







Çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmeleri için tasarlanan auksetik kavelaların sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak ile tutma mukavemeti

Erkan Ceylan¹ , Ali Kasal^{2*} , Jerzy Smardzewski³ , Mehmet Yüksel⁴ 

Tolga Kuşkun² 

ÖZ: Bu çalışmada, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmelerinde kullanılmak üzere auksetik kavelalar tasarlanmış, üç boyutlu (3B) yazıcı teknolojisiyle üretilmiş ve bu kavelaların Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve 20 mm kalınlığındaki kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak (KKP) ile tutma mukavemetleri araştırılmıştır. Bu amaçla, auksetik özellikli enine kesit geometrisine sahip 4 farklı kavela tasarımı gerçekleştirilmiş ve 3B yazıcıyla Polilaktik Asit (PLA), Akrilonitril Butadiyen Stiren (ABS) ve Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA) filamentlerinden üretilmiştir. Tasarlanan kavelalarda, birleştirme sırasında tutkal kullanımını elimine etmek amacıyla dış yüzeyler dişli olarak dübel şeklinde tasarlanmıştır. Çalışma kapsamında, 2 ağaç malzeme, 2 dış yüzey diş geometrisi, 2 auksetik desen tipi, 3 farklı filament ve her bir gruptan 5 yineleme olmak üzere toplam 120 adet liflere paralel (kenardan) çekme, 120 adette liflere dik (yüzeyden) çekme deney örneği hazırlanmış ve statik yük altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda, ahşap malzemelerden KKP, filamentlerden de PLA en iyi tutma mukavemetini verirken; auksetik kavelalardan ise üçgen biçimli auksetik desene sahip ve ikizkenar üçgen dişli kavelalar ile en yüksek tutma mukavemeti elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Auksetik, kavela, mobilya birleştirmesi, tutma mukavemeti.

Holding strength of auxetic dowels designed for frame furniture joints in scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) and poplar (*Populus nigra* L.) plywood

ABSTRACT: In this study, auxetic dowels were designed to be used in frame construction furniture joints, produced with three-dimensional (3D) printer technology and the holding strength of these dowels with Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and 20 mm thick poplar (*Populus nigra* L.) plywood (KKP) was investigated. For this purpose, 4 different dowel designs with auxetic cross-sectional geometry were developed and then, designed auxetic dowels were produced with a 3D printer with Poly-lactic Acid (PLA), Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), and Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) filaments (dowel material). In the designed auxetic dowels, the outer surfaces are designed as threaded in order to eliminate the use of glue during assembly. Within the scope of the study, a total of 120 parallel to grain (from edge) and 120 perpendicular to grain (from surface) withdrawal test specimens, including 2 wood materials, 2 outer surface thread geometries, 2 auxetic pattern types, 3 different dowel materials (filaments) and 5 replications from each group, were prepared and tested under static load. As a result of the experiments, KKP among the wooden materials and PLA among the filaments gave the best results; while the highest holding strength values have been obtained with the dowels with a triangular auxetic pattern and isosceles triangular thread among the auxetic dowels.

Keywords: Auxetic, dowel, furniture joint, holding strength.

Makale tarihçesi: Geliş:02.08.2024, Kabul:01.10.2024, Yayınlanma:30.12.2024, *e-posta: alikasal@mu.edu.tr.

¹Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Bingöl/Türkiye

²Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaççisleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Muğla/Türkiye

³Poznan Yaşam Bilimleri Üniversitesi, Ormançılık ve Ahşap Tek. Fak., Mobilya Tasarımı Bölümü, Poznan/Polonya

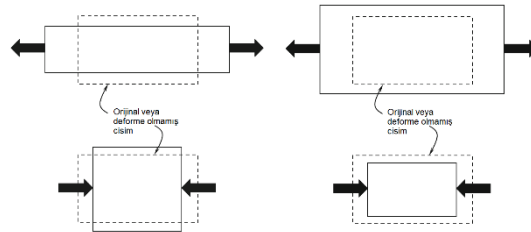
⁴Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla Meslek Yüksekokulu, Tasarım Bölümü, Muğla/Türkiye

Atıf: Ceylan E., Kasal A., Smardzewski J., Kuşkun T., ve Yüksel M., (2024), Çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmeleri için tasarlanan auksetik kavelaların sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak ile tutma mukavemeti, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 7 (2), 188-203, DOI: [10.33725/mamad.1527043](https://doi.org/10.33725/mamad.1527043)

1. Giriş

Mobilya, mühendislik tasarımı açısından, genellikle çerçeve konstrüksiyonlu mobilyalar, kutu konstrüksiyonlu mobilyalar ve kombine konstrüksiyonlu mobilyalar olmak üzere üç yapı grubunda incelenmektedir. Üretiminde tablaların kullanıldığı mobilyalar kutu (panel), masif çerçevelerin yer aldığı mobilyalar çerçeve (iskelet), her iki eleman tipinin de kullanıldığı mobilyalar ise kombine (karma) konstrüksiyonlu mobilyalar olarak tanımlanmaktadır. Mobilya sistemlerinin mekanik davranış özellikleri, genellikle elemanların üretildiği malzemeler ile bu elemanları birbirine bağlamada uygulanan birleştirme tekniklerine bağlı bulunmaktadır (Örs ve Efe, 1998; Eckelman, 2003). Gerek çerçeve gerekse kutu konstrüksiyonlu mobilyalarda kritik noktaların birleştirmeler olduğu ve mukavemet sorunlarının genellikle birleştirme noktalarında meydana geldiği bilinmektedir. Mobilya sistemi, kullanım biçimine göre, çeşitli özelliklerde ve yönlerde yüklere maruz kalmakta, genellikle sistemi oluşturan elemanların üretiminde kullanılan malzemeler bu yükleri karşılayıp birleştirmelere aktarmakta, birleştirme noktaları ise aşırı yüklenme durumlarında üzerlerine aldıkları bu yükleri karşılayamayıp başarısız olmaktadır. Sonuç olarak, mobilya sistemlerindeki birleştirmeleri sağlayan bağlantı elemanlarının, sistemin üretildiği malzemelerle olan tutma mukavemeti sistemin bütününe mukavemeti üzerinde son derece etkilidir. Bu bağlamda, mobilya sistemini oluşturan birleştirmelerin mukavemet özelliklerinin önceden tahmin edilmesi ve test/analiz edilmesi mühendislik/mukavemet tasarımı açısından çok önemlidir.

Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğu pozitif Poisson oranına sahipken, sınırlı sayıdaki malzeme negatif Poisson oranına sahiptir. Poisson oranı, birçok mühendislik alanında kullanılan malzemelerin yapısal davranışlarını belirlemeye yarayan en önemli özelliklerden birisidir. Poisson oranı, bir malzemede normal gerilmelerin etkisinde, etkime düzlemi içerisinde oluşan birim deformasyonun, eksenel doğrultudaki birim deformasyona oranı olarak açıklanabilir. Bu oran endüstride kullanılan birçok malzemede pozitif değerde olup, 0 ile 0,5 arasında değerler almaktadır. Ancak, sınırlı sayıda da olsa bazı malzemelerde Poisson oranı negatif değerde olmakta ve bu malzemeler auksetik malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Auksetik malzemelere ilişkin ilk deneysel çalışmalar Lakes (1987) tarafından negatif Poisson oranına sahip foam (köpük) yapılar üzerinde yapılmış ve negatif Poisson oranına sahip malzemeler için "auksetik" terimi ilk olarak 1991 yılında Ken Evans tarafından kullanılmıştır (Evans ve ark., 1991). Auksetik malzemeler, pozitif Poisson oranına sahip diğer malzemelerin tersine olağanüstü bir özellik olarak çekme gerilmesi altında genişleyip basınç gerilmeleri altında daralırlar. Pozitif Poisson oranına sahip malzemeler boy yönünde çekildikçe, boyuna yönde uzayıp enine yönde incelmekteyken, negatif Poisson oranına sahip olan auksetik malzemeler ise aynı yüklenme koşullarında boyuna yönde uzarken, ilginç bir şekilde enine yönde de kalınlaşmaktadır (Şekil 1). Auksetik malzemeleri özel kılan temel özellik budur ve akıllı malzeme üretiminde yeni ufuklar açma potansiyeline sahiptir.



