

## Eğilmeye çalışan budaklı kirişlerin sonlu elemanlar modelleri

Ergün Güntekin<sup>a</sup>, Tuğba Yılmaz<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Isparta

\* İletişim yazarı/Corresponding author: tugbayilmaz@sdu.edu.tr, Geliş tarihi/Received: 27.06.2012, Kabul tarihi/Accepted: 07.01.2013

**Özet:** Ahşap malzemenin mekanik davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri de yapısında doğal olarak bulunabilen budaklardır. Budakların özellikle büyüklükleri ve yeri mekanik davranışı hangi derecede etkileyeceğini belirlemektedir. Yük altında eğilmeye çalışan ahşap kirişlerde budağın bulunması meydana gelen gerilmeleri ve deformasyonu etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, farklı büyüklüklerde ve konumda budak ihtiva eden ahşap kirişlerin teorik ve sonlu elemanlar modelleri oluşturularak eğilme gerilmeleri ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Bulunan deformasyon miktarları laboratuvar şartlarında test edilen kirişlerden elde edilen deformasyon değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda oluşturulan sonlu elemanlar modellerinin belirli yükler altındaki gerçek davranışına yakın değerler verdiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Ahşap kirişler, Sonlu elemanlar yöntemi, Budaklar

## Finite element modeling of knot contained beams in bending

**Abstract:** One of the important factors that affect mechanical behavior of wood is knot that naturally occurs within. Particularly, the size and location of the knots will determine the level of this effect on mechanical behavior. The presence on knots in wood beams that are in bending may change the magnitude of the bending stresses and deformation. In this study, finite element models of the wood beams that contain knots in different shape and location have been generated and bending stress and deformation analysis have been performed. Amount of deformation obtained has been compared with those that are measured in laboratory conditions. Results of the study indicated that finite element models have given very realistic values under the loads applied.

**Keywords:** Beams, Finite element method, Knots

### 1. Giriş

Ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılmaya başlanması çok eskilere dayanmaktadır. Önceleri, deneyimlerle yapılan uygulama, mühendislik alanındaki ilerlemelere paralel gelişen yapı tekniğiyle bilimsel olarak yapılanmaya başlamıştır. Daha sonra, ahşap yapıda kullanılan birleştirme gereçlerinin de, aynı şekilde, modern teknolojiye göre araştırılıp yönetmeliklerde yer almaları ahşap yapının yaygınlaşmasına yardım etmiştir. Malzemelerin akıllıca ve dönüştürülerek kullanımının önemini kavramak, yaşam konforunu artıran, doğru planlama ve enerji öncelikli tasarım ile üretilen her türlü araç gerecin ve yapıların çoğalmasını desteklemek gerekmektedir. Hafif olması, dayanıklı olması, boyalarla artırılan yangın direnci, emprenye edilerek çürüme ve böcek tahribatına karşı korunması, yapı söküldüğünde yeniden kurulabilmesi, onarım ve plan değişikliğinin kolay olması, enerji ve çevre dostu, depreme dayanıklı olması, çelik, beton, taş ve kerpiçle mükemmel bir uyum içerisinde kullanılabilmesi gibi özellikler ahşap malzemenin ekolojik tasarım kriterleri ile uygun olduğunu göstermektedir (Bostancıoğlu vd., 2004).

Ahşap, yapı malzemesi olarak asırlarca kullanılmış, kendi bünyesinde bulundurduğu hafifliğine karşın dayanıklılığının yüksek oluşu, yazın serin kışın sıcak tutuşu, kolay sökülüp monte edilebilmesi gibi üstün fiziksel ve mekanik özellikleri sayesinde vazgeçilmez bir yapı

malzemesi olma özelliğini devam ettirmektedir (Uzunoglu vd., 2009).

Ahşabın yapı malzemeleri olarak kullanılabilmesi için mekanik davranışının bilinmesi gerekmektedir. Ahşap malzemenin mekanik davranışını etkileyen faktörleri doğal faktörler (özellikler, budaklar, lif kıvrıklığı, reaksiyon odunu vb.) ve çevresel faktörler (rutubet, sıcaklık, yük altında geçen zaman, böcek mantar zararlıları vb.) olarak ikiye ayırabiliriz.

