



Selection of appropriate solid wood species for bending-active structures

Muhammed Emin Akyürek^{1*} , Zehra Canan Girgin² 

¹Department of Interior Architecture and Environmental Design, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Istanbul Sabahattin Zaim University, 34303, Kucukcekmece, Istanbul, Türkiye

²Department of Architecture, Faculty of Architecture, Yildiz Technical University, 34349, Besiktas, Istanbul, Türkiye

Highlights:

- The size and detail of some grid shells were defined and relationship between the radius of curvature was examined.
- The radius of curvature for some Turkish woods, which are not found in the literature, were achieved through analytical methods, and some relationships were developed.
- Turkish woods were also compared with structural timber and samples in the case studies and European woods.

Graphical/Tabular Abstract

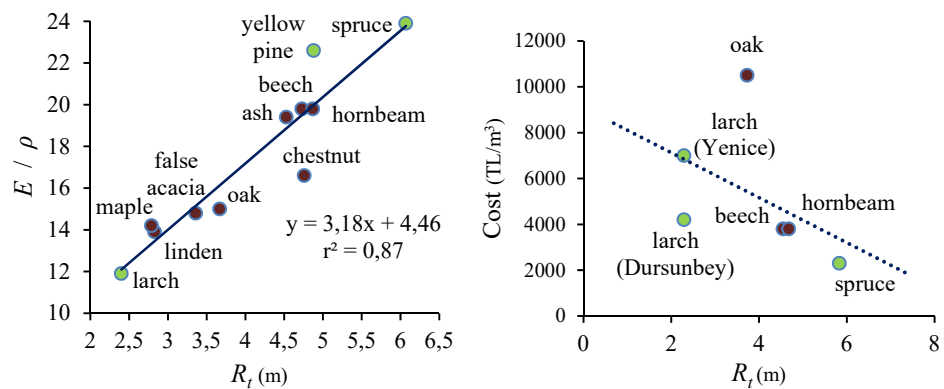


Figure A. Comparison of radius of curvature with elastic modulus/ density and cost of some woods in Turkey in 20mm thickness

Keywords:

- Elastic structures
- Timber grid shell
- Turkiye woods
- Material selection
- Radius of curvature

Article Info:

Research Article

Received: 16.04.2022

Accepted: 10.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1104075

Correspondence:

Author: Muhammed Emin

Akyürek

e-mail:

muhammed.akyurek@izu.edu.tr

phone: +90 212 692 9811

Purpose:

The general purpose of this study is to define the bendability criteria of grid shell. In particular, it is aimed to determine the suitability of woods in Turkey for grid shell with analytical methods.

Theory and Methods:

In this study, bending capacity of grid shells were examined according to tree type, sizing and detailing. Design radius of curvature (R_t) was defined for 20mm thick laths regarding Turkiye woods simply in terms of allowable bending strength (σ_{em}) and elastic modulus (E). R_t values were compared with USFPL's experimental radius of curvature (R_d) to verify the relationship between design and experimental method, relationship was confirmed with very high correlation coefficient ($r=0.97$). Proper woods were determined through regression analyses among R_t , E , ρ , production amount and cost. Bendability and mechanical characteristics of some woods were also compared with the case studies and Europe. Finally, wood species in Turkiye were classified through the criteria of usability and ordering to the importance in the grid shell.

Results:

In the structures examined, the ratio of height to length of the laths is 0.23-0.30, and the ratio to span is 0.33-0.41. In terms of lightness and bendability, the material should have a thin section, straight fibers, few knots, high bending strength, low elastic modulus and low density. In terms of lightness and bendability, larch from softwoods and maple and linden from hardwoods are the most efficient examples. Yet, production of maple and linden are insufficient. Generally, the cost increases as the radius of curvature decreases. Oak is relatively expensive due to its durability (Figure A). The bending ability of larch, oak and beech is higher than its European counterparts with its low elastic modulus and high bending strength. The European Spruce, on the other hand, is more qualified than its example in Turkey.

Conclusion:

Among all Turkish woods examined, Oak, beech and larch in Turkiye are the most suitable woods in terms of supply, mechanical properties and bendability for grid shell construction.



Eğilme-etkin strüktürler için uygun masif ahşap türünün seçimi

Muhammed Emin Akyürek^{1*}, Zehra Canan Girgin²

¹Istanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü, 34303, Küçükçekmece, İstanbul, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, 30349, Beşiktaş, İstanbul, Türkiye

ÖNE ÇIKANLAR

- Bazı ızgara kabuklarının boyutu ve detayı tanımlanmış ve eğrilik yarıçapı arasındaki ilişki incelenmiştir
- Bazı Türk ağaçlarının literatürde olmayan eğrilik yarıçapları analitik yöntemlerle elde edilmiştir.
- Türkiye ahşapları ayrıca yapısal ahşap ve vaka çalışmalarında örnekler ve Avrupa ahşapları ile karşılaştırılmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.04.2022

Kabul: 10.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1104075

Anahtar Kelimeler:

Esnek yapılar,
ahşap ızgara kabuk,
Türkiye ağaç odunları,
malzeme seçimi,
eğrilik yarıçapı

ÖZ

Eğilme-etkin tasarım, başlangıçta düzlemsel olan kirişlerin veya kabuk parçalarının elastik yer değiştirme sınırları içerisinde eğilip mesnetlenmesi esaslı bir yaklaşımdır. Hafif, esnek ve organik olma özellikleri ile öne çıkan ahşap ızgara kabukları bu yaklaşım ile üretilir. Taşıyıcı elemanın eğilebilmesine yönelik ölçütler ve deneysel çalışmaların oldukça sınırlı olması nedeniyle eğilme işleminde malzeme kayıpları da söz konusudur. Bu çalışmada, ahşap ızgara kabuklarının Türkiye’de uygulanabilirliğine odaklanılmıştır. Öncelikle bu konuda dünyadaki uygulamaların boyut ve detay bilgileri belirlenmiş, takiben yerli ağaç odunu karakteristikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, Türkiye’de yetişen bazı ağaç odunlarının fiziksel ve mekanik karakteristikleri tablolaştırılmış, hangi ağaç odunlarının bu işleme uygun olduğu detaylı veri analizi ile araştırılmıştır. Yerli literatürde bulunmayan eğrilik yarıçapları hesaplanarak; yoğunluk, eğilme dayanımı, elastisite modülü, maliyet, üretim miktarı parametreleri ile ilişkisi belirlenmiştir. Bu araştırma; ızgara kabuk yapılarının Türkiye’de uygulanabilirliğinin araştırılması, ağaç türlerinin sınıflandırılarak uygun olanların analitik yöntemler ile belirlenmesi ve değerlendirilmesi bakımından literatürdeki ilk çalışmadır. Değerlendirmelerden, ülkemizde yaygın olan ve Avrupa’daki örneklerine göre de eğilme dayanımı daha nitelikli olan kayın, karaçam ve meşenin; ızgara kabuk üretimi için tedarik, dayanım ve eğilebilirlik yönünden en uygun ağaçlar olduğu sonucuna varılmıştır. Analiz sonuçlarının bu yapıların inşası konusunda ahşap endüstrisini teşvik edeceği öngörülmektedir.