Şekil 1. Geleneksel ve auksetik malzemelerin aksel çekme yükü altındaki şekil değişimleri (Lim, 2015)

Auksetik malzemelere olan ilgi son yıllarda gittikçe artmakta, özellikle de malzemelerin birçok temel özelliği üzerinde etkisi olan Poisson oranının, geleneksel malzemelerin aksine auksetik malzemelerde negatif değerde olmasının bu malzemelere sağladığı birçok üstün özellik, bu malzemelerin mühendislik uygulamalarında kullanılmasına yönelik araştırmaları teşvik etmektedir. Auksetik malzemelerin mobilya sektöründe uygulanmasına yönelik olarak çalışmalar çok sınırlıdır. Özellikle de, sandalye, koltuk iskeleti gibi çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmelerinde auksetik bağlantı elemanlarının denendiği, auksetik özelliğin bağlantı elemanlarının enine kesitinde tasarlanan desenlerle sağlandığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Literatürde incelenen çalışmalarda özetle, ev içi ve ofis kullanımları için kullanılan oturma mobilyalarının döşemelerinde konforu ve dayanıklılığı arttırmak amacıyla negatif Poisson oranına sahip farklı auksetik helezonik yay tasarımları yapılmış, nümerik olarak modellenmiş ve laboratuvar koşullarında uzun süreli yorma ve statik yükleri altında test edilmişlerdir. Sonuç olarak, auksetik özellikteki helezonik yay tasarımlarının geleneksel döşeme malzemelerine alternatif olarak, oturma mobilyalarının döşeme sistemlerinde kullanılabileceğini ve bu sayede daha konforlu ve dayanıklı döşeme sistemleri elde edileceği bildirilmiştir (Smardzewski ve ark., 2013; Smardzewski, 2013a; Smardzewski ve Prekrat, 2011). Smardzewski (2013b) bir diğer çalışmada, kutu mobilyalar için, auksetik özellikte hüresel yapıda hafif ahşap panel malzemeler geliştirmiş ve bazı mekanik özelliklerini belirlemiştir. Ayrıca, modelleme ve deneye dayalı olarak yapılan diğer bir çalışmada da, auksetik özellikli hafif petek dokulu ahşap sandviç kompozit (ahşap tozu ve poliaktik asit karışımı) levhalar geliştirilmiş ve bu malzemelerin elastik özellikleri belirlenmiştir (Smardzewski ve ark., 2018). Yapısal bağlantı elemanlarında auksetik malzeme kullanımına ilişkin, gövde yüzeylerine desen uyarlanarak auksetik çivi tasarlanıp üretilen bir çalışmaya ulaşılmıştır (Ren ve ark., 2018). Panel tipi mobilyalar için gövde yüzeyleri auksetik desenlerle tasarlanmış bağlantı elemanlarının montaj kuvvetlerinin, doğrusal çekme mukavemetlerinin ve panel mobilya köşe birleştirmelerdeki performanslarının araştırıldığı çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmaların sonucunda, bazı geliştirmeler yapılması halinde auksetik bağlantı elemanlarının geleneksel bağlantı elemanlarına alternatif olarak panel mobilya birleştirmelerinde kullanılabileceği ve 3B yazıcı teknolojisinin bağlantı elemanlarının mukavemetinde son derece etkili olduğu bildirilmiştir (Kasal ve ark., 2020; Kuşkun ve ark., 2021, Kasal ve ark., 2023).

Bu çalışmada, mobilya mühendislik tasarımı sürecindeki mukavemet tasarımı adımlarından, birleştirme ve bağlantı elemanı tasarımı adımı gerçekleştirilmiştir. Özellikle çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmeleri için; kolay çakılıp zor sökülebileceği öngörülen, auksetik özellikte, inovatif, dışarıdan görünmeyen, kolay montaj sağlayan alternatif kavala tasarımları yapılmış ve bunların çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde kullanılan ahşap malzemeler ile tutma mukavemetleri araştırılmıştır. Çalışmanın temel amacı, çerçeve konstrüksiyonlu koltuk iskeleti birleştirmelerinde kullanılmak üzere, auksetik kavelalar geliştirilmesi ve bu kavelaların performanslarının değerlendirilmesidir. Bu temel amaca ulaşmak için belirlenen hedefler:

- Farklı enine kesit geometrisinde auksetik kavelaların tasarlanması ve 3B modellenmesi,
- Auksetik kavelaların mekanik ve elastik özelliklerinin nümerik analizlerle ve deneylerle belirlenmesi,
- Auksetik kavelaların üç boyutlu yazıcı teknolojisiyle üretilmesi,
- Auksetik kavelaların Sariçam ve KKP ile tutma mukavemetlerinin deneyler ile belirlenmesidir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

2.1.1. Ahşap malzeme ve filamentler

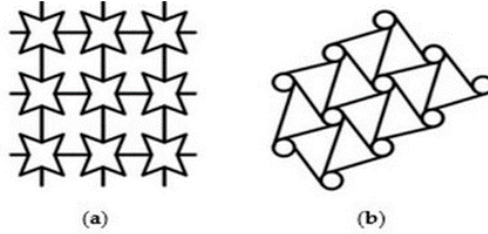
Kavela tutma deneyi örneklerinin hazırlanmasında masif ağaç malzeme olarak, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde yaygın olarak kullanılan Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve ahşap esaslı levha olarak 20 mm kalınlığında 11 katmanlı kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak tercih edilmiştir. Ahşap malzemeler piyasadan tesadüfi olarak temin edilmiştir. Malzemelerin seçiminde, masif ağaç malzemenin ve kontrplak levhanın kusursuz olmasına dikkat edilmiştir. Sarıçam ve kavak kontrplak malzemelerin rutubet (TS ISO 13061-1), yoğunluk (TS ISO 13061-2), eğilme direnci (TS ISO 13061-3) ve elastikiyet modülü (TS ISO 13061-4) değerleri de ilgili standartlara uygun olarak testlerle belirlenmiştir.

Auksetik kavela üretimleri için, ön araştırma yapılmış ve üretim için uygun olabilecek 3 farklı Filament (kavela malzemesi) polilaktik asit (PLA), akrilonitril butadiyen stiren (ABS) ve akrilonitril stiren akrilat (ASA) olarak belirlenmiştir. Yapılan ön araştırmada, kullanılması planlanan filamentlerin biyo-bazlı/biyo-bozunur olması, çevresel etkileri, insan sağlığına etkileri, mukavemeti, maliyeti ve hem 3B yazıcı hem de enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilebilmesi gibi hususlar göz önünde bulundurulmuştur. PLA, ABS ve ASA filamentlerinin yoğunlukları ve ASTM D3039/D3039M-17 standardında belirtilen prensiplere göre çekme dirençleri ile çekmede elastikiyet modülü değerleri belirlenmiştir.

