



### Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kontrplak ile güçlendirilmiş yongalevha ve liflevhanın eğilme davranışının deneysel ve nümerik analizi

Ergün Güntekin\*<sup>1</sup>, Mesut Uysal<sup>1</sup>

**ÖZ:** Bu çalışmada, Doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kontrplak (KP) kullanılarak güçlendirilmiş yonga levha (YL) ve orta yoğunlukta liflevhaların (MDF) eğilme davranışı deneysel ve nümerik yöntemler ile incelenmiştir. Çalışmada, 13 mm kalınlığında YL ve 12 mm kalınlığında MDF levhalar 4 mm kalınlığında kontrplak levhalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Levhaların yapıştırılmasında poliüretan tutkallı kullanılmıştır. Deneysel örnekleri TS EN 310'a göre üç nokta eğilme testine tabi tutularak eğilme davranışları incelenmiştir. Çalışmada ayrıca, test edilen güçlendirilmiş örneklerin sonlu elemanlar modelleri oluşturularak nümerik analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçları KP kullanarak güçlendirilmiş YL örneklerin eğilmede elastikiyet modülü ve eğilme direnci değerlerinin yükleme yönüne göre iki katına kadar, MDF örneklerinde ise %44 arttığını göstermiştir. Güçlendirmenin etkinliği yükleme yönüne göre değişmektedir. Çekme gerilmesine maruz kalan yüzeylerin güçlendirilmesi basınç gerilmesine maruz kalan yüzeylerin güçlendirilmesine göre eğilme özelliklerine daha fazla katkı sağlamıştır. Eğilme testlerinden elde edilen yük-deformasyon eğrileri ile nümerik analizlerden elde edilen yük-deformasyon eğrilerinin genellikle benzer olduğu görülmüştür. Çalışma sonuçları KP kullanılarak güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların eğilme davranışlarının sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tahmin edilebileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Liflevha, yongalevha, kontrplak, güçlendirme, nümerik analiz

### Experimental and numerical analysis of the bending behavior of beech (*Fagus orientalis* L.) plywood-reinforced particleboard and fiberboard panels

**ABSTRACT:** In this study, bending behavior of particleboard (PB) and medium-density fiberboard (MDF) reinforced using beech (*Fagus orientalis* L.) plywood (PW) was examined by experimental and numerical methods. In doing so, 13 mm thick PB and 12 mm thick MDF panels were reinforced using 4 mm thick beech plywood. Polyurethane glue was used to bond the layers. The bending behavior of the test samples was determined by subjecting them to a 3-point bending test. Finite element models of the reinforced samples tested in the study were created, and numerical analyses were performed. The results showed that the modulus of elasticity under bending and bending strength of PB samples reinforced using PW increased up to two times, and in MDF samples increased by 44%, depending on the loading direction. The effectiveness of reinforcement varies depending on the loading direction. Reinforcing the surfaces exposed to tensile stress contributed more to the bending properties than the surfaces exposed to compressive stress. Generally, it was shown that the load-deformation curves obtained from bending tests and the load-deformation curves obtained from numerical analysis are similar. The study results showed that the bending behaviors of PB and MDF reinforced using PW can be predicted using the finite element method.

**Keywords:** Fiberboard, particleboard, plywood, reinforcing, numerical analysis

Makale tarihçesi: Geliş:03.04.2024, Kabul:09.05.2024, Yayınlanma:30.06.2024, \*e-posta: [ergun.guntekin@btu.edu.tr](mailto:ergun.guntekin@btu.edu.tr)

\*<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa/Türkiye,

Atıf: 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, DOI: [10.33725/mamad.1464366](https://doi.org/10.33725/mamad.1464366)

## **1 Giriş**

Türkiye mobilya sektöründe döşemeli mobilya konstrüksiyonlarının çerçevelerinde masif malzemeler kadar konstrüksiyonun hafif ve daha ekonomik olması açısından ahşap esaslı levhalar da tercih edilmektedir. Bu levhalar, ayrıca, hem işleme kolaylığı hem de boyutsal stabilizasyonunun fazla olması nedeniyle de tercih edilmektedir. Ancak, ahşap esaslı levhaların masif malzemeye göre dayanımının daha düşük olması mobilya konstrüksiyonlarının dayanımını da etkilemektedir. Bu yüzden, bu panellerin dayanımını arttıracak çalışmalar önem arz etmektedir.

Lamine edilmiş ahşap esaslı malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu literatürde ortaya koyulmuştur. Norvydas ve Minelga (2006) tarafından yapılan bir çalışmada yüzey işlem ve kaplamaların YL eğilme özelliklerini büyük ölçüde değiştirdiği görülmüştür. Kullanılan emprenyeli kağıt, lamine film, ahşap ve plastik kaplamalar eğilme direncini %10 ile % 90 arasında, elastikiyet modülünü ise % 57 kadar arttırmıştır. İstek ve ark., (2010) tarafından yapılan çalışma bu sonuçları onaylamaktadır. Büyüksarı ve ark., (2012) kayın ahşap kaplama ile MDF levhalarda eğilme özelliklerinin ikiye katlandığını bulmuştur. Döşemeli mobilya çerçevelerinde genellikle birkaç levhanın birbirine bağlı yapısal elemanlar oluşturmak üzere bir araya getirilmesinden oluşan yapısal elemanlar kullanılmaktadır (Matwiej ve ark., 2022).

