



Çapraz lamine kerestelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi

Analysis of cross laminated timbers with finite element method

Halil KARATAY^{id}, Ergün GÜNTEKİN^{id}, Mesut UYSAL^{id}

Bursa Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye.

Sorumlu yazar:

Halil KARATAY

E-mail:

halilkaratay_20@hotmail.com

Gönderim Tarihi:

05/04/2024

Kabul Tarihi:

13/05/2024

Atf:

Karatay, H., Güntekin, E., Uysal, M. 2024. Çapraz lamine kerestelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi. Ağaç ve Orman, 5(1): 37-41.

DOI: 10.59751/agacorman.1465706

Özet

Çalışmada, Çapraz Lamine Kerestelerin (ÇLK) Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile yük altında eğilme davranışları incelenmiş; literatürde yer alan Uludağ göknarı ve karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerin eğilme özellikleri kullanılmış ve çalışma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak ahşap malzemenin ortotropik malzeme özellikleri ve laminasyonda kullanılan tutkallama dikkate alınarak modeller oluşturulmuştur. Uludağ göknarı odunundan elde edilen ÇLK'lerde malzemenin yük-deformasyon eğrisi 700 N yük uygulamasından sonra lineer bölgeden uzaklaşırken, karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerde ise 1400 N'dan sonra uzaklaşmaktadır. Uludağ göknarı'ndan elde edilen ÇLK'lerde 800 N altındaki deformasyon 10,50 mm iken karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerde ise 13,85 mm'dir. Ayrıca, nümerik analizlerden elde edilen yük-deformasyon grafikleri ile deneysel sonuçların gösterildiği verilerdeki yük-deformasyon eğrileri uyumludur. Çalışmanın sonuçları, karaçam ve Uludağ göknarı odunundan elde edilen ÇLK'lerin ortotropik özellikleri kullanılarak bilgisayarlı ortamda simüle edilmesi yerli odun türlerimizin yapı sektöründe kullanılması açısından önem arz etmektedir.

Anahtar kelimeler: Sonlu elemanlar metodu, Çapraz lamine keresteler, Eğilme özellikleri, Uludağ göknarı, Karaçam.

Abstract

The bending behavior of cross-laminated timber (CLT) under the imposed load was examined using the Finite Element Method (FEM) in the study. For this reason, the bending properties of CLTs made of Uludağ fir and black pine wood in the literature were used and compared with the study results. Specimens were modeled using ANSYS finite element software, taking into account the orthotropic material properties of the wood and the gluing used in lamination. While the load-deformation curve of the CLT made of Uludağ fir wood moved away from the linear region after imposing a load of 700 N, it moved away from the linear region after 1400 N for the CLT made of black pine wood. While the deformation under 800 N was 10.50 mm in CLTs made of Uludağ Fir wood, it was 13.85 mm in those of black pine wood. Besides, the load-deformation curves obtained from numerical analyses were compatible with the load-deformation curves in the data where the experimental results were shown. The results come into prominence in terms of the use of wood species - cut from native trees - in the wood construction industry by simulating them in a computerized environment using the orthotropic properties of black pine and Uludağ fir wood.

Keywords: Finite element method, Cross laminated timber, Bending properties, *Abies bornmulleriana*, *Pinus nigra*.

1. Giriş

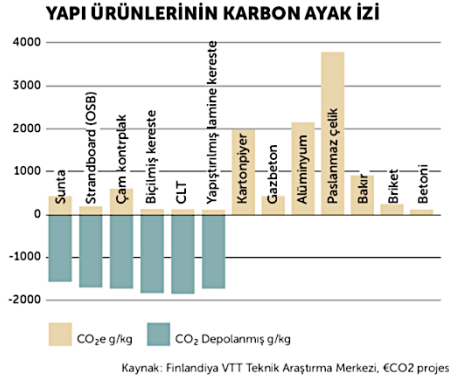
Sonlu Elemanlar Metodu (SEM), bir ürünün gerçek dünyadaki kuvvetlere, titreşime, ısıya, sıvı akışına ve diğer fiziksel etkilere nasıl tepki vereceğini tahmin etmek için bilgisayarlı bir yöntemdir. Bir ürünün kırılacağını, yıpranmayacağını veya tasarlandığı şekilde çalışıp çalışmayacağını gösteren (Güntekin, 2004) SEM, çok çeşitli mühendislik problemlerine sonuç elde edebilen sayısal bir işlemdir. Kararlı rejimli, değişken rejimli, lineer ve lineer olmayan durumlar için gerilim analizi, ısı transferinin analizi, akışkanlar mekaniğinin analizi ve elektromanyetizma problemlerinin analizleri sonlu elemanlar yöntemi ile yapılabilir (Eppstein, 2001).