2.2. Metot

2.2.1. Auksetik kavela tasarımlarının gerçekleştirilmesi

Çalışma kapsamında, kavela enine kesit tasarımlarına uyarlanmak üzere, öncelikle auksetik desenler belirlenmiş, daha sonra da, geliştirilen auksetik desenler kavela enine kesitlerine uygun tasarımlara dönüştürülmüştür (Şekil 2).



Şekil 2. Kavela enine kesitlerinde kullanılan auksetik desenler (Lim, 2015)

Çalışmanın bu aşamasında, Şekil 2a ve b'deki auksetik desenlerden uyarlanarak kavela enine kesit tasarımları yapılmış ve 3B olarak modellenmiştir. Modellemelerde Autocad Inventor programından yararlanılmıştır. Auksetik kavela tasarımlarında, desen yapısının kavela üretimine en uygun teknolojik parametrelere sahip olmasına dikkat edilmiştir.

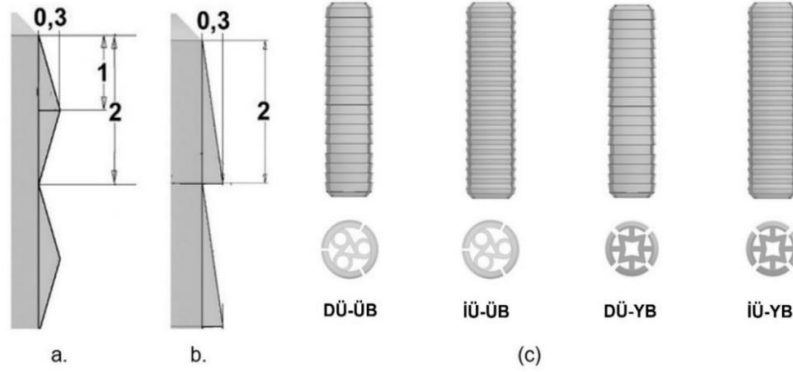
Çalışma kapsamında, 2 farklı enine kesit yapısına sahip, 40 mm boyunda ve 10 mm çapında kavelalar tasarlanmıştır. Kavela ölçülerinin belirlenmesinde, kavela yapısına auksetik özelliğin kazandırılabilmesi için gerekli minimum ölçüler dikkate alınmıştır. Tasarlanan kavelaların dış yüzeyleri dişli olarak dübel şeklinde düşünülmüş ve bu sayede tutkalsız bir birleştirme yapma imkânı sağlanmıştır. Dış yüzeylerdeki dişler için dik üçgen ve ikizkenar üçgen şeklinde 2 farklı diş tipi tasarımı yapılmıştır. Dik üçgen ve ikizkenar üçgen tipindeki diş geometrilerinde, diş derinliği ve diş adımı ölçüleri için bir ön çalışma yapılarak optimum diş adımının 2 mm, diş derinliğinin ise 0,3 mm olduğu belirlenmiş ve tasarlanan kavelaların

dış yüzeylerindeki dişler bu ölçülere uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3a, b). Kavelalar, auksetik davranışın elde edilebilmesi adına desen yüzeyine dik olan boyuna yönde tamamen boşluklu olacak şekilde tasarlanmıştır. Oluşturulan deneme deseninde, 2 farklı auksetik desen tipi (üçgen biçimli, yıldız biçimli) ve 2 farklı diş tipi (dik üçgen konik dişli, ikizkenar üçgen konik dişli) çalışmanın bağımsız değişkenleri olarak ele alınmıştır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Auksetik kavela tasarımları için oluşturulan deneme deseni

No	Kavela Kodu	Kavela Diş Tipi	Auksetik Desen Tipi
1	DÜ-ÜB	Dik üçgen konik dişli (DÜ)	Üçgen biçimli (ÜB)
2	DÜ-YB	Dik üçgen konik dişli (DÜ)	Yıldız biçimli (YB)
3	İÜ-ÜB	İkizkenar üçgen konik dişli (İÜ)	Üçgen biçimli (ÜB)
4	İÜ-YB	İkizkenar üçgen konik dişli (İÜ)	Yıldız biçimli (YB)

Sonuç olarak, 4 farklı auksetik kavela tasarımı yapılmıştır. Oluşturulan bu deneme desenine göre modellenen kavelalar Şekil 3c' de gösterilmiştir.



Şekil 3. Kavela dış yüzeylerindeki ikizkenar (a) ve dik (b) üçgen şeklindeki diş tiplerinin geometrik yapıları ve tasarlanan kavela örnekleri (c)

Tasarlanan auksetik kavelaların kesitinde, en yüksek mukavemet ve negatif Poisson oranını veren optimum boyutları optimizasyon ile belirlenmiştir (Kuşkun ve ark., 2023). Auksetik kavelalar üretilmeden önce, her auksetik desene sahip kavelanın sonlu elemanlar yöntemiyle çalışan bir yapısal analiz programı olan “Abaqus” programında nümerik analizleri gerçekleştirilerek Poisson oranlarının negatif olduğu, bir başka ifade ile auksetik davranış gösterdikleri doğrulanmıştır.

Geliştirilen auksetik kavela tasarımlarının, elastik (auksetik) özelliklerinin belirlenmesi için sadece nümerik analizler değil, aynı zamanda analitik hesaplamalar ve tek eksenli basınç deneylerinden de yararlanılmıştır. Sonuç olarak, sırasıyla üçgen ve yıldız biçimli auksetik desenli kavelalar için, hem deneylerde (-0,261, -0,282), hem nümerik analizlerde (-0,285, -0,313), hem de analitik hesaplamalarda (-0,302, -0,341) negatif Poisson oranı değerleri elde edilmiştir (Kuşkun ve ark., 2023).

2.2.2. Auksetik kavelaların 3b yazıcıyla üretimi

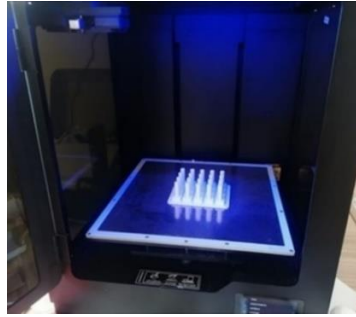
Auksetik kavelalar üç boyutlu yazıcıyla üretilecek olmasına karşın, kavelaların tasarımında aynı zamanda seri üretime uygun olan enjeksiyon kalıplama yöntemiyle de üretilebilecek özelliklere sahip olmasına dikkat edilmiştir. Üretim için, öncelikle Autocad Inventor programında üç boyutlu olarak modellenen auksetik kavela örnekleri, üç boyutlu yazıcılarda yaygın olarak kullanılan STL (stereolithography) formatına dönüştürülmüştür. Bu aşamadan sonra, oluşturulan üç boyutlu modellere ilişkin dosyalar üç boyutlu yazıcı ile üretilebilir hale

getirilmiştir. Üretimler, kapalı sistemde çalışan bir 3B yazıcı ile gerçekleştirilmiştir. Auksetik kavelaların üretiminde, her bir parametre için firma önerilerinde verilen aralıklar dikkate alınmış, ancak bu aralıklardaki en başarılı sonuçların hangi noktalarda alınacağını belirlemek için ön denemeler gerçekleştirilmiştir. Buna göre, PLA, ABS ve ASA filamentleri ile kavela üretimi için optimum değerler belirlenmiştir (Çizelge 2).

Çizelge 2. Auksetik kavelaların 3B yazıcıyla üretiminde kullanılan optimum döküm değerleri

Filament	Nozzle Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Doluluk Oranı (%)	Katman Kalınlığı (mm)
PLA	220	70	90	0,1
ABS	240	90	90	0,1
ASA	260	90	90	0,1

Kavelalar, katmanlar kavelanın boyuna eksenine dik yönde olacak şekilde dökülebilmştir. Bir başka ifadeyle, üretim sonucunda kavelalar tabla yüzeyine dik pozisyonda durmaktadır (Şekil 4).