Selection of appropriate solid wood species for bending-active structures

HIGHLIGHTS

- The size and detail of some grid shells were defined and relationship between the radius of curvature was examined
- The radius of curvature for some Turkish woods, which are not found in the literature, were achieved through analytical methods
- Turkish woods were also compared with structural timber and samples in the case studies and European woods

Article Info

Research Article

Received: 16.04.2022

Accepted: 10.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1104075

Keywords:

Elastic structures,
timber grid shell,
Türkiye woods,
material selection,
radius of curvature

ABSTRACT

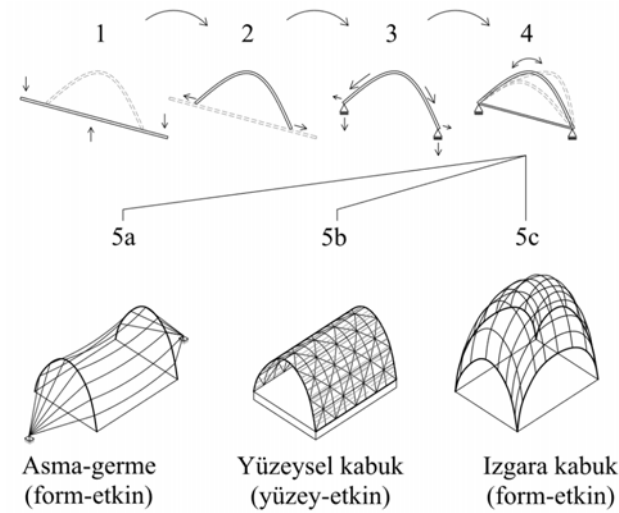
Bending-active design is an approach based on bending and then fixing initially planar beams or shell parts within elastic displacement limits; grid shell, which stand out with their light, flexible and organic properties, are produced with this approach. In the production under consideration, material losses also occur in bending due to some missing criteria and limited experimental studies on the bending of the structural member. In this study, it is focused on the applicability of wooden grid shell in Türkiye. First, the sizing and detailing knowledge of worldwide applications were determined, and then the characteristics of the native wood types were investigated. In this scope, the tree species and proper wood types in Türkiye for this process were studied through detailed data analysis. From the current literature, the physical and mechanical characteristics of native wood species in Türkiye were tabulated. The radii of curvature not available in the national literature were calculated and the relationships of the parameters among the density, flexural strength, modulus of elasticity, cost, production quantity parameters were investigated. This research is the first study in the literature on the applicability of grid shell structures in Türkiye to classify tree species and to determine and evaluate suitable wood types with analytical methods. From the evaluations, beech, larch and oak, which are common in our country and have higher flexural strength compared to their examples in Europe; it was concluded that the most proper tree species in terms of supply, strength, and bendability for grid shell production. It is predicted that the results of the analysis will encourage the wood sector for the construction of this type of structural systems.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : muhammed.akyurek@izu.edu.tr, zcgirgin@yildiz.edu.tr / Tel: +90 212 692 9811

1. Giriş (Introduction)

Anıtsal mimaride tarih boyunca daha az malzeme ile daha geniş açıklıklar meydana getirme yolları aranmıştır. Yapılar gittikçe daha dinamik ve plastik formlara kavuşmuştur. Katlanmış plak (origami) kablo ağı ve asma-germe gibi çağdaş taşıyıcı sistemler bu yaklaşıma örnek verilebilir. Günümüzde afet sonrası geçici yapılaşma, geçici etkinlik alanlarının örtülmesi ve korunması gereken yapılara yeni öğelerin eklenmesi, iklim ve fonksiyona göre şekil alma gibi sorun ve talepler; hareketli, şekil değiştirebilen, uyarlanabilir, sökülüp-takılabilir, esnek ve eğilme-etkin gibi yeni taşıyıcı sistem kavramlarını meydana getirmiştir.

Engel'in [1] biçim ve davranış özelliklerine göre yaptığı taşıyıcı sistem sınıflandırması diğer birçok yaklaşıma rağmen uzun yıllardır geçerliliğini korumaktadır. Bu sınıflandırmaya göre strüktürel etkinlik; form, vektör, kesit veya yüzey bakımından incelenmektedir. Eğilme-etkin strüktürler ise Lienhard ve Knippers [2, 3] tarafından geliştirilip Engel'in sistematığına eklenen; günümüzün hafif, esnek ve uyarlanabilir yapılarını tasarlama ve uygulama yaklaşımıdır. Eğilme-etkin strüktürler başlangıçta düzlemsel olan kirişler veya kabuk parçalarının elastik yer değiştirme sınırları içerisinde eğilip mesnetlenmesi ile oluşur [3]. Yapının son halinin bir kabuk olması nedeniyle, yeni bir taşıyıcı sistem tipi değildir. Form bulma izleminin eleman veya sistemin elastik yer değiştirme kapasitesine göre geliştirilmesiyle diğer sistemlere entegre olabilen yeni bir yaklaşımdır. Düzlemsel bir ızgaranın deforme edilip mesnetlenmesi ile oluşturulan ızgara kabuklar, eğilme-etkin strüktür kapsamında en yaygın yapılardır (Şekil 1). İnce kesitli elemanların kullanılması, çelikten farklı olarak anizotrop malzeme olması ve eğilme karakteristiklerinin çok daha düşük olması nedenleri ile ağaç odununun titizlikle seçilmesi gereklidir. Taşıyıcı elemanların atölye ortamında üretilip şantiyeye getirilerek yerinde kurulan ahşap ızgara kabuk türleri de vardır. Ancak bunlar rijit sistemler olup şantiye ortamında deformasyona imkân vermediği için, eğilme-etkin strüktür kapsamında değildir.



Şekil 1. Eğilme davranışı ve mesnetlenme durumuna göre eğilme-etkin strüktürler
(Bending-active structures according to bending behavior and support conditions)

Bu çalışmada, öncelikle, dünyadan ızgara kabuk sistem örneklerine ait ağaç türü, boyut ve detaylandırma bilgileri üretilmiştir. İkinci aşamada, Türkiye'deki ağaç türlerine ait fiziksel ve mekanik karakteristikler tablolastırılmıştır.

İnceleme Avrupa'daki ağaç odunlarını da içermektedir. Eğilebilirliğin temel ölçütü olan eğrilik yarıçapı (R) üzerine Türkiye'de literatür bulunmadığı için, bu kavram hesap yolu ile ortaya konulmuştur. Türkiye'deki ağaç odunlarının fiziksel ve mekanik karakteristikleri arasındaki ilişkiler regresyon analizi ile araştırılmış, veriler ayrıca üretim miktarı ve maliyet bilgileri ile de ilişkilendirilerek uygun ağaç odunları belirlenmiştir. Ağaç odunları için önem sıralaması değerlendirmesi yapılarak, kullanım amacına yönelik önerilerde bulunulmuştur. Bu çalışma, rijitlik yerine esnekliği hedefleyen bu sıra dışı yapılar için, Türkiye'deki amaca uygun ağaç türlerinin belirlenme yöntemi ve bulguları yönü ile özgündür. Ağaç türlerinin yapı tipine göre kullanımı için değerlendirme ve öneriler, çalışmanın literatüre bir başka katkısıdır. Türkiye ormanlarının bugünkü potansiyelinin, ahşap yapı geleneğinin yeniden canlandırılması ve çağdaş yapıların inşası için bir fırsat olduğu düşünülmektedir.