SEM yapısal statik hesaplamalarda rijitlik matrisi $\{K\}$ ile deformasyonlar matrisinin $\{u\}$ kuvvetler matrisine $\{F\}$ eşitlenmesi ile kurulan matematik modelin nümerik çözümünü içerir (Güntekin, 2004). Bu model Eşitlik-1'de verilmiştir.

$$\{F\} = [K] \times \{u\} \quad (1)$$

SEM, karmaşık problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metot, i) geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi, geometrik biçimli basit alt bölgelere ayrılır, ii) her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir ve (iii) aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri elde etmenin problemin çözümünde yeterli olduğu belirtilmiştir (Topçu ve Taşgetiren, 1998).

Günümüzde doğal, yenilenebilir ve kolay geri dönüştürülebilir malzemelerin yapı malzemesi olarak kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir. İnşaat sektöründe çevresel gerekliliklerin artması ve uzun vadeli sürdürülebilirlik giderek daha fazla tartışılan bir konudur. Yaygın olarak çelik ve beton yapıların yerine kullanılan ahşap yapılar, daha küçük karbon ayak izi sayesinde çevre üzerindeki etkiyi önemli ölçüde azaltmaktadır ve dolayısıyla inşaat mühendisliğinde sürdürülebilirliğe önemli katkı sağlamaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Bazı yapı malzemelerinin karbon emisyon ve depolama oranları (URL-1).

Figure 1. Ratios of carbon emission and storage for same structural materials.

Ahşap yapıların, özellikle yüksekliğe sahip binalarda (çok katlı binalar) kullanımları sınırlıdır (Eppstein, 2001). Kirişler, aşıklar ve kolonlar gibi standart ahşap elemanları da çok katlı binalar için kullanılabilir, ancak yatay yönde güçlü bir takviyenin gerçekleştirilmesi gereklidir. ÇLK paneller dikey ve yatay yük taşıyıcı yapılarda kullanılabilen ve mekanik özellikleri daha yüksek mühendislik ürünü ahşap malzemeleridir. ÇLK panelleri alan yapısal elemanları olmakla beraber, dikey ve yatay kuvvetleri taşıyabilirler. Böylece, tüm yapının temel takviye elemanları olarak görev yapabilirler (Tavşan vd., 2022).

Odon anizotropik yapı bir malzemedir, özellikleri yönlerine bağlı olarak değişmektedir ve en yaygın kabulde ortotropik özelliğe sahip bir materyaldir. Ortotropik özellik gösteren odunda; boyuna (lif yönüne paralel), radyal (özden kabuğa doğru uzanan) ve teğet (yıllık halkalara paralel uzanan) üç farklı yön bulunur. Ortotropik karakter odunun tüm malzeme özelliklerini etkiler. Bu da odunun elastik ve mukavemet özelliklerinin yönlerine bağlı olduğunu göstermektedir. Elastiklik modülü değeri, liflere paralel yönde en yüksek, radyal yönde daha küçük, yıllık halkalara teğet yönde ise en düşüktür. Örneğin, ahşabın lif doğrultusundaki basılma dayanımı buna dik doğrultudakinin yedi katıdır. Çekme halinde bu kat daha fazla olup 20-30 kat değerlerine ulaşabilir (Şirin ve Aydemir, 2016).