Şekil 4. Auksetik kavelaların 3B yazıcı ile üretimi

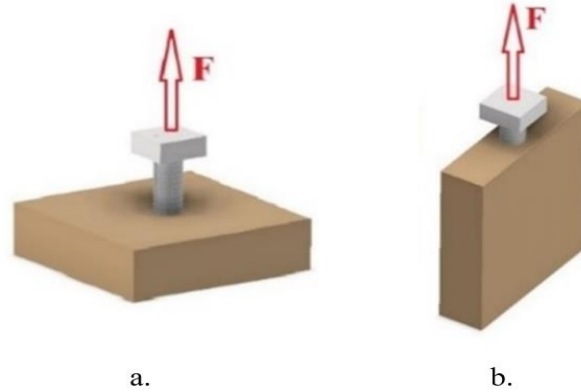
2.2.3. Auksetik kavelalı deney örneklerinin hazırlanması

Auksetik kavela tutma deneyi örnekleri, 75 x 75 mm ölçülerinde ve levha kalınlığında (20 mm) hazırlanmıştır. Deney örnekleri için kullanılacak kavelalar, deney cihazında çekme kuvvetlerinin kolayca uygulanabilmesi için özel olarak dikdörtgenler prizması başlıklı üretilmiştir (Şekil 5). Çalışma kapsamında, 2 ahşap malzeme, 4 auksetik kavela tipi, 3 kavela malzemesi ve her bir örnekten 5 yinleme olmak üzere toplam 120 adet liflere paralel (kenardan), 120 adette liflere dik (yüzeyden) deney örneği hazırlanmış (toplamda 240 deney örneği) ve test edilmiştir. Ayrıca, her bir kavela malzemesi ve dış yüzey dış tipi için olmak üzere yine 5 yinleme olacak şekilde ($2 \times 2 \times 3 \times 5 = 30$) 60 adet liflere paralel (kenardan) 60 adet liflere dik (yüzeyden) olmak üzere 120 adet de auksetik olmayan (kontrol) kavelası hazırlanmış ve test edilmiştir. Deney örnekleri, deneylerden önce 20 °C \pm 2 sıcaklık ve % 65 \pm 3 bağıl nem koşullarındaki iklimlendirme dolabında denge rutubetine (yaklaşık %12) ulaşmaya kadar bekletilmiştir.

2.2.4. Auksetik kavelaların masif ahşap ve ahşap esaslı levha ile tutma mukavemeti

Auksetik ve kontrol kavelalarının üretilmesinden sonra, bu kavelaların, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde kullanılacak olan Sarıçam (*Pinus sylvestris* L.) ve 20 mm kalınlığındaki kavak (*Populus nigra* L.) kontrplak ile liflere paralel (levha kenarından) ve liflere dik (levha yüzeyinden) yönde tutma mukavemetleri belirlenmiştir.

Auksetik ve kontrol kavelaların masif ahşap ve ahşap esaslı levha ile hem liflere dik (yüzeyden) hem de liflere paralel (kenardan) tutma mukavemetine ilişkin deney örnekleri ve yük uygulama biçimleri Şekil 5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5. Liflere dik/yüzeyden (a) ve liflere paralel/kenardan (b) kavela tutma mukavemeti deney örnekleri

Kavela tutma mukavemeti için, öncelikle kavelalar liflere dik (yüzeyden) 15 mm, liflere paralel (kenardan) ise 25 mm olacak şekilde monte edilmiştir (Ceylan ve ark., 2024). Bu çalışmada, kavela tutma mukavemeti, monte edilmiş kavelanın geri çıkma anındaki maksimum çekme kuvveti (N) olarak belirlenmiştir. Deneyler, 5 ton kapasiteli üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Deney cihazının yükleme hızı 6 mm/dak olarak ayarlanmıştır.

2.2.5. İstatistiksel analizler

Verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesinde, Sarıçam ve KKP malzemelerde; kavela dış tipi, auksetik desen tipi ve filament ana faktörlerinin (bağımsız değişkenler) ve bu faktörlerin çoklu etkileşimlerinin kavela tutma mukavemeti değerleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için çoklu varyans analizleri (MANOVA) gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, KKP örnekler Sarıçam örneklere göre belirgin şekilde yüksek mukavemet değerleri verdiği için istatistiksel analizlerde ahşap malzeme bir faktör (bağımsız değişken) olarak hesaba alınmamış, varyans analizleri Sarıçam ve KKP grupları için ayrı ayrı yapılmıştır. Buna göre, çoklu varyans analizleri üç faktörlü olarak gerçekleştirilmiştir.

MANOVA sonuçlarına göre, 0,05 hata payı ile anlamlı bulunan ana faktör ve etkileşimlerin başarı sıralamaları için ise en küçük önemli fark (LSD: Least significant difference) testlerinden yararlanılmıştır. İstatistiksel analizler için “Minitab” programı kullanılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

3.1. Ahşap malzeme ve filamentlerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri

Deney örneklerinin hazırlanmasında kullanılan Sarıçam ve KKP malzemeler ile kavela üretiminde kullanılan filamentlerin çalışma kapsamındaki deneylerle belirlenen bazı fiziksel ve mekanik özelliklerine ilişkin sonuçlar Çizelge 3’ de verilmiştir.

3.2. Kavela tutma mukavemeti

Kavela tutma deneylerinde, PLA kavelaların tamamında gözlenen deformasyon biçimi, beklendiği gibi kavelaların delikten geri çıkması şeklinde gerçekleşmiştir. Aynı deformasyon biçimi, ABS ve ASA kavelaların büyük çoğunluğunda gözlenmesine karşın, birkaç ABS ve ASA kavela çekme kuvveti altında koparak deformasyona uğramıştır (Şekil 6).

Çizelge 3. Deney malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri (Ceylan ve ark., 2024)

Ahşap Malzeme	Test Rutubeti (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Eğilme Direnci (N/mm ²)	E. Elastikiyet Modülü (N/mm ²)
Sarıçam	10.8	0.45	89	11200
KKP	9.3	0.38	35	4800
Filament	-		Çekme Direnci (N/mm ²)	Çekmede Elastikiyet Modülü (N/mm ²)
PLA	-	1.24	50	937
ABS	-	1.04	36	747
ASA	-	1.05	39	797

**Şekil 6.** Kavala tutma deneylerinde gözlemlenen deformasyon karakteristikleri

Filament, kavala diş tipi ve auksetik desen tipinin, Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere paralel/kenardan kavala tutma mukavemeti değerleri üzerindeki etkilerine ilişkin olarak yapılan çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere paralel/kenardan kavala tutma mukavemeti değerlerine ilişkin varyans analizi

Deney	Varyans Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Hata İhtimali ($p < 0.05$)
Liflere Paralel Kavala Tutma Mukavemeti (N)	Sarıçam					
	FM	2	235930	117965	48.25	0.000
	KDT	1	3145	3145	1.29	0.262
	ADT	1	279996	279996	114.52	0.000
	FM x KDT	2	24246	12123	4.96	0.011
	FM x ADT	2	37316	18658	7.63	0.001
	KDT x ADT	1	43596	43596	17.83	0.000
	FM x KDT x ADT	2	85674	42837	17.52	0.000
	Hata	48	117361	2445	-	0.000
	Toplam	59	827264	-	-	0.000
Kenardan Kavala Tutma Mukavemeti (N)	Kavak Kontrplak					
	FM	2	2554814	1277407	200.38	0.000
	KDT	1	1089	1089	0.17	0.681
	ADT	1	511765	511765	80.28	0.000
	FM x KDT	2	274427	137213	21.52	0.000
	FM x ADT	2	63016	31508	4.94	0.011
	KDT x ADT	1	990	990	0.16	0.695
	FM x KDT x ADT	2	212627	106313	16.68	0.000
	Hata	48	306002	6375	-	0.000
	Toplam	59	3924730	-	-	0.000