Budak, dal odununun gövde içerisinde kalması sonucu oluşup, yapısal özelliği normal kök ve gövde odunundan farklılık göstermektedir. Budakların çapı, bulunduğu yer, büyüklüğü, budağın cinsi, miktarı mekanik özellikleri önemli ölçüde azaltabilmektedir (Bozkurt ve Göker, 1987). Xu (2002) budakların eğilmede elastikiyet modülü üzerine olumsuz bir etkisi olduğunu ifade etmektedir. Aynı şekilde Rajput vd.(1980) da budakların boyutunun artmasıyla elastikiyet modülünün azaldığını ortaya çıkarmışlardır.

As vd. (2006) sarıçam odununda değişik budak oranlarında eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde budaksız örneklerle oranla elde edilen elastikiyet modülü değerlerini budağın basınç ve çekme tarafında bulunmasına göre incelemiştir. Budak oranının artmasıyla elastikiyet modülü doğrusal bir şekilde azalmaktadır.

Grant vd. (1984) liflere paralel çekme direncinin kenar budakları içeren kerestelerin, merkezinde budak içeren kerestelere göre daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Chui (1991) ahşap kirişlerde kesme direncinin budaklı örneklerde daha yüksek olduğunu, ancak, budaklı örneklerin

sadece %45'inin makaslama değerinin eşleştirilmiş örneklerden daha yüksek olduğunu belirtmiştir.

Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) mühendislikte malzemelerin veya sistemlerin dış etkenlere (kuvvet, ısı, elektrik, vb.) karşı davranışlarının analizinde kullanılan nümerik bir yöntemdir. SEM yapısal statik hesaplamalarda rijitlik matrisi {K} ile deformasyonlar matrisinin {u} kuvvetler matrisine {F} eşitlenmesi ile kurulan matematik modelin nümerik çözümünü içerir. SEM'i kullanan çok sayıda bilgisayar programı mevcuttur; ALGOR™, COSMOS/M™, NASTRAN™, ADINA™, ve ANSYS™ bunlara örnek olarak verilebilir (Güntekin, 2004).

Mackerle (2005) tarafından yapılan bir literatür taramasında 1995-2004 yılları arasında sonlu elemanlar metodunun ahşap ile ilgili araştırmalarda kullanıldığı 300'e yakın çalışmanın olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalar ahşabın temel özelliklerinden yapıda kullanımına kadar birçok alanı içermektedir.

Türkiye'de 1995-2010 yılları arasında sonlu elemanlar metodunun kullanıldığı çalışma sayısı ULAKBİM verilerine göre 80 kadardır. Bunlardan sadece iki tanesi ahşap malzemenin kullanıldığı çalışmalardır.

Kasal vd. (2007) tarafından yapılan bir çalışmada montaja hazır koltuk iskeletlerinin gerilme analizi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada doğu kayını, sarıçam, kontraplak, MDF, OSB kullanılarak üç farklı koltuk iskeleti yapılmıştır. TS9215'e göre yüklenen çerçevelerin kırılma anında maksimum yükler bulunarak RISA 3D yapısal analiz programında modellenen aynı çerçevelere uygulanmıştır. Programdan elde edilen çerçeve elemanlarındaki aksenal, kesme ve eğilme gerilmeleri deneysel olarak elde edilen emniyet gerilmeleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada eğilme gerilmelerinin ve malzeme çeşidinin sistemin genel deformasyonu üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Güntekin (2004) tarafından yapılan bir çalışmada kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin modellenmesi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan modellerin analizi ANSYS programı kullanılarak yapılmıştır. SEM modelleri ile elde edilen moment-rotasyon eğrileri kavelalı birleştirmelerin laboratuvarında yapılan statik yükleme testlerinden elde edilen moment-rotasyon eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada SEM modellerinin ve test yoluyla elde edilen eğrilerin birbirine yakın değerlerde olduğu belirtilmiştir.