Sonlu Elemanlar terimi, 1960 yılında Ray William Clough tarafından "Düzlem Gerilme Analizinde Sonlu Eleman Yöntemi" (Clough, 1960) adlı makalesinde tanıtıldı. İlk Sonlu Elemanlar Yöntemi kitabı Zienkiewicz ve ark., (2005) 60'ların sonlarında yayınlandı ve 70'lerde Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) uygulama alanı genişledi ve geniş bir mühendislik problemleri alanında önde gelen bir sayısal yaklaşım haline geldi. Ülkemizde ahşap malzeme mekaniği alanında 2000'li yılların başlarından beri kullanılmaktadır. Güntekin (2004) mobilya köşe birleştirmelerinin sünme davranışının, Yılmaz ve Güntekin (2012), Aydın ve Yılmaz Aydın (2017) sandalye yan çerçevelerinin yük altındaki davranışının, Başboğa ve Güntekin (2016) ahşap kafes sistemlerinin optimizasyonu, Kaygın ve ark., (2016) kavelalı ve zıvanalı birleştirmelerin, Kasal (2006) koltuk iskeletlerinin ve Ceylan ve ark., (2021) sandalye iskeletlerinin tekrarlı yük altındaki davranışının modellenmesinde kullanmışlardır. SEM son yıllarda üretim süreçlerinin bir parçası olmuştur. SEM ile yapılan çalışmaların sayısı 1980 yılında bin iken 2000'li yıllarda milyon seviyelerine çıktığı söylenebilir (Tekkaya ve Soyarslan, 2014). Bir yapı konstrüksiyonunda yük altındaki elemanların mekanik davranışlarının nümerik analiz ile incelenmesi için bu elemanların malzeme özellikleri üzerinde çalışmalar ortaya konulmalı ve SEM ile modellenerek elde edilen sonuçların deneysel veriler ile doğrulanması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, KP ile güçlendirilmiş MDF ve YL lamine elemanların eğilme davranışlarının deneysel ve nümerik yöntemler kullanılarak incelenmesidir. Bu doğrultuda öncelikle, (1) kullanılan malzemelerin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiş, daha sonra (2) KP ile güçlendirilen lamine MDF ve YL levhaların davranış özellikleri incelenmiş ve son olarak da (3) bu malzemelerin eğilme davranışları SEM ile gerçekleştirilen nümerik analizlerden elde edilmiş ve çalışmanın deneysel verileri ile karşılaştırılmıştır.

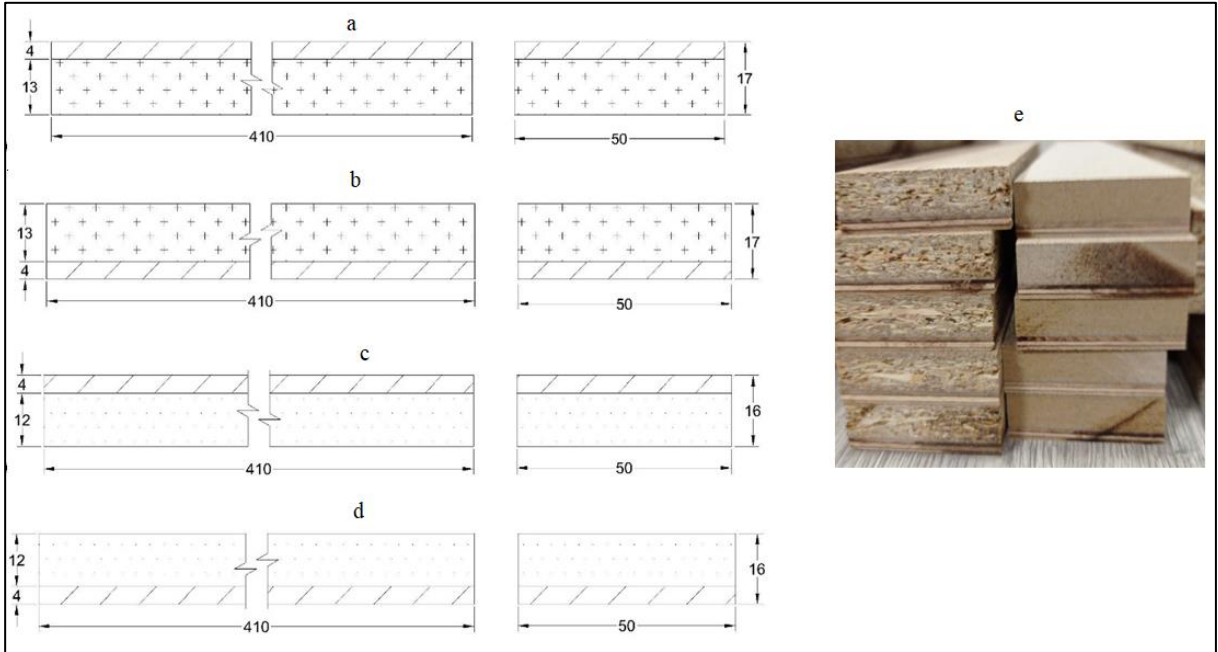
## **2 Materyal ve Metot**

### **2.1 Materyal**

Çalışmada kullanılan, 210 x 280 cm ebatlarında ticari levhalar yerel bir tedarikçiden satın alınmıştır. YL, 635 kg/m<sup>3</sup> yoğunluk ve 13 mm kalınlıkta P2 sınıfında (TS EN 312, 2012),

MDF ise 789 kg/m<sup>3</sup> yoğunlukta HD kalitesinde (TS EN 622-5, 2011) ve 12 mm kalınlığındadır. KP, 4 mm kalınlığında ve 759 kg/m<sup>3</sup> yoğunluğunda marin sınıfı (yüksek neme dayanıklı) olup üç katmanlı doğu kayını (*Fagus orientalis* L.) kaplamalarından üretilmiştir. Tüm levhalar 600 x 600 mm boyutlarında kesilerek kontrollü koşullarda (sıcaklık 20±1°C, bağıl nem %65) muhafaza edilmiştir.