Çizelge 4'e göre, denemeye alınan ana faktörlerden filament ve auksetik desen tipinin, auksetik kavelaların hem Sarıçam hem de KKP ile liflere paralel/kenardan tutma mukavemeti üzerindeki etkisi 0,05 hata payı ile anlamlı bulunurken, kavela dış tipinin etkisi istatistiksel olarak anlamsız bulunmuştur. Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere paralel/kenardan kavela tutma mukavemeti için yapılan ikili etkileşimlerde, KKP malzeme için kavela dış tipi–auksetik desen tipi etkileşimi dışındaki tüm ikili etkileşimler de 0,05 yanılma olasılığı için anlamlıdır. Her iki malzemede de, filament–kavela dış tipi–auksetik desen tipi üçlü etkileşiminin liflere paralel/kenardan kavela tutma mukavemeti üzerindeki etkisi 0,05 hata olasılığı için önemlidir. F-değerleri incelendiğinde, auksetik kavelaların Sarıçam ile liflere paralel yöndeki tutma mukavemetinde en etkili faktör auksetik desen tipi olurken, KKP ile kenardan tutma mukavemetindeki en etkili faktörün filament tipi olduğu belirlenmiştir.

Filament, kavela dış tipi ve auksetik desen tipinin, Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerleri üzerindeki etkilerine ilişkin olarak yapılan çoklu varyans analizi sonuçları Çizelge 5'de verilmiştir.

Çizelge 5. Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerlerine ilişkin varyans analizi

Deney	Varyans Kaynakları	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Değeri	Hata İhtimali ($p < 0.05$)
Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)	Sarıçam					
	FM	2	719628	359814	131.08	0.000
	KDT	1	61	61	0.02	0.883
	ADT	1	609540	609540	222.05	0.000
	FM x KDT	2	43632	21816	7.95	0.001
	FM x ADT	2	82129	41065	14.96	0.000
	KDT x ADT	1	10755	10755	3.92	0.054
	FM x KDT x ADT	2	84196	42098	15.34	0.000
	Hata	48	131762	2745	-	0.000
	Toplam	59	1681703	-	-	0.000
Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)	Kavak Kontrplak					
	FM	2	1559117	779558	182.84	0.000
	KDT	1	23684	23684	5.56	0.023
	ADT	1	397779	397779	93.30	0.000
	FM x KDT	2	124160	62080	14.56	0.000
	FM x ADT	2	33514	16757	3.93	0.026
	KDT x ADT	1	3554	3554	0.83	0.366
	FM x KDT x ADT	2	34929	17464	4.10	0.023
	Hata	48	204651	4264	-	0.000
	Toplam	59	2381388	-	-	0.000

Çizelge 5' ye göre, denemeye alınan ana faktörlerden filament, kavela dış tipi ve auksetik desen tipinin, auksetik kavelaların KKP ile yüzeyden tutma mukavemeti üzerindeki etkileri 0,05 hata payı ile anlamlı bulunurken, kavela dış tipi faktörünün etkisi Sarıçam ile liflere dik yönde istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur. Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti için yapılan ikili etkileşimlerde, her iki malzeme için de kavela dış tipi–auksetik desen tipi etkileşimi dışındaki tüm ikili etkileşimler 0,05 yanılma olasılığı için anlamlıdır. Her iki malzemede de filament–kavela dış tipi–auksetik desen tipi üçlü etkileşimlerinin liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti üzerindeki etkileri 0,05 hata payı ile önemlidir. Burada da liflere paralel/kenardan kavela tutma mukavemetinde

olduğu gibi, F-değerlerine göre auksetik kavelaların Sarıçam ile liflere dik yöndeki tutma mukavemetinde en etkili faktör auksetik desen tipi, KKP ile yüzeyden tutma mukavemetindeki en etkili faktör ise filament olarak bulunmuştur.

Kavela dış tipi ve auksetik desen tipi dikkate alınarak filament tipi ana faktörünün, Sarıçam ve KKP deney örneklerinin liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılması Çizelge 6’ da verilmiştir.

Çizelge 6. Filament tipine göre liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti ortalamalarının karşılaştırılması

Filament	Liflere Paralel Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Kenardan Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)	
	Sarıçam		Kavak Kontrplak		Sarıçam		Kavak Kontrplak	
	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG
PLA	390.81	A	805.39	A	527.44	A	699.01	A
ASA	270.01	B	380.34	B	321.65	B	410.60	B
ABS	248.24	B	356.00	B	275.52	C	321.24	C

X_{ort}: Ortalama değer

HG: Homojenlik grubu

Filament tipi için başarı sıralaması; her iki malzemede de hem liflere paralel/kenardan hem de liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti için PLA, ASA ve ABS şeklindedir. PLA kavelalar, ABS ve ASA kavelalara belirgin bir üstünlük sağlamıştır. Ancak, liflere paralel/kenardan kavela tutma mukavemetinde ASA ve ABS arasındaki farklar istatistiksel olarak anlamsızdır. Filamentlerin yoğunluk, çekme direnci ve çekmede elastikiyet modülü değerlerindeki başarı sıralaması da aynıdır. Burada, kullanılan filamentlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin mukavemet üzerinde olumlu etkisinin olduğu net olarak görülmektedir. Boşluklu yapıda enine kesiti olan auksetik kavelalarda, özellikle çekme direnci ve elastikiyet modülünün kavela tutma mukavemetinde önemli rol oynadığı söylenebilir.

Kavela dış tipinin, Sarıçam ve KKP deney örneklerinin liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılması Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7. Kavela dış tipine göre liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti ortalamalarının karşılaştırılması

Kavela Dış Tipi	Liflere Paralel Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Kenardan Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)	
	Sarıçam		Kavak Kontrplak		Sarıçam		Kavak Kontrplak	
	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG	X _{ort}	HG
DÜ	310.26	NS	518.17	NS	373.87	NS	457.08	B
iÜ	295.78	NS	509.65	NS	375.88	NS	496.82	A

DÜ: Dik üçgen

iÜ: İkizkenar üçgen

NS: Önemsiz

Varyans analizi sonuçlarına göre (Çizelge 4), kavela dış tipinin Sarıçam ve KKP malzemelerin liflere paralel/kenardan ve liflere dik kavela tutma mukavemeti üzerindeki etkilerinin anlamsız olduğu belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, kavelaların dış yüzeylerindeki dış geometrisinin dik üçgen ya da ikizkenar üçgen şeklinde olması kavela tutma mukavemetini etkilememiştir. Bununla birlikte, KKP malzemenin yüzeyden kavela tutma

mukavemetinde ise kavela dış yüzeyindeki dış geometrisinin ikizkenar üçgen şeklinde olması ile mukavemetin dik üçgen şeklinde olmasına göre yaklaşık %9 arttığı belirlenmiştir.

Auksetik desen tipinin, Sarıçam ve KKP deney örneklerinin liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerlerine etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılması Çizelge 8’de verilmiştir.