Bu çalışmada doğal kusurlardan olan budakların yük altındaki kirişlerin eğilmedeki davranışına etkisi sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

## 2. Materyal ve yöntem

### 2.1. Materyal

Çalışmada ahşap malzeme olarak ülkemizde yayılış alanlarının genişliği göz önüne alınarak Kızılcık (Pinus brutia Ten.) kullanılmıştır. Çalışmanın amacına uygun olarak budaklı olan malzemeler seçilmiştir. Deney numuneleri, 20±2 °C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem şartlarında değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir.

### 2.2. Yöntem

Bu çalışmanın ilk aşamasında deney örneklerinin rutubet ve yoğunlukları, elastikiyet modülü (E) değerleri

hesaplanmıştır (Çizelge 1). Budaksız örneklerde yüklemeler altında meydana gelen eğilme gerilmeleri ile deformasyon değerleri teorik olarak aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\text{Eğilme gerilmesi } f_b = \frac{M}{S} \quad (1)$$

$$\text{deformasyon (sehim) } d = \frac{PL^3}{48EI} \quad (2)$$

Burada:

$M$  = maksimum moment, Nmm

$S$  = kesit modülü (mm<sup>3</sup>),

$P$  = yük (N),

$L$  = mesnet noktaları arası mesafe (mm),

$E$  = elastikiyet modülü (N/mm<sup>2</sup>),

$I$  = atalet momenti (mm<sup>4</sup>),

Kirişlerdeki deformasyonlar LVDT yardımıyla ölçülmüştür. İkinci aşama olarak ahşap kirişler sonlu elemanlar yazılımı olan COSMOSWorks programında modellenerek gerilme ve deformasyon analizleri yapılmıştır. Budaklar kirişlerde yerleri boşluk bırakılarak modellenmiştir. Sonlu elemanlar metoduyla problemlerin çözülebilmesi için programda modellerin geometrik ölçüleri, elastikiyet modülü, poisson oranı, elemanın destek noktalarının durumları ve uygulanacak kuvvetlerin değerleri girilerek analizler yapılmıştır. Tüm malzeme ve kesit özellikleri her bir eleman için ayrı olarak tanımlanmış ve analizleri yapılmıştır. Bilgisayar destekli üç boyutlu yapısal analizler için izlenen genel prosedür aşağıdaki gibidir;

- Modelin oluşturulması
- Malzeme özelliklerinin belirlenmesi
  - Malzemenin elastikiyet modülü değerinin girilmesi
  - Poisson oranının girilmesi
- Mesnet noktaları ve yüklemenin tanımlanması
  - Mesnet noktalarının ve mesnet tiplerinin belirlenmesi
  - Kiriş modellerinin orta noktalarına yüklerin uygulanması
- Elemanlara ayırma
- Çözüm aşaması
- Sonuçların okunması

## 3. Bulgular ve tartışma

Şekil 1'de örnek bir COSMOS programı çıktısında üç numaralı deney örneği için 3021 N' luk yük altında oluşan gerilmeler gösterilmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında kusursuz bir kirişte deformasyon ve gerilmeler teorik olarak hesaplanarak sonlu elemanlar modeli sonuç değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 2) Teorik gerilme ve laboratuvarında elde edilen deformasyon değerleri ile sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sonuçların son derece uyumlu olduğunu tespit edilmiştir.

Şekil 3'te orta noktadan yüklenen iki numaralı deney örneğinin yaklaşık orta noktasında bulunan 40-45 mm çapında bir budanın maksimum eğilme gerilmesi değerini yaklaşık 1.5 kat arttırdığı, aynı şekilde COSMOS programının budaklı örneğin deformasyon miktarını yaklaşık olarak tahmin ettiği gösterilmiştir. Şekil 4'te aynı büyüklükte fakat örneğin alt yüzeyine daha yakın bir budanın maksimum eğilme gerilmesi yaklaşık 2.4 kat

artırırken deformasyon değeri COSMOS programında gerçeğe çok yakın bir biçimde bulunmuştur.

