimizde sayısal modellerin daha az deformasyon vermesi beklenebilir. Bazı modelleme çalışmalarında izotropik malzeme özelliklerinin kullanılması ile elastik bölgedeki davranışın tahmin edilmesinde ortotropik malzeme özelliklerini kullanılmasına göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür (Kljak vd., 2018).

Sayısal modellerde birleştirme elemanlarının kavelalara göre daha düşük bir seviyede gerilmeye maruz kaldığını göstermektedir (Şekil 8b). Kavelalarda ise gerilme yoğunlaşmalarının özellikle kavela uç noktalarında olduğu görülmektedir (8d). Benzer sonuçlar Gawroński (2006) tarafından zıvanalı birleştirmeler için sunulmuştur. Bu stres yoğunlaşmaları tutkal tabakasındaki delaminasyonu göstermektedir.

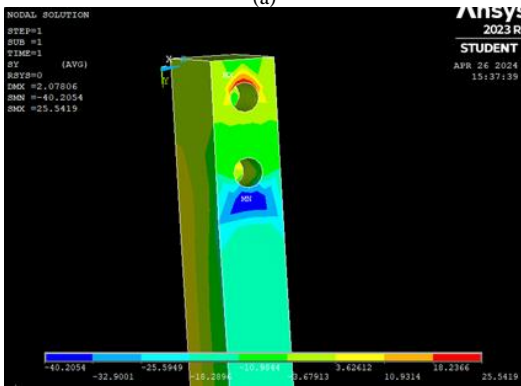
Birleştirmelerde kırılma şekli iki şekilde görülmektedir. Birincisi, kavelalardaki yapışmadan kaynaklanan ve gözlemlenmeyen hasar şeklinde tanımlanabilir. Kırılma her ne kadar görünür olmasa da, çıkardığı ses ile anlaşılmaktadır. Test sürdürüldüğünde iki eleman arasındaki çekme bölgesindeki açılma bunu teyit etmektedir (Şekil 9a). İkinci kırılma şekli ise liflere dik gerilmeden kaynaklanan kırılmadır (9b). Sayısal modellerde bu açılma görülmektedir, ayrıca kırılma olasılığının işareti olan gerilme yoğunlaşmaları görülmektedir (Şekil 8 c, d; Şekil 9b).



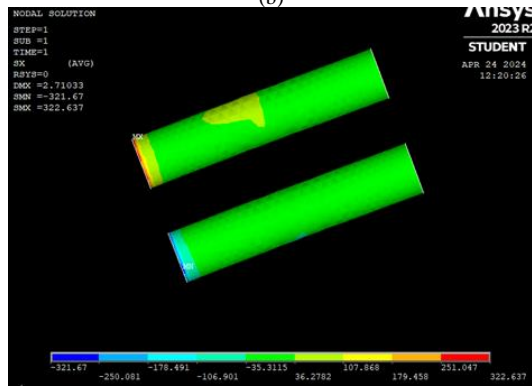
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 8. Sayısal modelleme sonuçları (a). Birleştirmede deformasyon, (b) Birleştirmelerde oluşan gerilme, (c). Dikey elemenda delikler etrafında oluşan gerilmeler, (d) Kavelalarda oluşan gerilmeler.



Şekil 9. Testlerde görülen kırılma şekilleri; a) açılma b) liflere dik kırılma

#### 4. Tartışma ve sonuç

Çalışma sonuçları karaçam ve kayın odunu kullanılarak üretilen kavelalı mobilya birleştirmelerinin eğilme davranışının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenebileceğini göstermektedir. Çalışmada modellenen kayın birleştirmeler için izotropik ve ortotropik malzeme özelliklerinin kullanılması bu tür düzleme gerilme problemlerinin çözümünde farklı bir sonuç üretmezken, karaçam birleştirmelere için küçük farklar gözlemlenmiştir. Bu da karaçamın mekanik özelliklerinin değişkenlik göstermesiyle açıklanabilir. Farklı geometrik ölçüler kullanılarak tasarlanan kayın ve karaçam birleştirmelerinin eğilme davranışı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak belirlenebilir.

Nümerik modellerin doğruluğu, kullanılan elemanların türüne ve sayısına, geometriye ve yükleme şemasına bağlı olabilir. Katı elemanlar, düzlem elemanlara göre daha iyi tahmin sağlayabilir ve ikinci dereceden elemanlar, birinci dereceden elemanlara göre daha yüksek doğruluk derecesine sahiptir. Düzlem problemlerin nümerik modellemesinde orta düzeyde eleman sayısı, izotropik malzeme özellikleri ve akma noktasının/tanjant modülü kullanılması doğru sonuçlar verebilir. Ortotropik malzeme özellikleri daha gerçekçi sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

#### Açıklama

Bu çalışma TÜBİTAK BİDEB (2209 B) tarafından desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- Alade, A.A., 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. doi:10.21926/rpm.2301003
- Aydın, M., Yılmaz Aydın, T., 2017. Sandalye çerçevesinin CATIA ile sonlu elemanlar analizi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 621-631.
- Ceylan, E., Güray, E., Kasal, A., 2021. Structural Analyses of wooden chairs by finite element Method (FEM) and assessment of the cyclic loading performance in comparison with allowable design loads. *Maderas Ciencia y tecnología*, 23:(19) 1-16. DOI: 10.4067/s0718-221x2021000100419
- Chen, M., Li X.M., Lyu, J.H., 2018. Influence of dowel diameter and curing time on strength of double dowel joint. *Wood Research*, 63(4): 591–8.