2. Ahşap Izzgara Kabuklar (Timber Grid Shells)

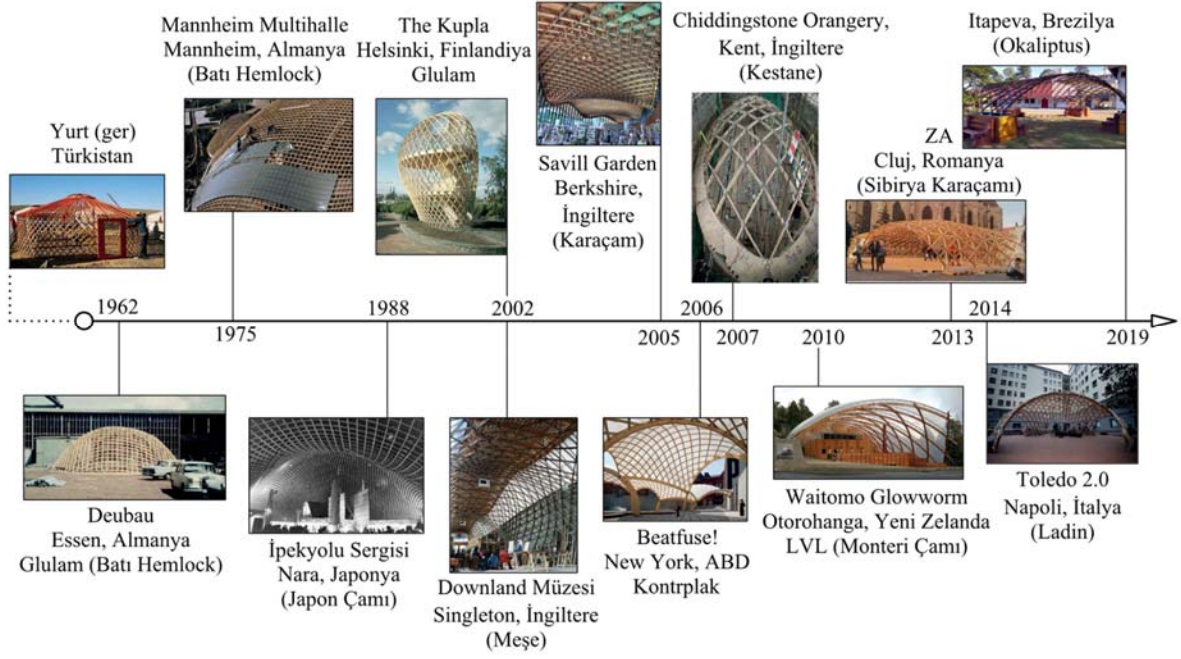
2.1. Tarihçe (History)

Geleneksel Türk ve Moğol çadırları (yurt, ger); bir makas şeklinde kapanıp açılabilen, burulabilen ve eğilebilen, ızgara düzenindeki lataların etkinliğini esas alan eğilme-etkin ızgara kabuk (*grid shell*) taşıyıcı sistemin erken örnekleridir. Bu sistemin ilk modern örneğini ise Frei Otto gerçekleştirmiştir. *Deubau Pavyonu* (1962), eliptik parabolit geometrisi ile ahşap ızgaralı kabukların sade ve deneysel bir örneğidir; 200 m² alanı örten kabuk ızgarası, kurulduktan sonra mobil vinç ile kaldırılarak zemine mesnetlenmiştir. *Alman Pavyonu* (1967) ve *Mannheim Multihalle* (1975)'de ise serbest geometriyi benimsemiş; günümüze ışık tutmuştur. 2000'lerden itibaren parametrik tasarım yöntemleri ile, ızgara kabuklar yaygın kullanım alanı bulmaya başlamış, geliştirilen yenilikçi detaylar çeşitli masif ve endüstriyel ahşap elemanlar ile denenmiştir. Geçmişten günümüze bazı önemli ızgara kabuk örneklerin gelişimi çeşitli kaynaklardan derlenerek Şekil 2'de verilmiştir.

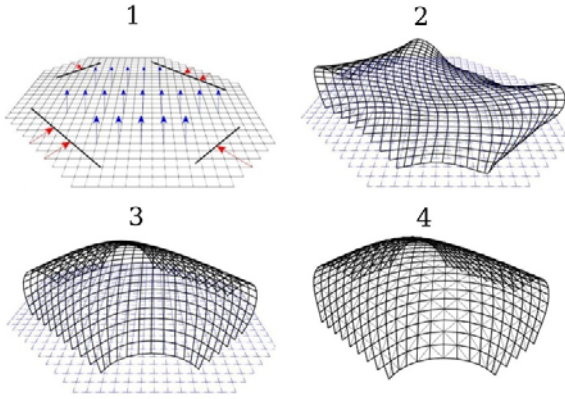
2.2. Form bulma ve Uygulama (Form Finding and Application)

Türk çadırı gibi geleneksel taşıyıcı sistemlerin yapımı ampirik yöntemler ile gerçekleşmiştir. Form ve kuvvetler arasındaki ilişki ise, ilk defa 20. yüzyılın yapı sanatçıları tarafından tablo ve grafiklere dökülmüştür [7]. Bu sanatçılardan Frei Otto, zincir eğrisi modeline dayanan maketini fotogrametri yöntemiyle tersyüz etmiş [8], ilk ızgara kabuğun tasarım konseptini oluşturmuştur. Izzgara kabuk tasarımı için, gerilmelere bağlı biçimlenmeden dolayı parametrik modelleme yöntemleri uygundur. Ana ilkeleri ile tasarım; kabuk ızgarasının planlanması, mesnet yerlerine göre kabuk formunun oluşturulması, belirlenen malzemeye göre taşıyıcı sistemdeki gerilmeler ile şekil değiştirmelerin belirlenmesi ve form optimizasyonu aşamalarından oluşur (Şekil 3). Kurulum için öncelikle düzlemsel ızgara üretilir; vinç ya da şişirme membran ile kaldırılabilir veya yüksek bir noktada iskele ile askıya alınıp kenarlarından yerçekimi yardımıyla deforme edilebilir.

Izzgara kabuklar, tek eğrilikli (silindirik), eş eğrilikli (kubbesel), zıt eğrilikli (hiperbolit, hipar) veya amorf geometriye olabilir; ancak doğal olarak amorf yapı eğilimindedir. Eş eğrilikli/sinklastik (kubbesel) formlarda, elemanlar kemer şeklinde olup yalnızca basınca çalışır. Formun zıt eğrilikli/antiklastik (hiperbolik veya amorf) olması durumunda, aynı kesitte eğilme etkisi ile basınç ve çekme gerilmeleri meydana gelir. Düzlemsel elemanların eğilebilmesi için gerekli eğrilik ağaç odunu ile uyumlu olmalıdır. Strüktürel davranış; tabaka sayısı, ızgara düzeni, form, form bulma yöntemi ve modül geometrisine göre sınıflandırılır [9].