Vilguts vd. (2015), ANSYS sonlu elemanlar analizi yazılımını kullanarak bir tasarım metodu ortaya koyarak ÇLK'lerde orta katmanın yük taşıma kapasitesine istatistiksel

olarak önemli bir etkisinin olmadığını ortaya çıkarmışlardır. Diaz vd. (2019) katman kalınlığını, katman sayısı ve katmanlarda bulunan panellerin uç birleştirme tipinin ÇLK malzemesinin termal özellikleri üzerine etkisini incelemişler ve sonuçları nümerik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonuçları katman kalınlığı ve katman sayısındaki değişimin termal özellikler üzerine çok az bir etkisi olduğunu, ama U tipi uç birleştirmenin Z tipine göre sıcaklığı %20 daha az geçirdiğini nümerik sonuçları ile göstermiştir.

Kozaric vd. (2020), ÇLK malzemesinin taban döşemelerinde kullanılabilirliğini inceleyerek malzeme uzunluğu 4 m, 5 m ve 6 m olarak artış gösterdiğinde deformasyonun arttığını, katman sayısı (katman kalınlıkları aynıdır) 3, 5 ve 7 katman olarak arttıkça deformasyonun azaldığını deneysel ve nümerik sonuçlar ile ortaya koyarken, nümerik sonuçların deneysel sonuçlardan yaklaşık %1 farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir. Okuni ve Bradford (2021), ÇLK katmanları arasında tutkal yapıştırma performansını pres sıcaklığının artışıyla deneysel ve nümerik olarak incelemişler ve sıcaklık artışı ile ÇLK katmanları arasında bulunan tutkalın dayanımın azalttığını hem deneysel hem de nümerik olarak ortaya koymuşlardır. Haftkhani ve Hematabadi (2022) ise farklı lif yönü açılarına sahip üç katmanlı ÇLK malzemelerinin deneysel ve nümerik analizi üzerinde çalışmışlar ve ABAQUS yazılımı ile elde edilen SEM analizi sonuçları eğilme ve kayma gerilmesi sonuçlarının yaklaşık %14,5 fark gösterdiğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı; SEM ile ÇLK malzemelerinin üç nokta eğme deneyi altında modellenmesidir. SEM sonucu elde edilen nümerik sonuçlar Uysal vd. (2022)'nin deneysel sonuçları ile karşılaştırılacaktır. Çalışmamızın hedefleri, i) izotropik ahşap ve tutkal malzemesi tanımlamasının yapılması, ii) katmanlar arası etkileşim tanımlanması, iii) üç nokta eğme deneyinin modellenmesi, iv) nümerik ve deneysel sonuçlarda maksimum gerilme değerlerinin karşılaştırılmasıdır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Materyal

Uysal vd. (2022), Uludağ göknarı (*Abies nordmanniana* subsp. *bornmulleriana*) ve karaçam (*Pinus nigra*) odunundan elde edilen keresteler ile ÇLK malzeme üzerinde çalışarak elde edilen masif ve ÇLK malzemelerin bazı mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Masif ve ÇLK malzemeler için eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerleri (Uysal vd., 2022).

Table 1. Values of bending strength and modulus of elasticity for solid wood and CLT materials.

Malzeme	Odon türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Eğilme direnci (N/mm ²)			Elastikiyet modülü (N/mm ²)		
			Ortalama	SS	VK	Ortalama	SS	VK
Masif	Uludağ göknarı	0,42	65,01	1,89	%2,9	9093,51	298,57	%3,3
	Karaçam	0,54	83,80	10,22	%12,2	11068,79	1657,82	%15,0
ÇLK	Uludağ göknarı	0,43	38,45	3,04	%7,9	5273,42	663,25	%12,6
	Karaçam	0,57	64,57	10,03	%15,5	8657,00	1390,86	%16,1

*SS: Standart sapma, VK: Varyasyon katsayısı

2.2 Çapraz lamine kirişlerinin ANSYS sonlu elemanlar analizi programı ile çözülmesi

Ortotropik ve izotropik malzemelerin SEM ile numerik analizi için ANSYS Mechanical APDL R2 2022 programında kullanılan elastik ve poisson değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu değerler literatür araştırmalarından (Uysal vd. 2022; Yılmaz Aydın and Özveren, 2019) alınmıştır.