YL ve MDF levhaların güçlendirilmesinde poliüreten (PÜR) tutkalı kullanılmış, YL ve MDF levhaların dış yüzeyine 4 mm KP yapıştırılmıştır. Yapıştırma için kullanılan tutkal oranı 200 g/m<sup>2</sup>'dir. Yapıştırılmış levhalar oda sıcaklığında 24 saat boyunca 0,15 - 0,45 N/mm<sup>2</sup> basınç altında Cemil Usta SSP-180 T laboratuvar tipi preste tutularak şartlandırmaya bırakılmıştır. Üretilen levhalardan 50 mm genişliğinde eğilme test örnekleri kesilmiştir. Çalışmada kullanılan deney örnekleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan örneklerin boyutları KP\_YL (a), YL\_KP (b), KP\_MDF (c), MDF\_KP (d) ve üretilen test örnekleri (e)

## 2.2 Metot

### 2.2.1 Malzemelerin fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Malzemelerin yoğunlukları TS-EN 323 (1999)'a göre 5 tekrarlı örnekler 50 x 50 mm boyutlarında hazırlanmış ve Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$d_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad (1)$$

$d_{12}$  : Kondisyonlanma şartlarındaki yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)

$m_{12}$  : Kondisyonlanma şartlarındaki ağırlık (g)

$V_{12}$  : Kondisyonlanma şartlarındaki malzeme hacim (cm<sup>3</sup>)

Örneklerin rutubet oranları TS EN 322 (1999)'a göre 0,01 g hassasiyete sahip terazi ve 0,01 mm hassasiyete sahip dijital kumpas ile ölçülerek Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$r = \frac{m_{12} - m_0}{m_0} \quad (2)$$

$r$  : Rutubet oranı (%)

$m_{12}$  : Kondisyonlanma şartlarındaki ağırlık (g)

$m_0$  : Tam kuru ağırlık (g)

## 2.2.2 Malzemelerin eğilme davranışlarının belirlenmesi

KP kullanılarak güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların üç noktalı eğilme testleri Shimadzu® UTM kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2). Her örnek grubu için beş örnek test edilmiştir. Tüm testler  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 'lik oda sıcaklığında ve %65'lik bağıl nem ortamında gerçekleştirilmiştir. Test edilen örneklerin eğilme direnci ve elastikiyet modülü TS-EN 310 (1999)'a göre hesaplanmıştır. Eğilme numunelerinin test açıklığı numunelerin kalınlığının yaklaşık 20 katıdır. Her deney örneğinin elastikiyet modülü "E" ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) eşitlik 3 yardımıyla hesaplanmıştır:

$$E = \frac{l^3(F_2 - F_1)}{4bt^3(d_2 - d_1)} \quad (3)$$

Her deney örneğinin eğilme direnci, " $\sigma$ " ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) eşitlik 4 yardımıyla hesaplanmıştır:

$$\sigma = \frac{3P_{\max}L}{2bh^2} \quad (4)$$

Burada:

$L$  : destek noktaları arasındaki açıklık (mm),

$F_2 - F_1$  : orantısız bölgede elde edilen yükler (N), burada  $F_2$  maksimum yükün ( $F_{\max}$ ) yaklaşık % 40'ı,  $F_1$  ise 10% 'dur.

$d_2 - d_1$  :  $P_2$ ,  $P_1$  yüklerine karşılık gelen deformasyon miktarları (mm),

$F_{\max}$  : maksimum yük (N),

$b$  : deney örneğinin genişliği (mm),

$h$  : deney örneğinin kalınlığı (mm).

Kullanılan ahşap esaslı levhaların ayrıca %0.2'lik akma direnci ve plastik bölgedeki tanjant modülleri de hesaplanmıştır. Bu değerler güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların doğrusal olmayan plastik davranışının modellenmesinde kullanılmıştır.



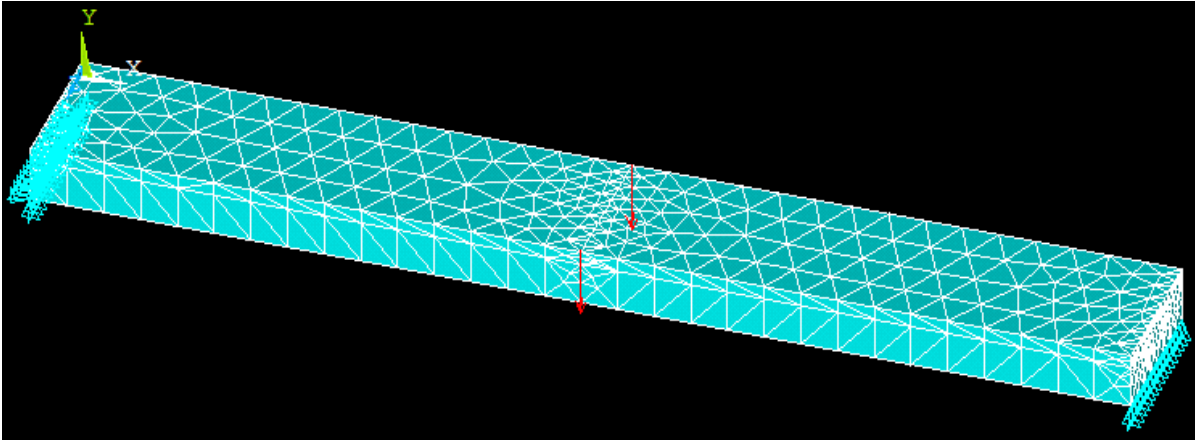
Şekil 2. Üç noktalı eğilme deneyi.

### 2.2.3 İstatiksel analiz

Yapılan çalışmada deneyler sonucunda elde edilen verilerin grup içi ve gruplar arası varyasyonları istatistiksel olarak tespit edilip gruplar arasında anlamlı farklılık olup olmadığı IBM SPSS Statistics 22 veri analiz yazılımından yararlanılarak belirlenmiştir.