Şekil 2. Geçmişten günümüze bazı ızgara kabuklar ve kullanılan malzemeler [4-6] (Some grid shells and used materials from past to present)



Şekil 3. Bir ızgara kabuğun bilgisayar destekli tasarım aşamaları [4] (Computer-aided design stages of a grid shell)

2.3. Eleman Boyutları ve Biçimlendirme (Sizing and Bending)

Ahşap ile oluşturulan hafif ve genellikle oldukça boşluklu yüzey, maliyeti düşürür. Elemanın kalınlığının (d) artması atalet momentini yükselteceğinden, dayanım ve eğilme yeteneği arasında uygun bir denge olmalıdır. Aynı ağaç cinsi için, görsel biçimde tanımlanan Şekil 4a'ya göre,

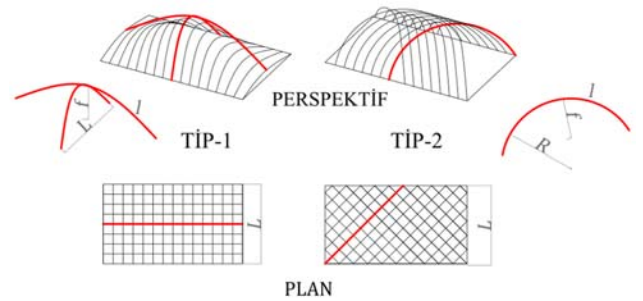
- Aynı kesitli iki elemandan uzun olanı, eğme işlemi için daha düşük enerji gerektirir (3 ve 4).
- Açıklığı (L) aynı olan iki elemandan kalınlığı (d) daha az olanın eğilme yeteneği daha yüksek olup eğrilik yarıçapı (R) daha az olabilir (2 ve 3).
- Açıklığı (L) ve kalınlığı (d) aynı olan iki elemanın, genişlikten (b) bağımsız olarak, eğrilik yarıçapları eşittir (1 ve 2).

Özet olarak genişliğin, yani eğilme yönüne dik yöndeki boyutun eğilme üzerinde etkisi azdır. Eğilmeye önemli olan değerler elemanın kalınlığı ve uzunluğudur.

Ahşap elemanlara yönelik eğme işlemleri, mobilya sektöründe sıklıkla kullanılan bir tekniktir. Malzeme ıslatıldıktan sonra, eğme işleminin yapılacağı platformda gerilip kurutulur ve bekletilir, böylece eğrisel yeni formunu alır. Eğilme etkin taşıyıcı sistemlerde kullanılacak ahşap elemanların eğilme dayanımı ve yeteneğini test etmek için hareketli ve yenilikçi platformlar da geliştirilmiştir (Şekil 4b).

Izgara düzeni, ilk uygulamalarda genellikle 90° iken (Şekil 5, TİP-1), çağdaş ızgara kabuklarda eleman boyunun kısaltılabilmesi için çapraz konum tercih edilmiştir (Şekil 5, TİP-2). Yüksekliğin maksimum eleman boyuna oranı (f/l) 0,23-0,30, yüksekliğin açıklığa oranı (f/L) ise 0,33-0,41 aralığındadır. Eğrilik yarıçapı (R) ise Eş. 1 [11]'e göre hesaplanır.

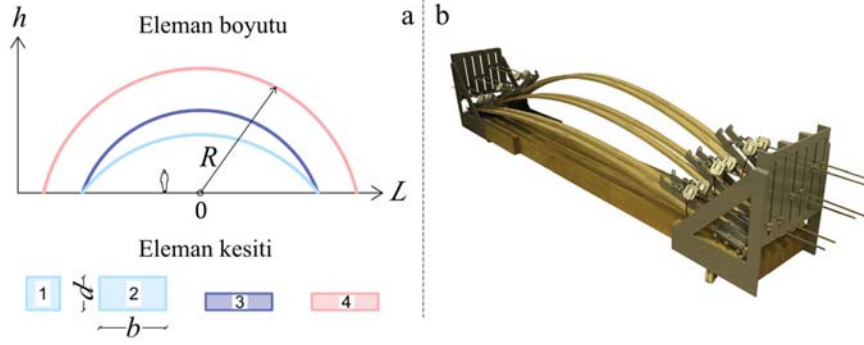
$$R = \frac{(L/2)^2 + f^2}{2f} \quad (1)$$



Şekil 5. Dikey ve çapraz konumlu ızgaralardan oluşan kabuğun elemanları (Elements of the shell composed of vertical and diagonal grids)

2.4. Detaylandırma (Detailing)

Izgara kabuğun formu, düzlemsel yapı elemanlarının kolon, kemer ve kiriş gibi mesnetlerin konumuna göre eğilmesi ile şekil alır. Sistem,



Şekil 4. (a) Eğilmeye etki eden boyut faktörleri ve eğrilik yarıçapı kıyaslaması; (b) Ahşabın eğilme dayanımı ve yeteneğini ölçen yenilikçi bir test platformu [10]

(a: Comparison of dimensional facts and radius of curvature on the bending, b: An innovative testing platform measuring the bending strength and bending ability of wood)

eğilmeye karşı dayanım ve stabilite açısından tek, çift veya çok katmanlı olabilir. Elemanın eğilme dayanımı, uç uca eklenme, düğüm noktası detayı ve diğer destek elemanları form ve ağaç cinsine göre belirlenir. Düğüm noktaları; kurulum esnasındaki esnekliği sağlama, elemanları birleştirme, yükü taşıyarak iç kuvvetleri komşu elemanlara aktarma ve katmanlar arasındaki kaymayı engelleme görevlerini üstlenir. Eleman birleşimi ve düğüm noktalarında çeşitlilik mevcuttur. Rijitlik, stabilite veya kaplama elemanına birleşim gibi sorunlar açısından, yenilikçi ve ideal detaylar üretme çabaları sürmektedir. Detaylandırma ile ilgili olarak uygulamaya yönelik bazı tercih ve değişkenler aşağıda verilmiştir:

- Sistem bazında burulmalara karşı çevresel kiriş, bağlantı kirişi, kolon ve kemer gibi basınç elemanlarının yanı sıra; rijit düğüm noktası, çapraz gergi, ilave lata/çelik kablo, ızgara üzerine sürekli katman (levha) tercihi başlıca çözümlerdir.
- Taşıyıcı sistemin çok katmanlı yassı elemanlar ile iki katman arasına kesme bloklarından oluşturulması; eğilme ve kayma dayanımını artırır.
- Eğriliğin arttığı tepe noktalarında, kalınlığın yarı yarıya azaltılarak iki kademeli montajı, yüksek eğrilikli ızgara kabukların yapımını kolaylaştırır [4].
- Eğrilik yarıçapını düşürmek için, ahşap eleman çatlamasının beklendiği çekme bölgesinde çelik levha ile desteklenir [11].
- Temele birleşim payanda ya da çevresel kirişler (sabit mesnet) ile veya hareketli metal bağlantı elemanları, kum/toprak dolgulu sandık ve bank türü elemanlar (hareketli mesnet) ile sağlanır.
- Kaplama olarak; dayanım, maliyet, estetik, kullanım ömrü gibi kriterlere göre; politetrafloroetilen (PTFE), etilen tetrafloroetilen (ETFE), polivinilklorür (PVC), cam, kurşun, kâğıt membran tercih edilir [12]. UV dayanımı yüksek olmak koşulu ile, polimerik malzemeler esneklik ve montaj kolaylığı bakımından daha uygundur. ETFE inceliği ve saydamlığı, PTFE dayanımı ve düşük maliyeti ile öne çıkar. Her iki malzeme de şekil değiştirme ve kullanım ömrü bakımından PVC'den üstündür [13]. Ahşap ve kurşun kaplamanın tespiti için kaplama levhası gereklidir; OSB levha eğilme yeteneği bakımından, kontrplak levha ise, eğilme dayanımı açısından tercih edilir [14, 15].