Çizelge 8. Auksetik desen tipine göre liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti ortalamalarının karşılaştırılması

Auksetik Desen Tipi	Liflere Paralel Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Kenardan Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)		
	Sarıçam			Kavak Kontrplak			Sarıçam			Kavak Kontrplak		
	X _{ort}	HG		X _{ort}	HG		X _{ort}	HG		X _{ort}	HG	
ÜB	371.33	A		606.26	A		475.66	A		558.37	A	
YB	234.70	B		421.55	B		274.08	B		395.53	B	

ÜB: Üçgen biçimli YB: Yıldız biçimli

Auksetik desen tipine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda, üçgen biçimli kavelaların, hem liflere paralel/kenardan hem de liflere dik/yüzeyden kavela tutma mukavemeti değerlerinde yıldız biçimli kavelalara belirgin bir üstünlük sağladığı görülmüştür. Üçgen biçimli auksetik desene sahip kavelalar yıldız biçimli auksetik desene sahip kavelalardan; Sarıçam malzemede ortalama %65, KKP malzemede ise %43 daha mukavemetli çıkmışlardır.

Filament, kavela dış tipi ve auksetik desen tipi ana faktörlerinin, Sarıçam ve KKP deney örneklerinin liflere paralel/kenardan ve liflere dik/yüzeyden tutma mukavemeti değerleri üzerindeki etkilerine ait ortalamaların karşılaştırılması Çizelge 9’da verilmiştir.

Çizelge 9. Filament – kavela dış tipi – auksetik desen tipi üçlü karşılaştırma sonuçları

FM-KDT- ADT	Liflere Paralel Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Kenardan Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)			Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)		
	Sarıçam			Kavak Kontrplak			Sarıçam			Kavak Kontrplak		
	X _{ort}	v (%)	HG	X _{ort}	v (%)	HG	X _{ort}	v (%)	HG	X _{ort}	v (%)	HG
PLA-DÜ-ÜB	549.3	16.8	A	998.7	14.6	AB	678.6	12.4	A	701.4	15.1	B
PLA-DÜ-YB	206.1	13.1	GH	533.6	13.3	CD	338.4	18.3	CD	539.2	14.3	C
PLA-İÜ-ÜB	417.9	10.3	B	988.8	10.2	A	637.6	3.2	A	806.9	14.4	A
PLA-İÜ-YB	392.4	20.1	B	804.4	19.7	B	455.1	23.8	B	748.6	15.2	AB
ASA-DÜ-ÜB	294.3	16.4	DE	382.6	13.6	C	312.9	6.8	DE	497.9	7.2	CD
ASA-DÜ-YB	246.2	14.8	EFG	307.3	19.1	F	288.1	12.8	DEF	297.5	8.1	FG
ASA-İÜ-ÜB	313.9	7.9	CD	357.1	13.8	EF	402.2	3.8	BC	476.8	8.6	CD
ASA-İÜ-YB	225.6	8.1	FG	290.4	16.9	F	257.9	10.4	EF	370.3	13.3	EF
ABS-DÜ-ÜB	382.6	16.7	BC	382.6	11.6	EF	392.3	3.5	BC	439.3	3.1	DE
ABS-DÜ-YB	192.8	16.6	GH	424.3	8.1	E	232.9	14.7	F	267.2	9.1	G
ABS-İÜ-ÜB	279.6	15.7	DEF	447.9	5.8	DE	404.9	1.1	BC	428.1	5.4	DE
ABS-İÜ-YB	147.7	15.1	H	169.2	11.1	G	71.9	14.7	G	150.3	14.8	H

FM: Filament KDT: Kavela dış tipi ADT: Auksetik desen tipi v: Varyasyon katsayısı

Genel olarak, auksetik özellikteki kavelaların tutma mukavemetinin KKP malzemede Sarıçam malzemeye göre liflere paralel/kenardan yönde ortalama %68, liflere dik/yüzeyden yönde ise ortalama %34 daha yüksek olduğu görülmüştür. Auksetik kavelaların Sarıçam ile tutma mukavemetinde, liflere dik yöndeki mukavemet liflere paralel yöndeki tutma mukavemetine göre daha yüksek değerler vermiştir. Burada, auksetik kavelaların dış yüzeylerindeki dişlerin liflere paralel yönde iyi tutunamayıp liflerin arasından nispeten daha kolay sıyrıldığı, liflere dik yönde ise dişlerin konik geometrik yapısı nedeniyle yıllık halka katmanlarına daha iyi tutunduğu ve bu nedenle daha yüksek mukavemet gösterdiği düşünülmektedir. Auksetik kavelaların KKP malzemedeki tutma mukavemetinde ise, genel anlamda kenardan tutma mukavemeti değerlerinde yüzeyden tutma mukavemeti değerlerine göre az da olsa daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

Hem Sarıçam hem de KKP malzemede en yüksek tutma mukavemeti değerlerinin elde edildiği kavelalar PLA-DÜ-ÜB, PLA-İÜ-ÜB ve PLA-İÜ-YB olarak sıralanmıştır. Burada, PLA filamentin ASA ve ABS filamentlere üstünlüğü göze çarpmaktadır. Ayrıca, üçgen biçimli auksetik desenin, yıldız biçimli desene göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Deneysel sonuçlarına göre, en düşük mukavemet ABS-İÜ-YB ve ABS-DÜ-YB kavelalar ile elde edilmiştir.

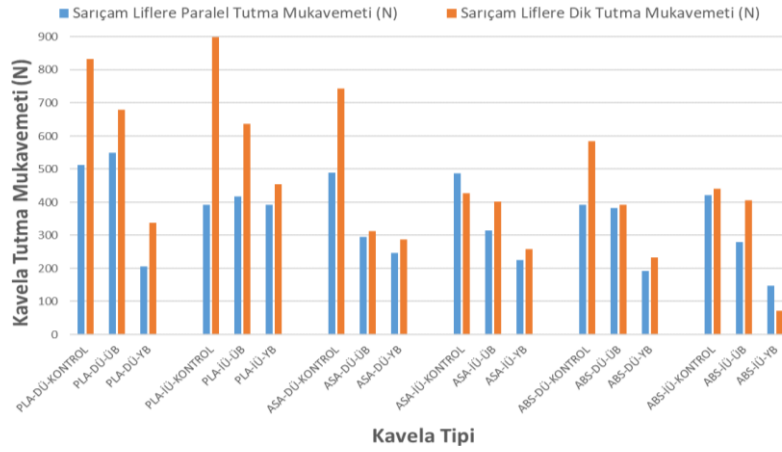
Çalışma kapsamında, auksetik kavelalar ile kontrol kavelalarının tutma mukavemeti açısından karşılaştırılması da yapılmıştır. Her bir kavela grubu için test edilen kontrol kavelalarına ilişkin ortalama tutma mukavemeti değerleri varyasyon katsayıları ile birlikte Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Kontrol kavelalarının tutma mukavemeti değerlerine ilişkin ortalamalar