### 2.2.4 Nümerik analiz

Nümerik hesaplamalar ANSYS Mechanical APDL v.2023 (ANSYS, Inc. Canonsburg, Pa, ABD) kullanılarak yapılmıştır. Güçlendirilmiş levhaların nümerik modellerinde tüm katmanlarının izotropik olduğu varsayılmıştır. Nümerik modelin ayrıklaştırılması, yaklaşık 3.000 eleman ve 5.000 düğüm içeren Solid186 (K3, Structural Solid) elemanı kullanılarak sağlanmıştır. Solid186, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı sergileyen, yüksek dereceli, 3 boyutlu, 20 düğümlü bir katı elemandır. Üst orta açıklık düğümlerine P/2 kuvveti olarak düğüm yükleri uygulanmıştır. Modeller bir uçtan basit bir şekilde desteklenmiş ve diğer uçtan yer değiştirme ve döndürme için sınırlandırılmıştır. Levhalar arasında mükemmel bir bağ olduğu varsayılarak yazılımın yapıştırma komutu (vglue) uygulanmıştır. Bu komut ile katı hacimler ortak sınırları boyunca alanları paylaşacak şekilde yeniden tanımlanır. Orta açıklıkta oluşan deformasyon ve gerilmeler, sayısal analizin bir çıktısı olarak okunmuştur. Gerilme/deformasyon eğrileri ANSYS kullanılarak oluşturulmuş ve laboratuvarında test edilen gerçek güçlendirilmiş levhaların eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Şekil 3'te ANSYS kullanılarak oluşturulan modellerden biri gösterilmektedir. Plastiklik, akma ve tanjant modülü, ANSYS aracılığıyla sunulan gerinim sertleşmesi (strain hardening ya da pekleşme) seçeneği kullanılarak tanıtılmıştır.



Şekil 3. ANSYS kullanılarak elde edilen ağ yapısı ve sınır durumları

## 3 Bulgular ve Tartışma

Çalışmada test edilen malzemelerin yoğunluk, rutubet (%) ve eğilme özellikleri Çizelge 1'de sunulmuştur. KP ile güçlendirilmiş YL'nin elastiklik modülü yükleme yönüne bağlı olarak 3000 ve 3300 N/mm<sup>2</sup>, eğilme direnci ise 11 ve 26 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır, kırılma anındaki deformasyon ise 5 ve 16 mm olarak ölçülmüştür. KP ile güçlendirilmiş MDF levhalarda elastiklik modülü yükleme yönüne bağlı olarak 4443 ve 4446 N/mm<sup>2</sup>, eğilme direnci 33 ve 42 N/mm<sup>2</sup>, kırılma anındaki deformasyon miktarı 10 ve 12,9 mm olarak ölçülmüştür.

**Çizelge 1.** Test edilen malzemelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (d, g/cm <sup>3</sup> )	Rutubet (r, %)	Elastikiyet Modülü (E, N/mm <sup>2</sup> )	Eğilme Direnci (σ, N/mm <sup>2</sup> )	Kırılma anındaki ortalama deformasyon (d, mm)
YL	0.63	8.1	1943 (457)	10.36 (2.09)	5.07
MDF	0.80	8	3409 (82)	34.75 (1.31)	13.79
KP	0.75	11.5	9104 (917)	118.94 (5.65)	6.25
YL-KP	0.70		3391 (194)	26.71 (1.78)	16.47
KP - YL	0.71		3017 (165)	11.05 (0.66)	5.15
KP -MDF	0.78		4443 (193)	33.30 (2.03)	10.40
MDF - KP	0.78		4466 (352)	42.76 (3.58)	12.90

\* Parantez içerisindeki değerler örnek gruplarının standart sapmasıdır.

Levhelerde kullanılan malzemelerin, güçlendirme yapılıp yapılmaması ya da hangi yüzeyin güçlendirildiği levhaların elastikiyet modülü ve eğilme direnci üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu varyans analizi ile ortaya konulmuştur (Çizelge 2). Levhaların elastikiyet modülü ve eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırması da sırası ile Çizelge 3 ve Çizelge 4’de verilmiştir. Çalışma sonucunda, MDF ve YL levhaların hangi yüzeyinin güçlendirildiği elastikiyet modülü için anlamlı bir farklılık ortaya koymazken eğilme direnci için anlamlı bir farklılık göstermiştir. Ayrıca, hem MDF hem de YL levhaların yüzeyi güçlendirildiğinde, güçlendirme yapılmamış MDF ve YL levhalarına göre elastikiyet modülleri anlamlı bir farklılık göstermiştir. MDF ve YL levhaların üst yüzeyinin güçlendirilmesi eğilme direncinde güçlendirilmemiş MDF ve YL panellere göre anlamlı bir farklılık ortaya koymazken, alt yüzeyinin güçlendirilmesi eğilme direnci için farklılık göstermiştir.