Ahşap seçiminde eğilme yeteneğinin yanında tedarik ve maliyet en önemli değişkenlerdir; bu nedenle bulunduğu bölgede üretim miktarı yüksek ve düşük maliyetli ağaçlar tercih edilir.

2.5. Dünyadan Örnek Yapılar (Case Studies)

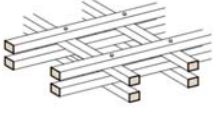


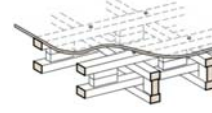




Eğilme etkin yapılarda masif ahşabın yanı sıra; lamine kaplama kereste (LVL), Glulam, yönlendirilmiş yonga levha (OSB) gibi

endüstriyel ahşaplar, karbon elyafı ile güçlendirilmiş polimer, alüminyum ve çelik gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bu kapsamda, literatürden bazı ızgara kabuk sistemlere ait kesit boyutları ve mekanik karakteristikleri, bu çalışmada hesaplanan yükseklik oranları (f/L , f/l) ve Eş. 1'den bulunan eğrilik yarıçapları (R) büyüklüğü açısından sınıflandırılarak Tablo 1 ve Tablo 2 oluşturulmuş ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Malzeme karakteristikleri ile ilgili kısımlar ise Bölüm 3 kapsamında değerlendirilecektir.

Tablo 1 ve 2'de verilen yapıların ilave karakteristik özellikleri aşağıda belirtilmiştir:

- Erken uygulamalardan Deubau'da (No 1), tek katmanlı ızgaraya form verildikten sonra bulon sıkılıp düğüm noktaları rijitleştirilmiş [8]; ızgara, çevresel bir ahşap kirişle betonarme temele mesnetlenmiştir.
- Multihalle Mannheim'da (No 2), latalar 6 m aralıkla parmak geçme ile birleştirilmiş [8], kontrplak kenar kirişlerine, oradan da çelik plaka ve ankraj ile betonarme temele mesnetlenmiştir. Mekanlar arası süreksizlikler kontrplak levhalardan lamine kemerler ile geçilmiştir. Bu yapı, narınlığı ve büyük boyutuna rağmen günümüze kadar ulaşmıştır. Ancak malzeme ömrünün tükenmesi ve günümüz şartnamelerine uygun olmaması nedeniyle etkinliklere kapalıdır [16].
- Downland Müzesi'nde (No 3), tüm elemanları bağlayan metal bir düğüm noktası elemanı üretilmiştir. Meşe; eğilme dayanımı, uzun ömürlülük ve erişim kolaylığı açısından tercih edilmiş, ancak çok budaklı ve eğri yapıda olması nedeniyle parçalı üretilen latalarda kayıplar yaşanmıştır [17]. Eğriliğin fazla olması ve iki katman arasındaki bağlantının rijit olması, kayıpların boyut ve detay kaynaklı diğer nedenleridir.
- Savill Garden'da (No 4), malzeme kaybını önlemek için daha düzgün yapıda olan karaçam tercih edilmiş, kesme blokları iki katmanlı üretilmiş, kenarlar zeminden kopararak dalgalı form ile açıklık ve eleman boyu kısaltılmıştır. Ayrıca, lataların budaklı kısımları kesilerek ortalama 60 cm aralık ile parmak geçme ve 6 m aralık ile eğik bindirmeli (çapraz pahlı) birleşim yapılmıştır [18].
- Trio'da (No 5), gergiler birer lata şeklinde iki katman arasında olup, her düğüm noktası tek bulon yardımıyla bu gergi ve lataları birbirine bağlar [19]. Böylece kaplama tespiti için çıta gerekliliği ortadan kalkmıştır.
- Waitomo Center'da (No 6), şeffaf bir mekân elde edebilmek için kablo gergilere yer verilmiş, ızgara hücreler genişletilmiştir [5]. Monteri Çamı eğilme dayanımı zayıf olduğu için daha büyük kesitli eleman ihtiyacı nedeniyle üç katmanlı LVL kullanılmıştır.
- Toledo 2'de (No 7), latalar birbirine bindirmeli olarak veya düğüm noktalarından bağlantı levhası ile birleştirilmiştir [20]. Modüller

Tablo 1. Büyük boyutlu bazı ızgara kabuklarda detaylandırma, malzeme karakteristikleri ve değerlendirmeler (Detailing, material characteristics and evaluations on some large span grid shells)

	1	2	3	4
Birleşim tipi				
Yapı				
Mesnet tipi	Lamine ahşap kenar kirişi	Kontrplak kenar kiriş ve çelik levha	Kontrplak kenar kirişi	Çelik boru kiriş ve kolonlar
Malzeme ve kesit (mm)	Batı Hemlock çamı (glulam) 60x40	Batı Hemlock çamı 50x50	Meşe 50x35 (D30)	Karaçam 80x50 (C24, C16)
σ_e // (MPa); E // (GPa)	83; 10,40	83; 10,40	97; 10,60	99; 11,80
f/L	0,35	0,41	0,49; 0,63	0,16
$l; f; f/l$	19,7; 6; 0,30	67; 20; 0,30	37; 9,5; 0,25	36; 8,5; 0,23
R	9,02	24,87	9,69; 7,74	45,75
Tercih nedeni	Düzgün lifli, uzun	Düzgün lifli, uzun	Dayanıklı, uzun ömürlü	Ekonomik, kaliteli
Değerlendirmeler	İlk örnek; Tek katmanlı ve gergisiz	En büyük örnek; Kelepeçe+sıkıştırma-çıtalı birleşim	İlk kesme blokları, Karkas bodrum kata mesnetleme	İlk çelik kiriş ve kolon; Zeminden yükseltme

σ_e //: eğilme dayanımı, E //: elastisite modülü, L : açıklık, l : eleman boyu, f : yükseklik, R : eğrilik yarıçapı (Şekil 5)

teknik, yüksek eğilme enerjisi gerektiren, eğilme yeteneği zayıf olan elemanların kullanımına olanak vermiştir.

- Trondheim'da (No 8) ise, hücre bazındaki bindirmeli modülasyon ile her katmandaki doluluk oranı artmış [21]; böylece kesme bloğuna gerek kalmayıp ahşap imalatı kolaylaşmıştır.

Büyük boyutlu yapılarda gelişen çözümler ile m^2 'ye düşen yapım maliyeti artmış, ağırlık ise azalmıştır. İncelemeden de görüldüğü gibi ızgara kabuklar; önceki deneyimlerden alınan dersler ile daha hafif, uzun ömürlü ve dayanıklı sistemlere doğru gelişim göstermiştir.