Şekil 5'te dört numaralı örnekte yaklaşık 50 mm çapında yarım ay şeklinde bir budağın maksimum eğilme gerilmesini 3.5 kat arttırdığı tespit edilmiştir. Altı numaralı örnekte ise yaklaşık 40 mm çapında örneği boylamasına geçen bir budağın maksimum eğilme gerilmesini yaklaşık 4.3 kat arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 7). Yedi numaralı örnekte ise yaklaşık 25-30 mm çapında üç adet budak örneğin nötral eksenine yakın konumlanmıştır. Bu örnekte maksimum eğilme gerilmelerinin teorik olarak  $38 \text{ N/mm}^2$ , COSMOS programında ise  $47 \text{ N/mm}^2$  olduğu görülmüştür.

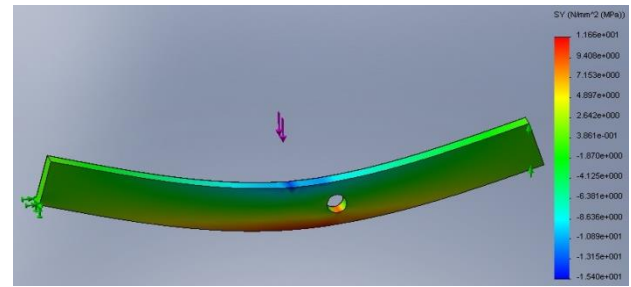
Laboratuvar ortamında ölçülen deformasyon değerleri COSMOS programında bulunan deformasyon değerleri ile tam olarak örtüşmektedir. Eğilmeye çalışan kirişlerde eğilme gerilmeleri alt ve üst yüzeylerde maksimum, nötral ekseninde ise 0'dır. Hooke kanununa göre yük altında bir elemanda elastik bölgede  $E = \sigma / \varepsilon$  eşitliği geçerlidir. Dolayısıyla laboratuvar ortamında bulunan şekil değişiklikleri (deformasyonlar) oluşan gerilmelerin bir sonucudur.

Gere ve Timoshenko'ya (1997) göre çekmeye çalışan bir çubukta küçük deliklerin bile olması gerilme yoğunlaşmalarına sebebiyet vermekte ve gerilmeleri yaklaşık 3 katına kadar çıkarabilmektedir. Çalışmada da budakların kirişlerin çekmeye çalışan alt taraflarında olması gerilme miktarlarını yaklaşık 4.3 katına kadar çıkardığı görülmüştür. Bunun sebebi budakların kirişlerde atalet momentini düşürmeleridir. Bozkurt ve Göker'e (1987) göre

Ladin yapı kerestesinde budağın 15 mm'den 45 mm'ye çıkması çekme direncini % 85 oranında azaltmaktadır. Williams vd. (2000) e göre kerestenin yük altında davranışı budak veya boşluk olduğunda değişmemektedir. Ancak budakların etrafında lif kıvrıklığının olması oluşan gerilme dağılımlarını ve kırılmanın olacağı noktayı etkilemektedir (Bano vd., 2011).

Laboratuvar ortamında gerilmelerin tam olarak ölçülebilmesi için strengaçlere (strain gage) ihtiyaç duyulmaktadır. Bunların kullanılması pahalı ve oldukça zaman alıcıdır. Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile birçok mühendislik analizi pahalı laboratuvar analizlerinin önüne geçilerek yapılabilmektedir.

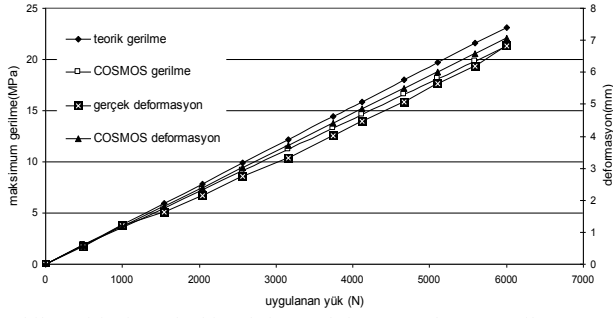
Ahşap doğal bir malzeme olduğu için budakların olması kaçınılmazdır. Yapısal olarak kullanılacak budaklı kirişlerin yük altındaki davranışı sonlu elemanlar metodu ile önceden tahmin edilebilir.