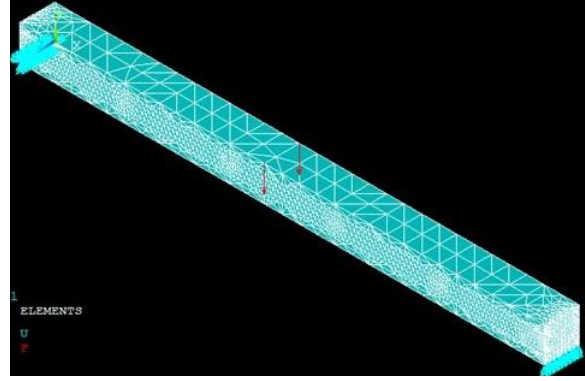
Tablo 2. SEM’da kullanılan elastik ve poisson oranı değerleri.
Table 2. Values of elasticity and poisson ratio used in FEM.

	Uludağ göknarı	Karaçam
Boyuna yönde elastikiyet modülü	9000 N/mm ²	11000 N/mm ²
Radyal - Teğet yönde elastikiyet modülü	415 N/mm ²	915 N/mm ²
L_{yield}	45 N/mm ²	56 N/mm ²
R-T L_{yield}	3,5 N/mm ²	5 N/mm ²
Poission oranı	0,3	0,3

ÇLK örneklerinin sayısal modellerinde, tüm katmanlarının izotropik olduğu varsayılmış ve bir elastikiyet modülü (E) ve bir Poisson oranı (ν) değeri kullanılmıştır. Sayısal modelin ayrıştırılması *Solid186* elemanı kullanılarak, yaklaşık 50.000 eleman ve 70.000 düğüm noktası ile yapılmıştır. Yapısal problemlerin modellenmesinde en sık tercih edilen *Solid186*, ikinci dereceden yer değiştirme davranışı sergileyen yüksek dereceli 3 boyutlu 20 düğüm noktalı katı elemandır. Düğüm noktası başına üç serbestlik derecesi olmasından dolayı bu eleman 60 serbestlik derecesine sahiptir.

Modellemede *tetrahedral* eleman seçeneği kullanılmıştır. Üst orta açıklık iki düğüm noktasına $P/2$ kuvveti uygulanmış ve modeller bir uçtan basit ve diğer uçtan öteleme ve döndürme

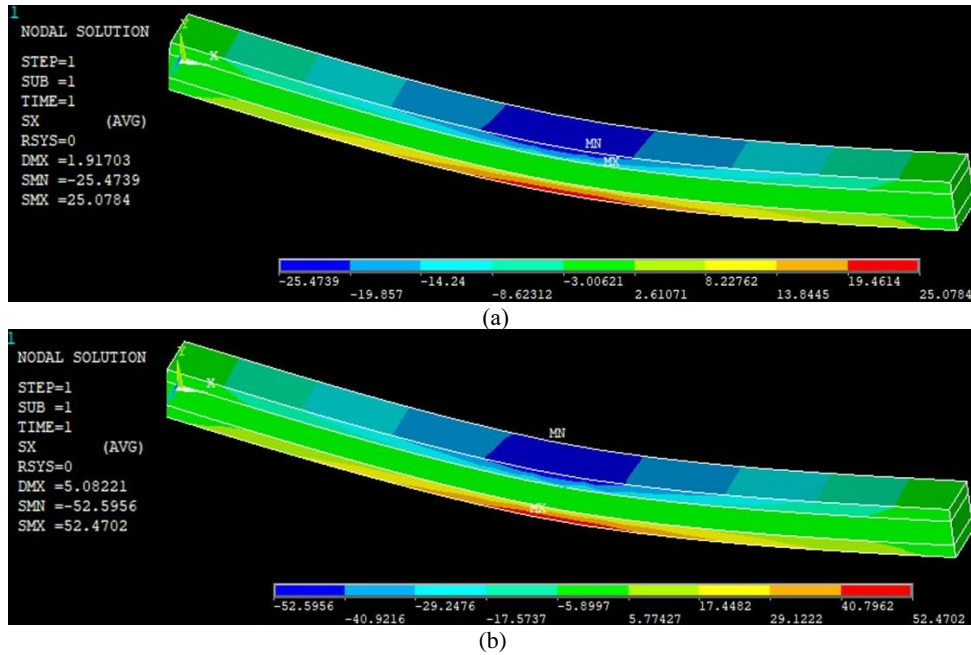
için sınırlandırılmıştır (Şekil 2). Temas bölgesindeki yüzler ile çekirdek arasında mükemmel bir bağın olduğu varsayılarak yazılımın *Prep* seçeneğinden sağlanan *Glue* komutu uygulanmıştır. Orta noktanın deformasyonu, maksimum gerilme ve örneklerin farklı yerlerindeki gerilmeler program çıktısı olarak görülebilmektedir. ANSYS yazılımı kullanılarak oluşturulan yük-deformasyon (sertlik) eğrileri, laboratuvarında test edilen gerçek ÇLK örneklerin yük-deformasyon eğrileriyle karşılaştırılmıştır.