3. Malzeme Seçimi ve Yöntemi (Material Selection and Method)

Eğilme-etkin strüktürlerde; çatlama ve kırılma oluşmadan eğilebilecek, diğer bir deyişle şekil değiştirme yeteneği yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Aynı fiziksel koşullar altında ağaç odununun eğilme yeteneğinin ölçüsü eğrilik yarıçapıdır; yoğunluk, nem, sıcaklık, budak vb. kusurlar, lif yapısının düzgünlüğü ve uzunluğu gibi fiziksel özellikler ile elastisite modülü, eğilme dayanımı gibi mekanik özelliklere bağlıdır. 1. sınıf kerestede çürük, kovuk, budak, böcek deliği ve imalat kusurları olmamalı; çatlak ve lif burulması ise oldukça sınırlı düzeyde olmalıdır [22]. Eğilme dayanımı ve elastisite modülü genellikle yoğunluk ile doğru orantılı iken [23], sıcaklık ve nem ile ters orantılıdır. Ahşap lata; sıcaklık, buhar ve su yardımıyla yumuşatılıp eğilebilir, sonrasında %12-25 nem aralığında tutulmalıdır [11]. Sistem rijitleştirildikten sonra nem aralığı %25'den büyük ise, dayanım kaybı ve şekil değiştirmelere neden olacağı için ahşaba kurutma işlemi uygulanmalı ve su bazlı akrilik reçineler ile korunmalıdır [24]. Ahşap elemanlar, yanıcı özellikteki vernik yerine, boraks ve borik asit gibi ekonomik, pratik ve sağlıklı su bazlı alev geciktiriciler ile ayrıca korunmalıdır [25, 26]. Uygulama açısından, tedarik ve maliyet de önemli değişkenlerdir. Izgara kabuklarda, yapının bulunduğu bölgenin üretim miktarı yüksek ve düşük maliyetli ağaçları tercih edilir.

3.1. Ağaç Odunu ve Sınıfının Seçimi için Eğilme Esaslı Bir Yaklaşım (An Approach based on Bending Capability for the Selection of Wood Species and Class)

Eğilme dayanımı arttıkça malzemenin eğilme yeteneğinin arttığı bilinmektedir; dolayısıyla artan dayanım ile eğrilik yarıçapı azaltılabilir. Eğrilik yarıçapının belirlenmesinde; deneysel ve tasarımsal olmak üzere iki yaklaşım mevcuttur. Bu iki yaklaşım arasında farklı fiziksel ve mekanik koşullar söz konusudur. Deneysel yaklaşım mobilyanın basınç ve çekme bölgelerinden desteklenen bir makineyle eğilme sonucu plastikleşmesini, tasarımsal yaklaşım ise yapısal ahşabın herhangi bir destek olmaksızın geçici şekil değiştirmesini ele aldığı için birbirinden farklı sonuçlar verir.


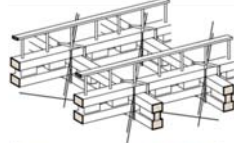
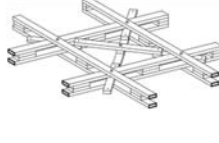
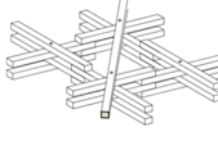








Bu çalışmada, deneysel eğrilik yarıçapı (R_d) verileri için, U.S. Forest Products Laboratory (USFPL)'nin mobilya üretimine yönelik ahşap elemanların (25,4 mm, hava kurusu) eğilme test sonuçlarında [27] bulunan değerler kullanılacaktır. Bu veriler, Türkiye'de yetişen ağaç türlerinin eğilebilme yetenekleri [11] ile birleştirilerek Şekil 6'da sunulmuştur. Grafikte yalnızca akasyanın eğilme yeteneğinin en yüksek, ibrelî ağaçlardan ladinin en düşük olduğu görülmektedir.

Eğrilik yarıçapı (R); uluslararası literatürde [15, 28] elastisite modülü (E), eleman kalınlığı (d) ve eğilme dayanımı (σ_e) cinsinden ifade edilir (Eş. 2); E ile doğru, σ_e ile ters orantılıdır; E , MPa ; σ_e , MPa; R_t ve d mm cinsindedir.

$$R = \frac{E d}{2 \sigma_e} \quad (2)$$

Eş. 2 bağımsız, yükleme süresine bağlı fonksiyon $f(t)$ cinsinden yeniden tanımlanabilir (Eş. 3),

Tablo 2. Küçük boyutlu bazı ızgara kabuklarda detaylandırma, malzeme karakteristikleri ve değerlendirmeler (Detailing, material characteristics and evaluations on some short span grid shells)

	5	6	7	8
Birleşim tipi				
Yapı				
Mesnet tipi				
Malzeme ve Kesit (mm)	Karaçam 50x25	LVL-monteri çamı 160x108	Ladin 40x15 (C32)	Ladin 48x23
$\sigma_{e, }$ (MPa); $E_{ }$ (GPa)		79; 10.06	77; 12.50	77; 12.50
f/L			0,34	0,41
$l; f; f/l$		28;	12,5; 3; 0,24	13,5; 4; 0,30
R			4,73	4,96
Tercih nedeni	Ekonomik, kaliteli	Dayanıklı, uzun ömürlü	Hafif, esnek	Ekonomik, yaygın
Değerlendirmeler	Tek bulon ile sade çözüm; duvara mesnetleme	Hücreyi genişletmek için kablo ve LVL	Modülasyon: Bölümsel ızgara; hafif, kolay yapım	Modülasyon: Hücre hafif, kolay yapım

$\sigma_{e,||}$: Eğilme dayanımı, $E_{||}$: Elastisite modülü, L : açıklık, l : eleman boyu, f : yükseklik, R : eğrilik yarıçapı (Şekil 5)

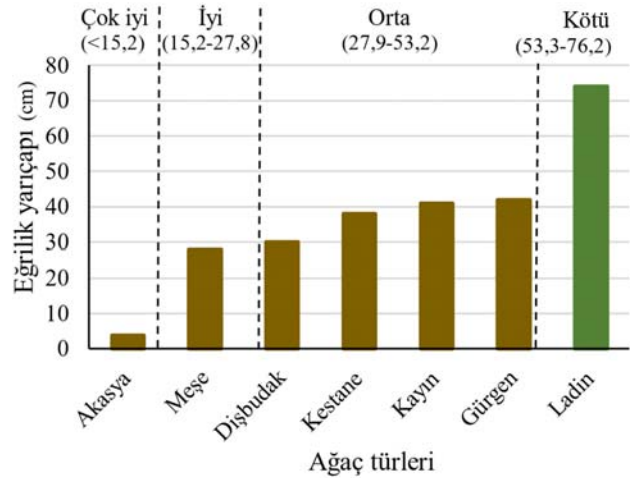
$$R = \frac{E d}{2 \sigma_e} = \frac{f(t) E d \gamma_M}{2 k_{mod} \sigma_e}, \quad f(t) = \frac{1}{1 + k_{def,t}} \quad (3)$$

EN 1995-1'e göre; k_{mod} , k_{def} , γ_M sırası ile modifikasyon parametresi, kullanım sınıfı katsayısı ve malzeme özelliği kısmi parametresidir; ahşap tipi ve kullanım sınıfı seçimine göre belirlenir. Uzun süreli yüklemde ($t=\infty$), masif ahşap ve kullanım sınıfı 1 için k_{mod} ve k_{def} 0,6 dır ($t=0$ için $k_{mod}=1$). γ_M masif ahşap için 1,3 değerini alır. Endüstriyel ahşapta, γ_M değeri 1,2; k_{mod} değeri LVL ve kontrplak için 0,6; OSB-2 için 0,3; k_{def} ise aynı sıralamaya göre 0,6; 0,8 ve 2,25'tir.