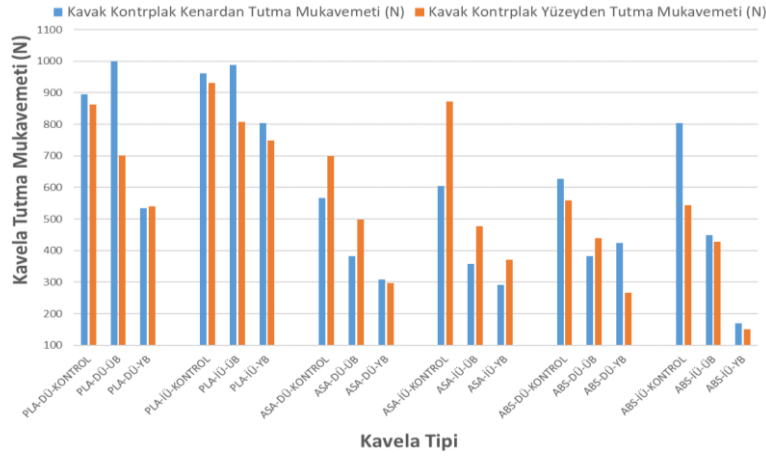
FM-KDT-ADT	Liflere Paralel Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Kenardan Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Liflere Dik Kavela Tutma Mukavemeti (N)		Yüzeyden Kavela Tutma Mukavemeti (N)	
	Sarıçam		Kavak Kontrplak		Sarıçam		Kavak Kontrplak	
	X _{ort}	v (%)	X _{ort}	v (%)	X _{ort}	v (%)	X _{ort}	v (%)
PLA-DÜ-KONTROL	513.4	18.6	894.7	7.1	832.4	3.7	863.3	6.8
PLA-İÜ-KONTROL	392.4	2.5	961.4	19.4	899.1	0.7	931.9	5.3
ASA-DÜ-KONTROL	489.6	8.2	566.5	10.3	743.4	0.3	699.8	4.9
ASA-İÜ-KONTROL	487.2	17.2	604.9	22.1	427.7	4.8	873.1	7.9
ABS-DÜ-KONTROL	392.9	2.6	627.8	15.6	583.7	7.6	558.1	10.7
ABS-İÜ-KONTROL	421.8	4.6	804.4	2.4	441.5	13.3	544.5	13.5

Kontrol kavelalarının tutma mukavemetleri incelendiğinde, KKP malzemedeki tutma mukavemetinin Sarıçam malzemedeki tutma mukavemetine göre %35 daha yüksek olduğu görülmektedir. Kontrol kavelalarında da, auksetik kavelalarda olduğu gibi Sarıçam malzemede liflere dik yöndeki tutma mukavemeti değerlerinin liflere paralel yöndeki tutma mukavemeti değerlerinden daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. KKP malzeme de ise, genel anlamda kenardan tutma mukavemeti, yüzeyden tutma mukavemetine göre az da olsa daha yüksek değerler vermiştir.

Kontrol kavelaları ve auksetik kavelaların Sarıçam ile tutma mukavemetine ilişkin ortalamaların karşılaştırılmasına ilişkin grafik Şekil 7'de, KKP ile kavela tutma mukavemetine ilişkin ortalamaların karşılaştırılmasının grafiksel gösterimi ise Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 7. Kavela gruplarının Sarıçam ile liflere paralel ve dik tutma mukavemeti



Şekil 8. Kavela gruplarının KKP ile kenardan ve yüzeyden tutma mukavemeti

Kontrol kavelaları ile auksetik kavelalar tutma mukavemeti açısından karşılaştırıldığında, bazı gruplar haricinde genellikle kontrol kavelalarının mukavemet değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 7 ve 8 incelendiğinde; Sarıçam malzemede, auksetik kavelalardan PLA-DÜ-ÜB, PLA-İÜ-ÜB ve PLA-İÜ-YB kavelaların, KKP malzemede de benzer şekilde PLA-DÜ-ÜB ve PLA-İÜ-ÜB kavelaların tutma mukavemeti değerlerinin aynı gruplara ilişkin kontrol gruplarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna göre, Sarıçam malzeme için, tüm kavela grupları içerisindeki üç grup kavelanın (PLA-DÜ-ÜB, PLA-İÜ-ÜB, PLA-İÜ-YB), KKP malzeme için ise iki grup kavelanın (PLA-DÜ-ÜB, PLA-İÜ-ÜB) mobilya birleştirmelerinde kullanılabileceği söylenebilir. PLA dışındaki malzemeden üretilen tüm grup kavelalar kontrol gruplarından daha düşük mukavemet değerleri vermişlerdir. Burada, kavela malzemelerinin çekme dirençlerinin etkili olduğu açıkça görülmekte olup bu kavelaların enine kesitlerinde oluşturulan auksetik desenli boşluklu yapının, enine kesitlerin çekme kuvvetlerine direnç gösteren yüzey alanlarının küçülmesine neden olduğu ve bu durumun da tutma mukavemetlerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya birleştirmeleri için; kolay çakılıp zor sökülebileceği öngörülen, auksetik özellikte, inovatif, dışarıdan görünmeyen, kolay montaj sağlayan alternatif kavela tasarımları yapılmış ve bunların çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretiminde kullanılan ahşap malzemeler ile tutma mukavemetleri değerlendirilmiştir.

- Kavela tutma mukavemeti deneyleri sonuçlarına göre, KKP örnekler Sarıçam örneklerine göre belirgin bir şekilde yüksek mukavemet değerleri vermiştir. Deneylerde, kavela üretiminde kullanılan malzemelerden PLA filamentin, ABS ve ASA filamentlere göre çok daha iyi tutma mukavemeti sonuçları verdiği belirlenmiştir. Burada, kullanılan filamentlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin kavela tutma mukavemeti üzerindeki olumlu etkisi açıkça görülmüştür. Çalışmada, kavela dış yüzeylerinde uygulanan dış tipinin; Sarıçam ve KKP malzemelerin kavela tutma mukavemeti üzerindeki etkilerinin anlamsız olduğu belirlenmiştir. Bir başka ifadeyle, kavelaların dış yüzeylerindeki dış geometrisinin dik üçgen ya da ikizkenar üçgen şeklinde olması kavela tutma mukavemetini etkilememiştir. Sadece, KKP malzemenin yüzeyden kavela tutma mukavemetinde kavela dış yüzeyindeki dış geometrisinin ikizkenar üçgen şeklinde olması ile mukavemetin dik üçgen şeklinde olmasına göre %9 oranda artığı belirlenmiştir. Kavela enine kesitlerinde uygulanan auksetik desen tipine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda ise; üçgen biçimli kavelaların yıldız biçimli kavelalara belirgin bir üstünlük sağladığı görülmüştür.
- Kontrol gruplarına göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda, birkaç grup haricinde genellikle kontrol kavelalarının mukavemet değerlerinin auksetik kavelalardan daha yüksek olduğu görülmüştür. Sarıçam malzemedede, auksetik kavelalardan PLA-DÜ-ÜB, PLA-İÜ-ÜB ve PLA-İÜ-YB kavelaların, KKP malzemedede de PLA-DÜ-ÜB ve PLA-İÜ-ÜB kavelaların tutma mukavemeti değerleri kontrol gruplarına üstünlük sağlamıştır. Buna göre, Sarıçam için, tüm kavela grupları içerisinde üç grup kavelanın, KKP malzeme için de iki grup kavelanın mobilya birleştirmelerinde kullanılabileceği söylenebilir.
- Bu çalışmada, mobilya mühendisliğinin mukavemet tasarımı adımlarından ilki olan; bağlantı elemanlarının, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya üretimde kullanılacak malzemeler ile tutma mukavemetlerinin belirlenmesi aşaması gerçekleştirilmiş ve denenen farklı tiplerdeki auksetik kavelalardan üç tanesi ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Mobilya mühendisliğinde mukavemet tasarımının bir sonraki adımı, tasarlanan bu bağlantı elemanlarının, çerçeve konstrüksiyonlu mobilya iskeletindeki bağlantı noktalarını temsil eden birleştirme elemanlarında (L-tipi, H-tipi, T-tipi) kullanılması ve bu birleştirme elemanlarının kullanım sırasında maruz kalabileceği yükleme biçimine (doğrusal çekme, eğilme, kesme) göre test edilmesidir. Buna göre, ileriki çalışmalarda bu çalışmada başarılı sonuçlar alınan bağlantı elemanlarının, birleştirme elemanlarında gösterecekleri performansların belirlenmesi gerektiği aşikârdır. Ayrıca, mobilya mukavemet tasarımındaki son aşamanın, 1/1 boyutlardaki prototip ürünlerin gerçek kullanım ve yükleme koşulları altında performans testlerine alınması olduğu düşünüldüğünde, yine gelecekteki çalışmalarda, bu çalışmada ve birleştirme elemanları testlerinde başarılı bulunan bağlantı elemanları kullanılarak üretilecek gerçek ölçülerdeki çerçeve konstrüksiyonlu koltuk iskeletlerinin performans testlerinin de yapılması gerektiği açıktır. Çalışmada denenen auksetik kavelalardan optimum montaj kuvveti ve maksimum tutma kuvveti açısından başarılı sonuçlar alınması halinde, çerçeve konstrüksiyonlu mobilyalar (özellikle döşemeli koltuk iskeletleri), tutkal kullanımı olmadan ve hiçbir yardımcı araç gereç kullanılmadan, kısa sürede kolayca monte edilebilecek ve döşeme yapılmaya hazır hale gelecektir.