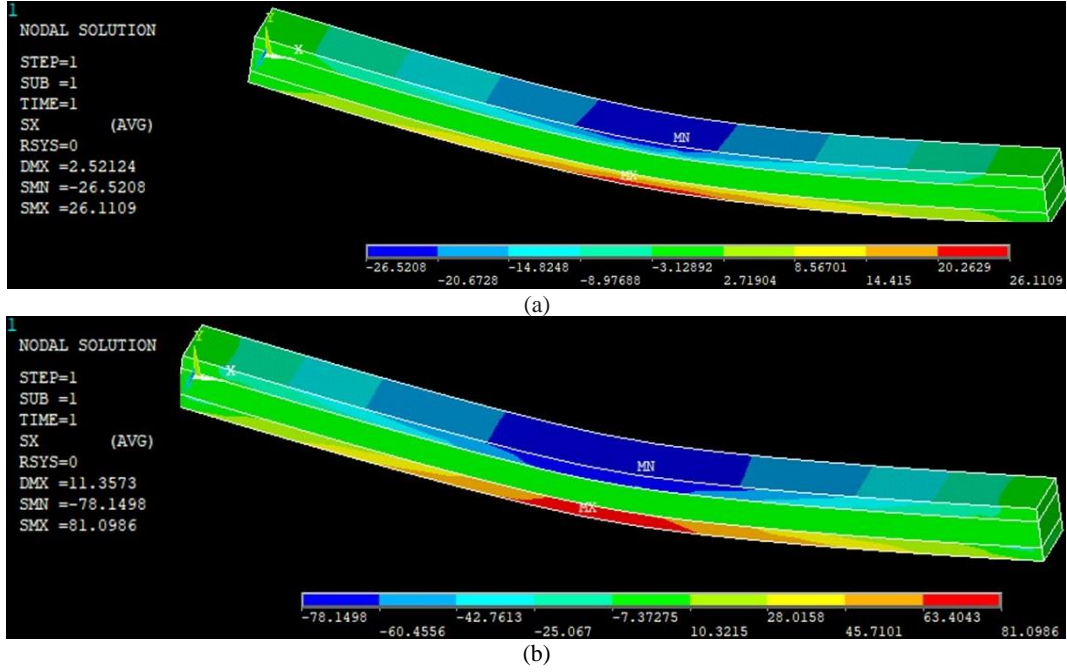
Şekil 2. Modellemede ağ ve sınır koşullarının uygulanması.
Figure 2. Application of mesh and boundary conditions in model.

3. Bulgular

Şekil 3’te ve Şekil 4’te sırası ile Uludağ göknarı ve karaçam odunundan elde edilen ÇLK’lerin 400 N (Newton) ve maksimum yüklenme seviyesindeki yük altında ANSYS modelinde oluşan eğilme gerilmeleri gösterilmiştir. 400 N yük altında Uludağ göknarı’ndan elde edilen ÇLK’lerde eğilme gerilmesi 25,47 MPa iken karaçam odunundan elde edilen ÇLK’lerde ise 26,52 MPa’dır. Maksimum yük uygulamalarında, Uludağ göknarı için 800 N yük altında 52,59 MPa iken karaçam odunu için 1600 N yük altında 81,09 MPa olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Uludağ göknarı odunundan elde edilen ÇLK’lerde eğilme gerilmeleri: a) 400 N yük altında, b) 800 N yük altında.
Figure 3. Bending stresses on CLTs made of Uludağ fir wood: a) Under 400 N load level, b) Under 800 N load level.