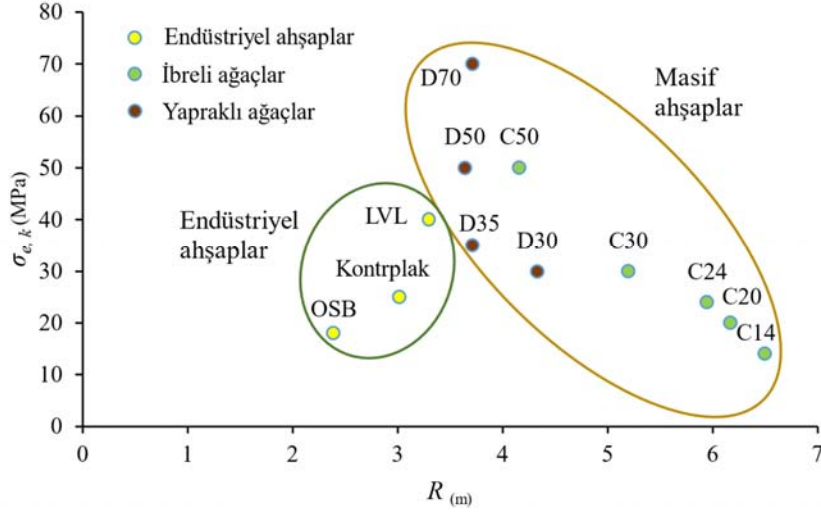
Burada inceleme, ticari ürün sınıflarına ait karakteristik eğilme dayanımları ($\sigma_{e,k}$) ve ağaç odunu test verilerine ait eğilme dayanımları (σ_e) kullanılarak iki farklı şekilde yapılacaktır:

- Karakteristik eğilme dayanımı ($\sigma_{e,k}$) sınıfları açısından; ibrelî ve yapraklı ahşap kalite sınıfları (C ve D grubu), LVL, kontrplak, OSB gibi bazı endüstriyel ahşap türleri eğrilik yarıçapına (R) bağlı olarak Şekil 7'de incelenmiştir. $\sigma_{e,k}$ ve E değerleri; EN 300, EN 338, EN 13986 ve EN 14374 yönetmeliklerindeki örneklerden alınmış, R değerleri ise Eş. 3 üzerinden hesaplanmıştır. Yaygın bilinen ağaç türlerinin karakteristik eğilme dayanımı 20-35 MPa'dır; ancak okaliptüs gibi bazı tropikal bölge ağaçlarının 50 MPa ve üzerinde dayanımına sahip olabildiği bilinmektedir. Yapraklı ağaçlarda D35'in üzerine çıktıkça R düzeyinde büyük değişiklikler olmadığı saptanmıştır. İbrelî ağaçlarda ise eğilme dayanımı azaldıkça eğilme yeteneği zayıflamaktadır. Denk dayanıma sahip yapraklı ağaç odunlarının eğilme yeteneği genellikle ibrelî olanlara göre daha

fazladır. Endüstriyel ahşaplar ile yaygın masif ahşapların ortalama $\sigma_{e,k}$ değerleri birbirine benzerdir. Endüstriyel ahşap ürünlerden OSB'nin E değeri oldukça düşüktür (3,5 GPa) ve ızgara kabuk sistemler için ancak küçük ölçekli tasarımlarda uygundur [14]. Geçmişten bu yana ızgara kabuklarda tercih edilen yapı malzemesi masif ahşap olmuştur.



Şekil 6. 25.4 mm kalınlıklı bazı ağaç odunlarının deneysel eğrilik yarıçapları (R_d) ve eğilme yetenekleri (Radius of curvature and bending capability of some wood species in 25.4 mm thickness)



Şekil 7. 20 mm kalınlıklı yapısal ahşap türlerinin karakteristik eğilme dayanımı-eğrilik yarıçapı karşılaştırması (Comparison of bending strength and design radius of curvature of structural wood species in 20 mm thickness)

- Türkiye’de yapısal ahşabın dayanım sınıfına yönelik akreditasyon, yönetmelik ve literatür henüz tamamlanmamış olmasından dolayı tasarımsal eğrilik yarıçapının (R_t) belirlenmesinde, yapısal ahşap eğilme dayanımı (σ_e) test verileri (EN 384 ve EN 408) yerine ağaç odunu test verileri [ISO 3129 (TS 2470)] kullanılacaktır. Türkiye’de yetişen bazı ağaçlara ait ISO 3129 (TS 2470) yönetmeliğine uygun eğilme dayanımı (σ_e) test verileri esas alınmış; söz konusu veriler Tablo 3’de toplu olarak verilmiştir. Yapısal ahşapta kabul edilebilir emniyet katsayısının 1/3-1/6, mobilyacılıkta ise 1/3 olduğu bilinmektedir [30]. Eğilme etkin yapılarda ebat ve detaylandırma, mobilyacılık ile benzerlik taşıdığı için, emniyetli eğilme dayanımı (σ_{em}) hesabında 1/3 katsayısı kullanılarak ($\sigma_{em} = \sigma_e / 3$), Eş. 3’deki parametrelerin sayısal değerleri ile tasarıma esas eğrilik yarıçapı R_t basitleştirilerek Eş.4’de tanımlanmıştır.

$$R_t = \frac{13,54E}{\sigma_{em}} \quad (4)$$

Burada, USFPL’nin deneysel eğrilik yarıçapları (R_d) ile Eş. 4 denkleminin tasarımsal eğrilik yarıçapları (R_t) karşılaştırılmış (Şekil 8), korelasyon katsayısı (r) çok yüksek olan Eş. 5 elde edilmiş, böylece R_t ile R_d arasındaki ilişki doğrulanmıştır. Bundan sonraki tanımlamalar Eş. 4’deki R_t üzerinden yapılacaktır.

$$R_t = 3,79 R_d + 302,44 \quad (5)$$

($r = 0,97$; $320 \text{ cm} \leq R_t \leq 600 \text{ cm}$)

3.2. Türkiye’deki Bazı Ağaç Oduklarının Malzeme Kriterlerinin Uygunluğu

(Suitability of Material Criteria of Some Turkey Wood Species)

Türkiye’de yetişen, ızgara kabuk yapımına uygun ağaç odunlarının dayanım, eğilebilme, miktar ve maliyet gibi temel karakteristikleri aşağıda belirtilmiştir. Söz konusu ağaç odunlarının eğilme-etkin strüktürlerde gerekli temel malzeme karakteristikleri literatürden derlenerek Tablo 3’e eklenmiştir.

- Ladin çok hafif ve esnek olması itibarıyla eğme işleminde düşük enerji gerektirir; eğilme dayanımının düşük olması nedeniyle eğilme yeteneği zayıftır.