**Çizelge 2.** Levhaların elastikiyet modülü ve eğilme direncine etkisine ilişkin varyans analizi

		Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Kareler Ortalaması	F-değeri	p-değeri (≤0,05)
<b>Elastikiyet Modülü</b>	Gruplar arası	210997425.42	6	35166237.57	222.42	0.000
	Gruplar içi	4426970.73	28	158106.09		
	Toplam	215424396.15	34			
<b>Eğilme Direnci</b>	Gruplar arası	40827.25	6	6804.54	863.43	0.000
	Gruplar içi	220.66	28	7.88		
	Toplam	41047.91	34			

**Çizelge 3.** Levhaların elastikiyet modülü için Tukey ortalama karşılaştırma testi

Malzeme	N	Grup*
YL	5	A
KP_YL	5	B
MDF	5	B
YL_KP	5	B
KP_MDF	5	C
MDF_KP	5	C
KP	5	D

\* Aynı harf ile belirtilen örnek grupları arasında anlamlı bir farklılık yoktur

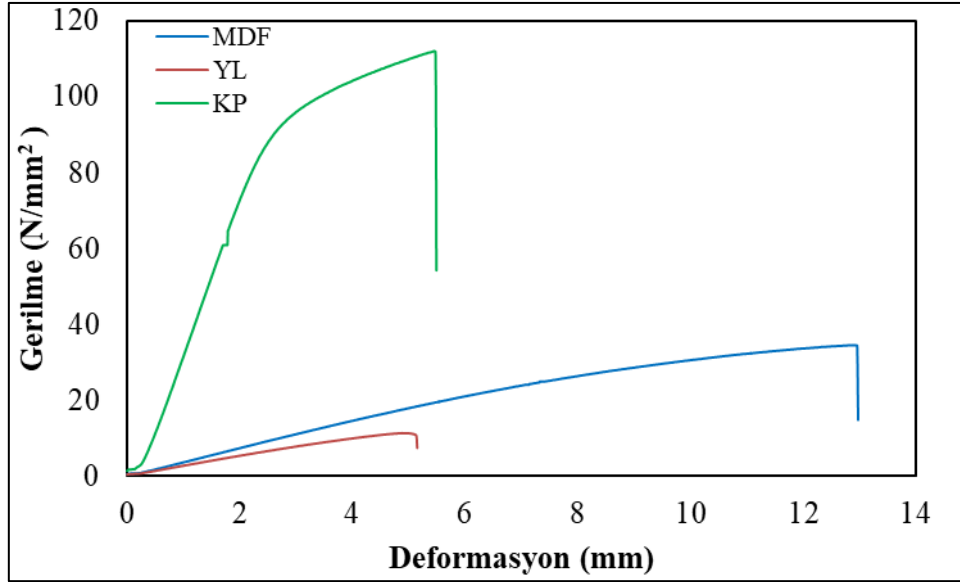


**Çizelge 4.** Levhaların eğilme direnci için Tukey ortalama karşılaştırma testi

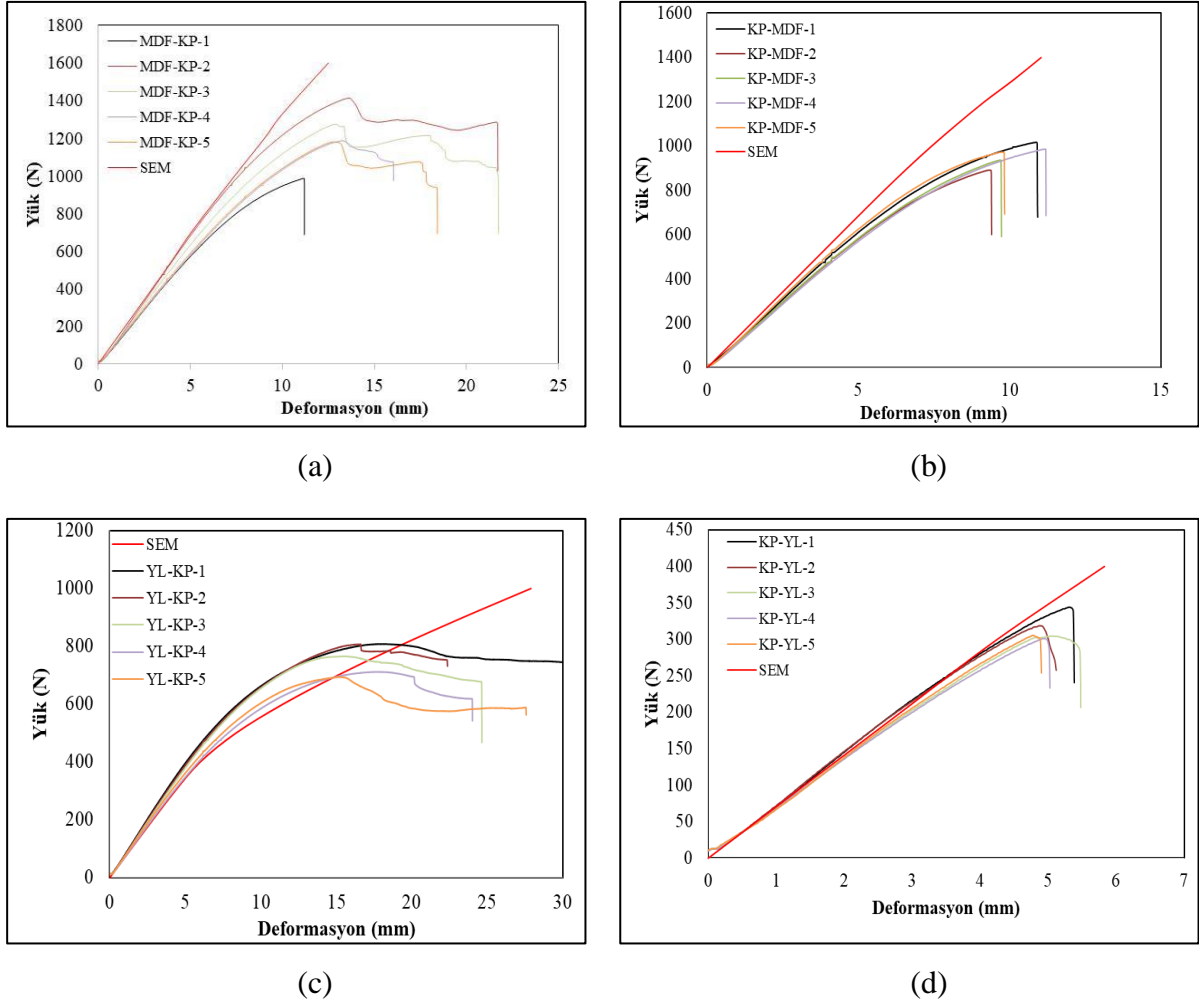
Malzeme	N	Grup*
P_YL	5	A
YL	5	A
YL_P	5	B
KP_MDF	5	C
MDF	5	C
MDF_KP	5	D
KP	5	E