- Diler, H., Kasal, A., Demirci, S., Kuşkun, T., 2013. T-Tipi mobilya birleştirmelerinde ağaç türü, tutkal çeşidi ve zıvana ölçülerinin çekme kuvveti kapasitesine etkileri. *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 13(2): 287-299
- Eckelman, C.A., Erdil Y.Z., Zhang J., 2002. Withdrawal and bending strength of dowel joints constructed of plywood and oriented strandboard. *Forest Products Journal*, 52(9): 66–74.
- Eckelman, C.A., 1971. Bending strength and moment-rotation characteristics of two-pin moment-resisting dowel joints. *Forest Products Journal*, 21(3): 35–9.
- Efe, H., Zhang, J., Erdil, Y.Z., Kasal, A., 2005. Moment capacity of traditional and alternative Ttype end-to-side-grain furniture joints. *Forest Products Journal*, 55(5): 69–73.
- Gawronski, T., 2006. Rigidity-strength models and stress distribution in housed tenon joints subjected to torsion. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities*, 9(4): 1-9.
- Gustafsson, S.I., 1995. Furniture design by use of the finite element method. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 53(4): 257-260.
- Gustafsson, S.I., 1996. Finite element modelling versus reality for birch chairs. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 54(5): 355-359.
- Gustafsson, S.I., 1997. Optimising ash wood chairs. *Wood Science and Technology*, 31(4): 291-301.
- Güntekin, E., 2004. Kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin sonlu elemanlar analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 1: 159-169.
- Güntekin, E., Yılmaz Aydın, T., Niemi, P., 2016. Some orthotropic elastic properties of *Fagus orientalis* as influenced by moisture content. *Wood Research*, 61(1): 95-104.
- Güntekin, E., Demiratlı, S., 2017. Influence of moisture content on some elastic constants of black pine subjected to compression. *Pro Ligno*, 13(2): 21-26.
- Güray, E., Ceylan, E., Kasal, A., 2022. Weight-strength optimization of wooden household chairs based on member section size. *Maderas. Ciencia y tecnología*, (24):31 1-14. DOI: 10.4067/s0718-221x2022000100431
- Hao, J. Xu, L., Wu, X., Li, X., 2020. Analysis and modeling of the dowel connection in wood T type joint for optimal performance. *Composite Structures*, 253, 1-11. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112754.
- Karaman, A., 2021. Bending Moment Resistance of T-Type Joints Reinforced With Basalt and Glass Woven Fabric Materials. *Maderas Ciencia y tecnología*, (23): 44, 1-12. DOI: 10.4067/s0718-221x2021000100444
- Kasal, A., 2006. Determination of the strength of various sofa frames with finite element analysis, *Gazi Üniversitesi Journal of Science* 19(4), 191-203.
- Kasal, B., Püllela, S.V., 1995. Development of analytical models for furniture. *Technical Note*, 80 p. Furniture manufacturing and Management Center, North Carolina State University.
- Kaygın, B., Yorur, H., Uysal, B., 2016. Simulating strength behaviors of corner joints of wood constructions by using finite element method. *Drvna industrija*, 67:(2) 133-140. doi:10.5552/drind.2016.1503

- Kljak, J., Španić, N., Jambreković, V., 2018. Comparison of finite element models for particle boards with homogenous and three-layer structure. *Drvna Industrija*, 69(4): 311-316. doi:10.5552/drind.2018.1764
- Smardzewski, J., 1998. Numerical analysis of furniture constructions. *Wood Science and Technology*, 32(4): 273-286. <https://doi.org/10.1007/BF00702895>
- Smardzewski, J., 2015. *Furniture Design*. Springer, Cham, Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19533-9>
- Tekkaya, A.E., Soyarslan, C., 2014. Finite Element Method. In: Laperrière, L. & Reinhart, G. (eds) *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 508–514. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7\\_16699](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16699).
- TS ISO 13061-1. 2021. Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri – Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 1: Fiziksel ve mekanik deneyler için nem muhtevasının belirlenmesi. TSE, Ankara
- TS ISO 13061-2. 2021. Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri – Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 2: Fiziksel ve mekanik deneyler için yoğunluğun belirlenmesi. TSE, Ankara
- TS ISO 13061-3. 2021. Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 3: Statik eğilmede nihai mukavemet tayini. TSE, Ankara
- TS ISO 13061-4. 2021. Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 3: Statik eğilmede elastikiyet modülü tayini. TSE, Ankara
- Yılmaz, T., Güntekin, E., 2012. Sandalye çerçevelerinin sonlu elemanlar analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 13: 134-139.
- Warmbier, K., Wilczynski, A., 2000. Strength and stiffness of dowel corner joints – Effect of joint dimensions. *Folia Forestalia Polonica*, B(31): 29-41.
- Zaborsky, V., Kamboy, G., Sikora, A., Boruvka, V., 2019. Effects of selected factors on Spruce dowel joint stiffness. *BioRes.*, 14(1): 1127–40. DOI:10.15376/biores.14.1.1127-1140.
- Zhang, J., 2001. Bending strength and stiffness of two-pin dowel joints constructed of wood and wood composites. *Forest Products Journal*, 1(2): 29–35.
- Zhang, J., Eckelman C.A., 1993. The bending moment resistance of single-dowel corner joints in case construction. *Forest Products Journal*, 43(6): 19–24.