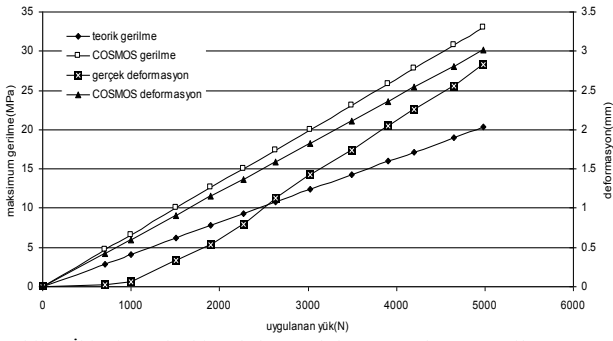
Şekil 1. COSMOS program çıktısı

Çizelge 1. Test edilen ve modellenen örneklerin genel özellikleri

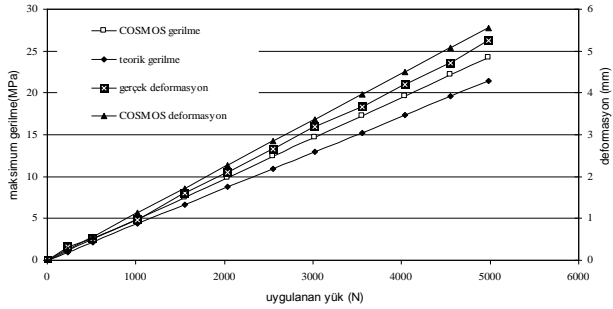
Örnek no	Örnek şekilleri	Boyutlar (mm)
1		L= 1000 b= 94 h= 44 E=6029 MPa d=0.58 g/cm <sup>3</sup>
2		L = 1200 b=100 h=44 E=9617 MPa d=0.55 g/cm <sup>3</sup>
3		L=1140 b= 93 h= 46 E=6342 MPa d=0.56 g/cm <sup>3</sup>
4		L=1300 b= 100 h= 44 E=9519 MPa d=0.58 g/cm <sup>3</sup>
5		L=1140 b= 89 h= 44 E=6380 MPa d=0.57 g/cm <sup>3</sup>
6		L= 1140 b= 94 h= 44 E= 7618 MPa d=0.57 g/cm <sup>3</sup>
7		L= 3000 b= 94 h= 44 E=12621MPa d=0.55 g/cm <sup>3</sup>



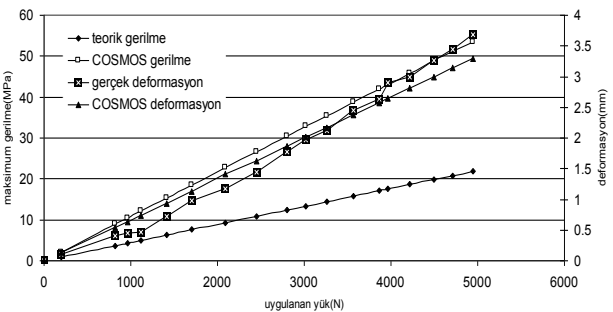
Şekil 2. Birinci örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



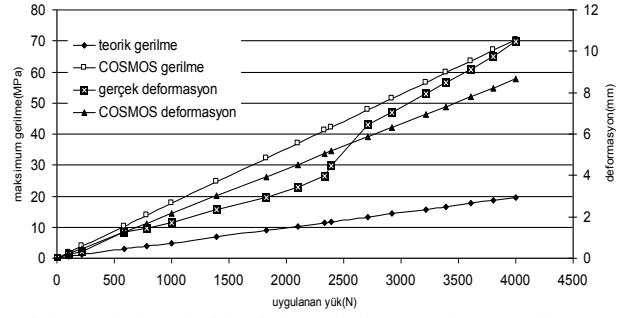
Şekil 3. İkinci örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