\*Aynı harf ile belirtilen örnek grupları arasında anlamlı bir farklılık yoktur

Test edilen malzemeleri temsil eden ortalama gerilme-deformasyon eğrileri Şekil 4'de gösterilmiştir. Numuneler ahşap esaslı kompozit malzemelere ait olmasına rağmen, gerilme-deformasyon davranışları hammadde ve üretim süreçlerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Eğilme eğrileri karşılaştırıldığında, kontrplağın diğer ahşap esaslı malzemelerden üstün yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Ahşap esaslı levhaların deneysel sonuçları, gerilme-deformasyon eğrilerinin doğrusal bölgeye, akmaya ve onu takip eden plastik bölgeye sahip çift doğrusal olarak kabul edilebileceğini göstermiştir (Şekil 4). Bu bilgi ANSYS kullanılarak sayısal modeller oluşturmak için çok önemlidir. Test edilen KP, MDF ve YL'nin sırasıyla yaklaşık 88, 19 ve 7 N/mm<sup>2</sup>'lik bir akma gerilmesine sahip olduğu görülmüştür. Tanjant modülü değerleri sırasıyla 2000, 1700 ve 300 N/mm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

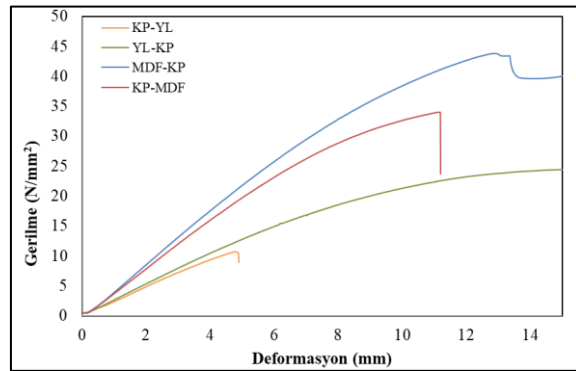
**Şekil 4.** Çalışmada kullanılan malzemelerin gerilme-deformasyon eğrileri

Şekil 5, KP ile güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların eğilme testi sonuçlarını ve nümerik modellemeyi göstermektedir. Güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların gerilme-deformasyon eğrileri KP-YL testi hariç, başlangıçta doğrusal elastik bölgeyi ve ardından plastik deformasyonu içeren çift doğrusal eğrilerdir. KP-YL ise kırılmaya kadar doğrusal bir davranış sergilemiştir.



Şekil 5. Yük deformasyon eğrileri: MDF-KP (a), KP-MDF (b), YL-KP (c) ve KP-YL (d)

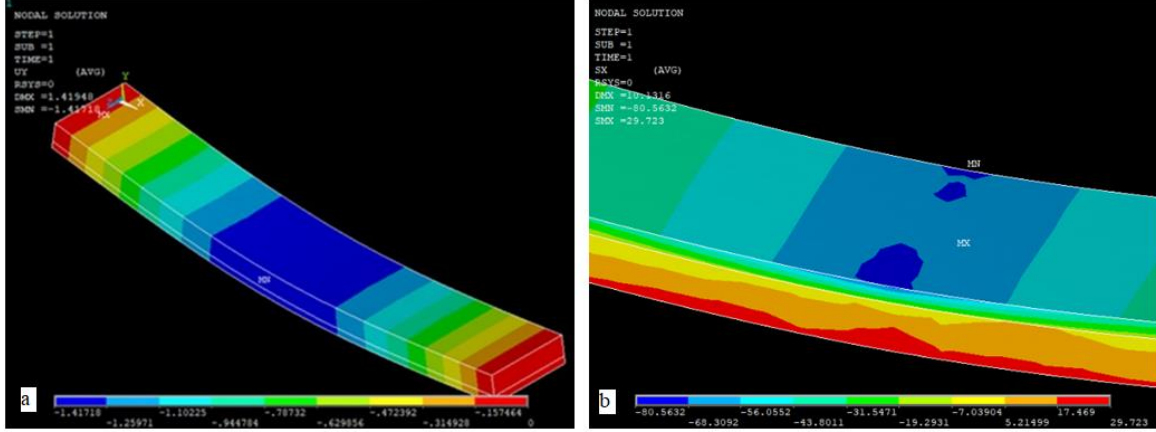
KP ile güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların birbirinden farklı eğilme davranışı gösterdiği görülmüştür. Basınç yüzeyinde yapılan güçlendirmelerde eğilme direnci anlamlı olarak değişmemiştir. Çekme gerilmeleri oluşan yüzeyde yapılan KP güçlendirme YL’da elastikiyet modülü yaklaşık iki katına çıkarmış, MDF örneklerinde ise %44’ün üzerinde artışa neden olmuştur. Şekil 6’da gösterildiği gibi KP ile güçlendirilmiş YL ve MDF levhalarda hem başlangıç elastikliği hem de maksimum gerilme açıkça farklı görülmektedir.



Şekil 6. KP ile güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların eğilme grafikleri.