Teşekkür

Bu makale, birinci yazarın Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaçişleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda devam eden doktora tez çalışmasından üretilmiştir. Makalenin ön çalışması niteliğindeki bazı sonuçlar "4. Uluslararası Lisansüstü Çalışmalar Kongresi"nde sözlü olarak sunulmuş ve bildiri kitabında tam metin olarak yayınlanmıştır (Ceylan ve diğerleri, 2024). Ayrıca, çalışma kapsamındaki üçgen desenli

kavela örneği için 30.12.2022 tarihinde, 2022/021679 başvuru numarası ve “Genişleme Eğilimli Kavela” başlığıyla, T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Türk Patent ve Marka Kurumuna Ulusal Patent Başvurusu yapılmış, ürünün patent korumasına alınması için süreçler devam etmektedir.

Yazar Katkıları

Erkan Ceylan: Araştırmanın yapılması, Deneyleerin yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, İnceleme ve düzenleme. **Ali Kasal:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Deneyleerin yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Kaynaklar, Denetleme, Doğrulama, Görselleştirme, Makale Taslak oluşturma, Makale Yazma, inceleme ve düzenleme. **Jerzy Smardzewski:** Kavramsallaştırma (araştırma fikri ve amaçlarının geliştirilmesi), Metodolojinin belirlenmesi, Denetleme, Doğrulama, Makale Taslak oluşturma. **Mehmet Yüksel:** Deneyleerin yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, Denetleme, Doğrulama, İnceleme ve düzenleme. **Tolga Kuşkun:** Metodolojinin belirlenmesi, Araştırmanın yapılması, Analizlerin yapılması, Veri iyileştirme, İnceleme ve düzenleme.

Finansal destek beyanı

Deney örneklerinin hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve bunların üniversiteye nakliyesi için Türkiye Mobilya sektöründe faaliyet gösteren önemli firmalardan biri olan Bellona Mobilya A.Ş’ den destek alınmıştır.

Çıkar çatışması

Yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- ASTM International, (2017). ASTM D3039/D3039M–17 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA.
- Ceylan, E., Kasal, A., Smardzewski, J., Kuşkun, T., Yüksel, M., (2024). Mobilya birleştirmeleri için tasarlanan auksetik kavelaların montaj kuvvetlerinin belirlenmesi, 4. Uluslararası Lisansüstü Çalışmalar Kongresi, IGSCONG’24, 5–8 June 2024, Bildiri Kitabı sf: 432-444
- Eckelman, C. A., (2003). Textbook of product engineering and strength design of furniture, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 65-67.
- Evans, K. E., Nkansah, M. A., Hutchinson, I. J., & Rogers, S. C., (1991). Molecular network design, *Nature*, 353, 124. DOI: [10.1038/353124a0](https://doi.org/10.1038/353124a0)
- Kasal, A., Kuşkun, T., & Smardzewski, J., (2020). Experimental and numerical study on withdrawal strength of different types of auxetic dowels for furniture joints, *Materials*, 13(19), 4252. DOI: [10.3390/ma13194252](https://doi.org/10.3390/ma13194252)
- Kasal, A., Kuşkun, T., Smardzewski J., & Güray, E., (2023). Analyses of L-type corner joints connected with auxetic dowels for case furniture, *Materials*, 16(13): 4547. DOI: [10.3390/ma16134547](https://doi.org/10.3390/ma16134547)
- Kuşkun, T., Smardzewski, J., & Kasal, A., (2021). Experimental and numerical analysis of mounting force of auxetic dowels for furniture joints, *Engineering Structures*, 226, 111351. DOI: [10.1016/j.engstruct.2020.111351](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111351)

- Kuşkun, T., Kasal, A., Çağlayan, G., Ceylan, E., Bulca, M., & Smardzewski, J., (2023). Optimization of the cross-sectional geometry of auxetic dowels for furniture joints, *Materials*, 16(7), 2838. DOI: [10.3390/ma16072838](https://doi.org/10.3390/ma16072838)
- Lakes, R., (1987). Foam structures with a negative poisson's ratio, *Science*, 235(4792), 1038-1041. DOI: [10.1126/science.235.4792.1](https://doi.org/10.1126/science.235.4792.1)
- Lim, T. C., (2015). Auxetic materials and structures (1. baskı). Singapore: Springer Singapore, DOI: [10.1007/978-981-287-275-3](https://doi.org/10.1007/978-981-287-275-3)
- Örs, Y., Efe, H., (1998). The mechanical behavior properties of fasteners in furniture design for frame construction, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 22, 21-28.
- Ren, X., Shen, J., Tran, P., Ngo, T. D., Xie, & Y. M., (2018). Auxetic nail: Design and experimental study, *Composite Structures*, 184, 288-298. DOI: [10.1016/j.compstruct.2017.10.013](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.013)
- Smardzewski, J., & Prekrat, S., (2011). Design of small auxetic springs for office furniture, Proceedings of International Conference wood is good – EU preaccession challenges of the sector, Zagreb, 173-182. DOI: [10.5555/20113406431](https://doi.org/10.5555/20113406431)
- Smardzewski, J., (2013a). Auxetic springs for seating, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 37(3), 369-376. DOI: [10.3906/tar-1204-64](https://doi.org/10.3906/tar-1204-64)
- Smardzewski, J., (2013b). Elastic properties of cellular wood panels with hexagonal and auxetic cores, *Holzforschung*, 67(1), 87-92. DOI: [10.1515/hf-2012-0055](https://doi.org/10.1515/hf-2012-0055)
- Smardzewski, J., Robert K., & Beata F., (2013). Design of small auxetic springs for furniture, *Materials & Design*, 51:723-728. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.04.075](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.075)
- Smardzewski, J., Wojciechowski, K. W., & Poźniak, A., (2018). Auxetic lattice truss cores fabricated of LayWood, *BioResources*, 13(4), 8823-8838. DOI: [10.15376/biores.13.4.8823-8838](https://doi.org/10.15376/biores.13.4.8823-8838)
- 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. T.S.E. Ankara, Türkiye.
- 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. T.S.E. Ankara, Türkiye.
- TS ISO 13061-3 (2021). Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - Kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - Bölüm 3: Statik eğilmede nihai mukavemet tayini. T.S.E. Ankara, Türkiye.
- TS ISO 13061-4 (2021). Odunun fiziksel ve mekanik özellikleri - kusursuz küçük ahşap numunelerin deney yöntemleri - bölüm 4: statik eğilmede elastikiyet modülünün tayini. T.S.E. Ankara, Türkiye.