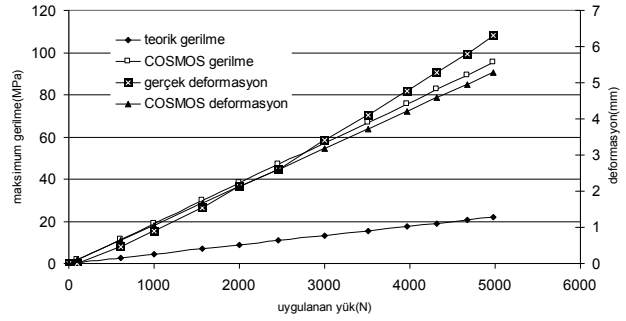
Şekil 4. Üçüncü örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



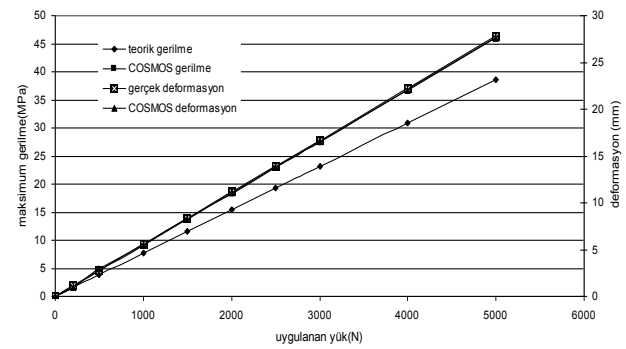
Şekil 5. Dördüncü örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



Şekil 6. Beşinci örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



Şekil 7. Altıncı örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması



Şekil 8. Yedinci örnekteki maksimum deformasyonların ve eğilme gerilmelerinin karşılaştırılması

## Kaynaklar

- As, N., Göker, Y., Dünder, T., 2006. Effect of knots on the physical and mechanical properties of scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Wood Research*, 51(3):51-58.
- Bano, V., Arriaga, F., Solian, A., Guaita, M., 2011. Prediction of bending load capacity of timber beams using finite element method simulation of knots and grain deviation. *Biosystems Engineering*, (109): 241-249.
- Bostancıoğlu, E., Düzgün, E., 2004. Ekoloji ve ahşap-Türkiye'de ahşap malzemenin geleceği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 9, Sayı 2: 37-44.
- Bozkurt, A.Y., Y. Göker, 1987. Fiziksel ve Mekanik Ağaç Teknolojisi. İ.Ü. Yayın No:3445, O.F. Yayın No: 388, İstanbul.
- Chui, Y.H., 1991. Simultaneous evaluation of bending and shear modulus of wood and the influence of knots on these parameters. *Wood Science and Technology*, 25:125-134.
- Grant, D.J., A. Anton, P. Lind, 1984. Bending strength, stiffness and stress-grade of structural *Pinus radiata*: Effect of knots and timber density. *New Zealand J. of Forestry Science*, 14(3):331-348.
- Gere, J.M., Timoshenko, S.P., 1997. *Mechanics of Materials*. PWS Publishing Company, NY, USA.

- Güntekin, E., 2004. Kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin sonlu elemanlar analizi. Süleyman Demirel Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri A, Sayı 1:159-169.
- Kasal, A., Efe, H., Erdil, Y.Z., 2007. Montaja hazır koltuk iskeletlerinin mukavemetinin sonlu elemanlar analizi ile belirlenmesi. Politeknik Dergisi, Cilt 10, Sayı 4: 411-422.
- Mackerle, J., 2005. Finite element analyses in wood research: a bibliography. Wood Science and Technology. 39(7): 579-600.
- Rajput, S.S., V.K. Gupta, R.C. Lohani, 1980. A study of effect of knot on the strength of timber. Journal of the Indian Academy of Wood Science 11(1):8-15.
- Xu, P., 2002. Estimating the influence of knots on the local longitudinal stiffness in radiata pine structural timber. Wood Science and Technology, 36: 501-509.
- Uzunoğlu, M.M., Emiroğlu, M., Kap, T., Yuca, Y., 2009. Ahşap iskelet sistemlerin deneysel ve nümerik olarak incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, s. 2270-2280, Karabük.
- Williams, J.M., Fridley, K.J., Cofer, W. F., Falk, R.H., (2000). Failure modelling of sawn lumber with a fastener hole. Finite Element in Analysis and Design, 36(1), 83-98.