Nümerik ve deneysel sonuçların karşılaştırılması, güçlendirilmiş levhalarda kırılma anına kadar olan deformasyon davranışının, ANSYS'in simülasyon sonuçlarıyla çoğunlukla iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir. Nümerik modeller, güçlendirilmiş levhaların mükemmel bir şekilde yapılandırıldığını varsaymaktadır. Bu, KP ile MDF ve YL arasındaki tutkal tabakasında hiçbir zaman gözlemlenmeyen hasar ile doğrulanmıştır. Nümerik modeller daha detaylıdır ve daha yüksek kırılma olasılığının işareti olan gerilme konsantrasyonlarını göstermektedir (Şekil 7).



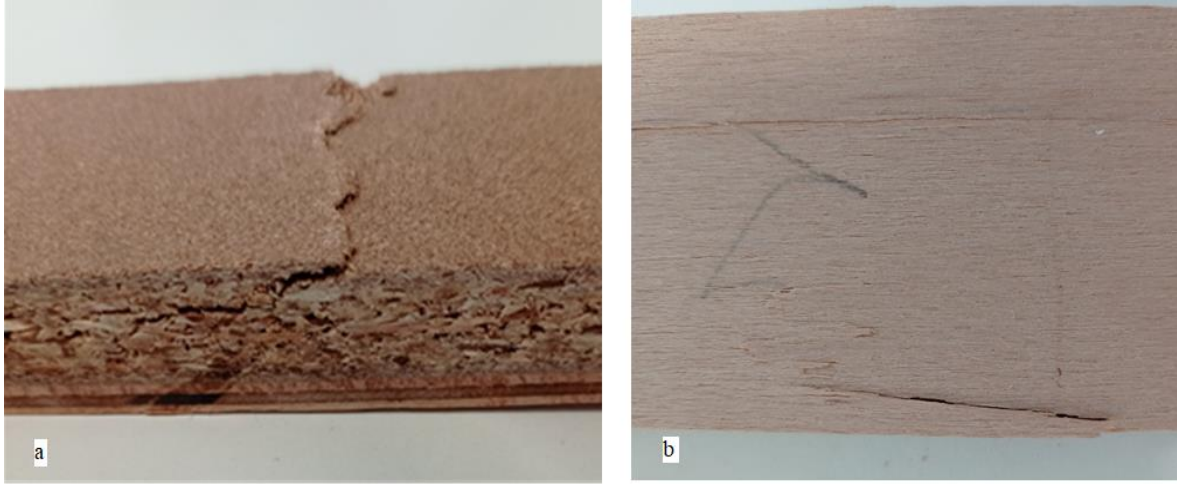
Şekil 7. Nümerik modelleme sonuçları Deformasyon (a) ve Gerilme (b)

Doğrusal olmayan davranışın nümerik modellemesi zordur. Çünkü ahşap esaslı levhaların elastoplastik davranışını tanımlayacak veriler literatürde mevcut değildir. Bu durum, modellemeyi önemli ölçüde zorlaştırmaktadır. Nümerik modellemede malzemelerin akma gerilmesi ve tanjant modülünün kullanılması, güçlendirilmiş YL ve MDF levhaların doğrusal olmayan davranışlarının ve daha kesin sonuçların elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Literatürde yapılandırılmış malzemelerin eğilme yükü altında SEM modellenmesi ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlamak mümkündür. Çoğu çalışma, nümerik modeller ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu ortaya koymuştur (Alade ve ark., 2023). Bazı çalışmalarda deformasyonun daha az olduğu sonuçlar elde edilmiştir. Ahşap kullanılırken iç kusurlar veya düzensizlikler kaçınılmaz olduğundan, nümerik modellerin daha az deformasyon vermesi beklenebilir. Kljak ve ark., (2018), YL panellerin modellenmesinde üç katmanlı ortotropik model yerine izotropik modellerin kullanılmasının doğrusal-elastik limit dahilinde daha kesin sonuçlar verdiğini ortaya çıkarmıştır.

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. Nümerik modellemede, basit eğilme modellemesinde orta düzeyde eleman sayısına ve izotrop eleman özelliklerine sahip *düzlem182* (4 düğüm) veya *katı186* (8 düğüm) gibi basit elemanlarla ağ yapısı oluşturmak doğru sonuçlar verebilir. Edgars ve ark., (2017) ve Kljak ve ark., (2018) tarafından bildirilen sonuçlar bu fikri desteklemektedir. Karmaşık yükleme şekilleri veya geometrileri, katı 186 (20 düğüm), ortotropik eleman özellikleri ve daha fazla sayıda eleman gibi yüksek dereceli ikinci dereceden elemanların kullanımını gerektirebilir. Ortotropik özellikleri kullanan doğrusal olmayan davranışla ilgili araştırmalar (Kljak ve Brezović 2007; Labans ve Kalnin, 2014; Smardzewski, 2019; Mohammadabadi ve ark., 2020) ahşap esaslı kompozitlerin modellenmesinde oldukça gerçekçi sonuçlar elde etmişlerdir.

KP ile güçlendirilmiş YL ve MDF levhalarda, yükleme yönünden bağımsız olarak görülen kırılma şekli benzerdir. Çekme yüzeyi güçlendirildiğine; kırılma YL veya MDF levha yüzeyinde başlayarak sırasıyla YL veya MDF levha orta kısmında kesme (makaslama) kırılması ve son olarak KP çekme kırılması şeklindedir (Şekil 8). Basınç yüzeyi güçlendirildiğinde kırılma YL ve MDF yüzeyden başlayıp kesme kırılması şeklinde sonlanmaktadır. Yonga veya lif esaslı ahşap levhalarda kesme direncinin özellikle orta tabakalarda zayıf olduğu iyi bilinmektedir; kusurların varlığı ve iç yapıya direncindeki farklılıklar kesme kırılmasına katkıda bulunabilir.