Şekil 4. Karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerde eğilme gerilmeleri: a) 400 N yük altında, b) 1600 N yük altında.
Figure 4. Bending stresses on CLTs made of black pine wood: a) Under 400 N load level, b) Under 1600 N load level.

Uludağ göknarı ve karaçam odunlarından elde edilen ÇLK'lerin modellemelerinde Tablo 3'te belirtilen yüklemeler yapıldığında $-y$ yönünde meydana gelen deformasyon ve bu deformasyondaki eğilme gerilmeleri görülmektedir. Uludağ göknarı odunundan elde edilen ÇLK'ler 700 N; karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lere ise 1400 N yük uygulanmasından

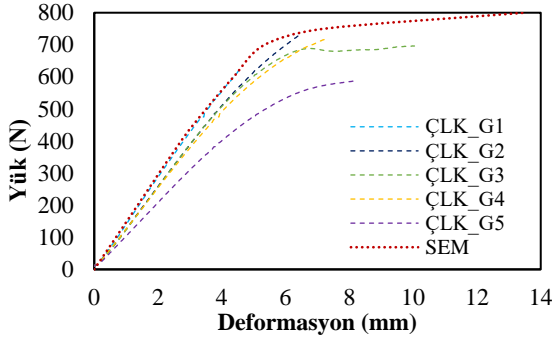
sonra lineer bölgeden uzaklaşmaktadır. Bu lineer bölgeden uzaklaşmasının sebebi uygulanan yükün malzemenin elastik deformasyon bölge sınırını geçtiği plastik deformasyon sınırına geçiş yaptığı, malzemenin şeklinin bozulmaya başladığı görülmektedir.

Tablo 3. $-y$ yönündeki yük-deformasyon-gerilme değerleri
Table 3. Load-deformation-stress values in $-y$ direction in modeling

ÇLK-Uludağ göknarı			ÇLK-Karaçam		
Yük (N)	Deformasyon (mm)	Gerilme (MPa)	Yük (N)	Deformasyon (mm)	Gerilme (MPa)
0	0,00	0	0	0,00	0
200	1,36	13,26	400	1,93	26,52
400	2,72	25,47	600	3,00	38,21
500	3,51	33,15	800	3,86	50,94
600	4,37	39,78	1000	4,85	64,65
700	5,34	46,38	1200	5,97	61,60
750	7,20	50,36	1400	7,28	68,08
800	13,50	52,59	1600	10,85	81,01

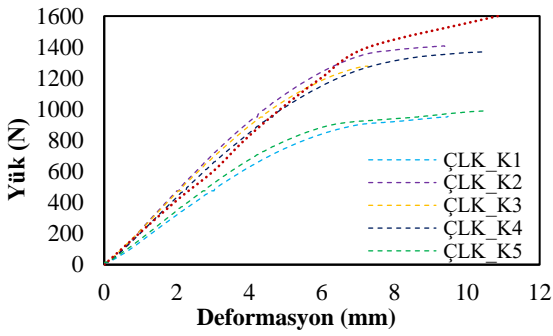
Uludağ Göknarı odunundan elde edilen ÇLK'lerin hem numerik hem de deneysel analizler sonucunda elde edilen yük-deformasyon grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Numerik analizde elde edilen yük-deformasyon grafiği ile elde edilen deneysel sonuçlardaki yük-deformasyon grafiği birbirine yakınlık göstermektedir.

Karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerin hem numerik hem de deneysel analizler sonucunda elde edilen yük-deformasyon grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Bu ÇLK'lerin numerik analizde elde edilen yük-deformasyon grafiği ile deneysel sonuçlarda elde edilen yük-deformasyon grafiği birbirine yakınlık göstermektedir.



Şekil 5. Uludağ göknarı odunundan elde edilen ÇLK'lerin deneysel ve numerik analizler sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrileri.

Figure 5. Load-deformation curves obtained from empirical and numerical analyses of CLTs made of Uludağ fir.



Şekil 6. Karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerin deneysel ve numerik analizler sonucunda elde edilen yük-deformasyon eğrileri.