Şekil 8. Güçlendirilmiş YL'da kırılma şekilleri: YL-KP (a), KP-YL (b)

#### 4 Sonuç ve Öneriler

Çalışmanın sonuçları, KP ile güçlendirmenin YL ve MDF levhaların eğilme davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen çıkarımlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- KP ile güçlendirilmiş levhalar, KP ile güçlendirilmemiş levhalardan beklendiği gibi daha iyi eğilme özellikleri göstermiştir,
- KP ile güçlendirmede çekme gerilmelerinin olduğu yüzeyin güçlendirilmesi daha etkilidir,
- Çalışmada üretilen güçlendirilmiş levhaların eğilme davranışının tahmininde nümerik modeller başarıyla kullanılabilir,
- Farklı kalınlıklarda oluşturulacak yeni lamine malzemelerin davranışını tahmin etmek için sayısal modeller uyarlanabilir,
- Test edilen levha güçlendirilmiş levhaların davranışının doğrusal olmama durumu akma ve tanjant modülü kullanılarak başarılı bir şekilde tanımlanmıştır.

#### Yazar Katkıları

**Ergün Güntekin:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, araştırmanın yapılması, analizlerin yapılması, veri iyileştirme, kaynaklar, görselleştirme, makale taslak oluşturma, makale yazma, inceleme ve düzenleme. **Mesut Uysal:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), proje yönetimi, metodolojinin belirlenmesi, araştırmanın yapılması, analizlerin yapılması, veri iyileştirme, görselleştirme, inceleme ve düzenleme.

### Finansal destek beyanı

Finansal destek alınmamıştır.

### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması beyan etmemiştir.

### Kaynaklar

- 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](https://doi.org/10.21926/rpm.2301003)
- Aydın, M., ve Yılmaz Aydın, T., (2017). Sandalye çerçevesinin CATIA ile sonlu elemanlar analizi, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 621-631.
- Başboğa, H.İ., & Güntekin, E., (2016). The optimization of wood trusses connected with metal plates using ANSYS, *Pro Ligno*, 12(4), 12-20.
- 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](https://doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100419)
- Büyüksarı, Ü., Hızıroğlu, S., Akkılıç, H., & Ayrılmış, N., (2012). Mechanical and physical properties of medium density fiberboard panels laminated with thermally compressed veneer. *Composites: Part B*, 43 (2012), 110–114, DOI: [10.1016/j.compositesb.2011.11.040](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.040)
- Clough, R.W., (1960). The finite element in plane stress analysis, Proc.2nd A.S.C.E.Conf.on Elektronik Computation, 345-378, 1960.
- Edgars, L., Kaspars, Z., & Kaspars, K., (2017). Structural performance of wood based sandwich panels in four-point bending, *Procedia Engineering*, 172: 628 – 633, DOI: [10.1016/j.proeng.2017.02.073](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.073)
- Güntekin, E., (2004). Kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin sonlu elemanlar analizi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 1: 159-169.
- İstek, A., Aydemir, D., & Aksu, S., (2010). The effect of décor paper and resin type on the physical, mechanical, and surface quality properties of particleboards coated with impregnated décor papers, *Bioresources*, 5(2),1074-1083
- Kasal, A., (2006). Determination of the strength of various sofa frames with finite element analysis. *G.U. Journal of Science*, 19(4), 191-203.
- 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](https://doi.org/10.5552/drind.2016.1503)
- Kljak, J., & Brezović, M., (2007). Influence of plywood structure on sandwich panel properties: Variability of veneer thickness ratio, *Wood research*, 52(2), 77-88.
- Kljak, J., Španić, N., & Jambrekić, 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](https://doi.org/10.5552/drind.2018.1764)
- Labans, E., & Kalnins, K., (2014). Experimental validation of the stiffness optimization for plywood sandwich panels with rib-stiffened core. *Wood Research*, 59(5), 793-802.

- Matwiej, L., Wieruszewski, M., Wiaderek, K., & Pałubicki, B. (2022). Elements of designing upholstered furniture sandwich frames using finite element method, *Materials*, 2022, 15, 6084. DOI: [10.3390/ma15176084](https://doi.org/10.3390/ma15176084)
- Mohammadabadi, M., Yadamab, V., & Smith, L. (2019). An analytical model for wood composite sandwich beams with a biaxial corrugated core under bending, *Composite Structures*, 228, 111316. DOI: [10.1016/j.compstruct.2019.111316](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111316)
- Norvydas, V., & Minelga, D. (2006). Strength and stiffness properties of furniture panels covered with different coatings. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 12(4), 328-332.
- Smardzewski, J. (2019). Experimental and numerical analysis of wooden sandwich panels with an auxetic core and oval cells, *Materials & Design*, 183: 108159. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.108159](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108159)
- Tekkaya, A.E., & Soyarslan, C., (2014). Finite element method. In: Laperrière, L., Reinhart, G. (eds) CIRP encyclopedia of production engineering, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [10.1007/978-3-642-20617-7\\_16699](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16699)
- TS EN 310 (1999), Ahşap esaslı levhalar-Eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 312 (2012), Yonga levhalar – Özellikler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 322 (1999), Ahşap esaslı levhalar-Rutubet miktarının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 323 (1999), Ahşap esaslı levhalar-Birim hacim ağırlığının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 622-5 (2011), Lif levhalar - Özellikler - Bölüm 5: Kuru işlemlenmiş levhalar (MDF) için gerekler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Yılmaz, T., ve Güntekin, E., (2012). Sandalye çerçevelerinin sonlu elemanlar analizi. *SDÜ Orman Fakültesi Dergisi*, 13: 134-139.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., & Zhu, J.Z., (2005), The finite element method: its basis and fundamentals, Elsevier Butterworth-Heinemann publications, 802 p.