Figure 6. Load-deformation curves obtained from empirical and numerical analyses of CLTs made of black pine.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, Uludağ göknarı ve karaçam odunundan elde edilen ÇLK'lerin deneysel ve nümerik analiz ile eğilme özellikleri ve statik yük altındaki davranışları incelenmiş olup SEM sonuçlarının deneysel sonuçlara yakınlık gösterdiği ve elde edilen verilerin uygulama yapılmadan önce malzemenin mekanik özelliklerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu durumda üretilecek olan malzemenin öncelikle SEM kullanılarak tasarlanması ve sınır koşullarının malzemenin mekanik değerlerini sisteme tanımlayarak üretilecek olan mühendislik ürünü ahşap malzemelerin AR-GE çalışmalarında, mühendislik uygulamalarında kullanılmadan önce teorik ve numerik analizlerin yapılarak yapısal tasarımların değerlendirilmesinin önemi ortaya konacaktır. Çalışmanın sonuçları, Eurocode 5'e göre yapısal kereste sınıfına alınan ve Türkiye'nin yerli ağaç türlerinden olan karaçam ve göknar odunundan elde edilen ÇLK'lerin ortotropik özellikleri kullanılarak bilgisayar ortamında simülasyonu ile yerli odun türlerimizin yapı sektöründe kullanılması açısından önem arz etmektedir.

Yazar katkıları

Fikir: H.K., E.G., M.U.; Yönetim: E.G., M.U.; Veri toplama: H.K., E.G., Analizler: H.K., E.G., M.U.; Literatür taraması: H.K., Kaleme alma: H.K., Son Kontrol: H.K., E.G., M.U.

Kaynaklar

Diaz, A.R., Flores, E.I.S., Yanez, S.J., Vasco, D.A., Pina, J.C., 2019. Multiscale modeling of the thermal conductivity of wood and its application to cross-laminated timber. *International Journal of Thermal Sciences*, 144: 79-92. Doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.05.016

Eppstein, D., 2001. Global Optimization of Mesh Quality. Univ. of California. Dept. of Information and Computer Science. arnold-neumaier.at/glopt/mss/Epp01.pdf (Erişim tarihi: 17 Nisan 2024)

Güntekin, E., 2004. Kavelalı mobilya köşe birleştirmelerinin sonlu elemanlar analizi. *Türkiye Ormanlık Dergisi* 5(1): 159-172. Doi.org/10.18182/tjf.22108

Haftkhani, A.R., Hematabadi, H., 2022. Effect of layer arrangement on bending strength of cross-laminated timber (CLT) manufactured from poplar (*Populus deltoides* L.). *Buildings*, 12(5): 608. Doi.org/10.3390/buildings12050608

Kozaric, L., Purcar, M.V., Tekic, Z., Besevic, M., Zivkovic, S., 2020. Dynamic characteristics of CLT panels: Computer modelling and simulations. *Proceeding of IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 789(1): 012031, Doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012031

Okuni, I.M., Bradford, T., 2021. Modelling of elevated temperature performance of adhesives used in cross laminated timber: An application of ANSYS Mechanical 2020 R1 Structural Analysis Software. *Environ. Sci. Proc.*, 3(1): 46. Doi.org/10.3390/IECF2020-07902

Şirin, G., Aydemir, D., 2016. Sonlu Elemanlar Metodunun ahşap malzemelerde kullanımına ilişkin bir araştırma. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2): 205-212. Doi.org/10.27011/barofd.272971

Tavşan, C., Şahiner Tufan, A., Tavşan, F., 2022. Ekolojik malzeme olan ahşapla yapılan çok katlı yapılar. *Mimarlık ve Yaşam*, 7(1): 291-309. Doi.org/10.26835/my.1018854

Topçu, M., Taşgetiren, S., 1998. Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayını. ISBN: 9756992034

URL-1: PUU-Info. Ürün Satın Alma Kılavuzu. puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/08/ahsap_urun_satin_alma_kilavuzu_2018.pdf (Erişim tarihi: 17 Nisan 2024)

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

Vilguts, A., Serdjuks, D., Pakrastins, L., 2015. Design methods of elements from cross-laminated timber subjected to flexure. *Procedia Engineering*, 117: 10-19. Doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.117

Yılmaz Aydın, T., Özveren, A., 2019. Effects of moisture content on elastic constants of fir wood. *European J. Wood and Wood Prod.* 77: 63-70. Doi.org/10.1007/s00107-018-1363-3