- Karaçam yüksek eğilme dayanımına sahiptir, orman alanı ve kereste üretimi ise önemli bir yer kaplamaktadır; bu nedenle ekonomik ve ekolojiktir.
- Meşe, gürgen ve kayın mekanik özellikleri, orman alanı ve kereste üretimi ile yapraklı ağaçlar arasında verimli seçeneklerdir. Ancak ağaç gövdelerinin kısa, dallarının fazla olmasından dolayı, büyük parçaların üretiminde ibrelili ağaçlara göre dezavantajlıdır. Ağır olmaları, detaylandırma ve iş gücünü zorlaştırır. Bu nedenle ağaç gövdeleri lif veya yonga levha gibi endüstriyel ahşapların üretiminde daha yaygın kullanılır.
- Yalancı akasyanın mekanik özellikleri, eğilme yeteneği ve çevre şartlarına dayanımı çok iyi düzeydedir. Akçaağaç da yüksek eğilme dayanımı ve yeteneğine sahiptir; ancak orman alanı ve üretim imkanına dair kayıtları oldukça azdır. Benzer özelliklere sahip dişbudak ise, orman alanı az olsa da meşe ve kayın alternatif sert ağaçlardandır. Ayrıca, oldukça sıkı bünyesi nedeni ile eğilme dayanımı yüksektir.
- Kestane ve ıhlamur yapraklı ağaçlardan olmasına karşın ibrelili ağaçlar kadar hafiftir. ıhlamur yüksek eğilme dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesine sahiptir; kestane ise düşük eğilme dayanımına rağmen çevre şartlarına dayanıklı, hafif ve esnekler.
- Kızılcıam ve köknar orman alanı, tedarik ve maliyet bakımından uygun olsa da eğilme ve çekme dayanımı bakımından zayıftır. Ceviz, yüksek eğilme dayanımına rağmen meyve vermesi ve orman alanının az olmasına bağlı yüksek maliyetlidir [30, 31]. Bu nedenlerle söz konusu ağaç odunları Tablo 3’de değerlendirmeye alınmamıştır.

4. Karşılaştırma ve Değerlendirmeler

(Comparison and Evaluations)

Tablo 1 ve 2’de incelenen yapılarda uygulanmış eğrilik yarıçapları (R), yapısal ahşapların karakteristik dayanım-larına ($\sigma_{e,k}$) karşı gelen (Şekil 7) ve ağaç odunları için, bu çalışmada geliştirilen Eş. 3 ve 4’den bulunan tasarımsal eğrilik yarıçapları (R_t) ile Şekil 9’da karşılaştırılmıştır. Deneysel bir yapı olan Deubau (1) ve Downland (3)’de uygulanan eğrilik yarıçapı, R_t değerine çok yakındır. Mannheim’da (2), R değerinin R_t ’den daha büyük olması, yapı büyüdükçe mekânsal olarak genişliğin yüksekliğe oranındaki azalma ve eğrilik yarıçapındaki geometrik artıştan kaynaklanmaktadır. Savill’de (4), ızgara kabuk yükseltilmiş çelik konstrüksiyon üzerine oturtulduğu için R oldukça yüksektir. Diğer iki yapıda (7 ve 8), boyut

Tablo 3. Türkiye'deki bazı ağaç odunlarının eğilme-etkin yapı malzeme kriterlerine göre özellikleri
(Properties of some woods in Turkey according to bending-active building material criteria)

Ağaç cinsi	Mekanik özellikler ¹		Fiziksel özellikler ²		Eğilebilme (cm)			
	$\sigma_{e//}$ (MPa)	$\sigma_{em//}$ (MPa)	$E_{//}$ (GPa)	ρ (gr/cm ³)	Dayanım sınıf ve yıl	Karakteristik özellikler	R_d (25,4mm)	R_t (20 mm)
Karaçam (Yenice)	119,9 (90-98)*	39,7	7,06 (11,80-13,80)*	0,59 (hafif)	4 (5-10)			240
Karaçam (Dursunbey)	96,00 (90-98)	32,0	7,06 (11,80-13,80)*	0,56 (hafif)	4 (5-10)			298
Sarıçam	100,0 (80-100)	33,3	12,00 (10,20-12,00)	0,53 (hafif)	3 (10-15) 4 (5-10)	Çok budaklı		488
Ladin	51,6-78,0 (63-77)	17,2-26	10,32-11,00 (9,70-12,50)	0,43-0,47 (\approx Çok hafif)	4 (5-10)	Doğrusal, uzun	74	607
Ihlamur	106,0 (85)	35,3	7,40 (11,71)	0,53 (hafif)	5 (\leq 5)	İşlenmesi kolay		283
Akasya	136,0 (88-97)	45,3	11,27 (10,60-13,00)	0,76 (ağır)	1 (\geq 25)	Gövdesi kısa	3,8	336
Kestane	77,0 (67-71)	25,6	9,00 (7,15-8,61)	0,54 (hafif)	2 (15-25)	İşlenmesi kolay	38	476
Dişbudak	106,0-120,0 (103-120)	35,3-40,0	9,59-13,40 (12,31-13,40)	0,68-0,69 (hafif)	5 (\leq 5)	Düz, işlenmesi zor	30	453
Akçaağaç	137,0 (98)	45,6	9,40 (9,92)	0,66 (hafif)	5 (\leq 5)	Budaksız, işlenmesi kolay		279
Gürgen	135,0 (110)	45,0	16,20 (12,10)	0,83 (ağır)	5 (\leq 5)	İşlenmesi zor	42	487
Kayın	112,3 (110-123)	37,4	13,08 (14,31-16,00)	0,66 (hafif)	5 (\leq 5)		41	473
Meşe	88,0-125,0 (88-97)	29,3-41,6	10,78- 11,7 (10,60-13,00)	0,69-0,73 (hafif)	2 (15-25)	Düzgün değil	28	367

¹Mekanik özellikler [32] (Akyüz, 1997; As vd., 2001; Berkel ve Göker, 1974; Bozkurt vd., 1993; Göker, 1982; Güler ve Bektaş, 2000; Gündüz, 1999 kaynaklarından) en iyi kalite bölge örneklerinden derlenmiştir.

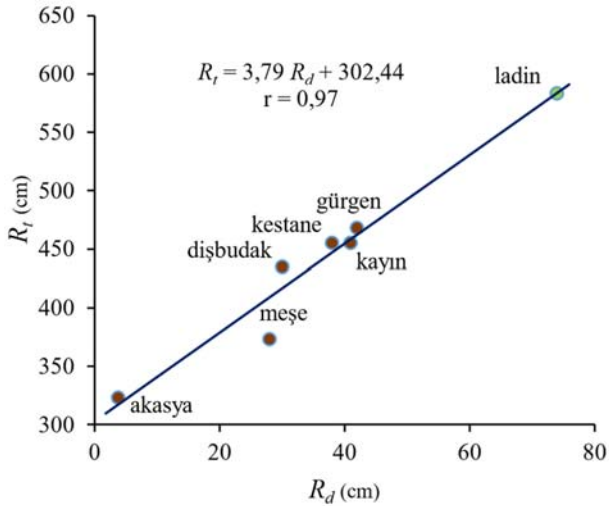
²Sertlik yumuşaklık sınıfı [33] (EN 1995-1-1), dayanım sınıfı ve yılı TSE EN 350-2, yoğunluk [30, 34] kaynaklarından alınmıştır.

³ R_t değerleri Eş. 4' den hesaplanmıştır, R_d değerleri USFPL'nin deneysel verileridir [11].

*Aynı ağacın Avrupa'daki örneğinin değeri. European Wood [35] ve Wood-database'den [36] derlenmiştir.

$\sigma_{e//}$: Liflere paralel eğilme dayanımı, $E_{//}$: Liflere paralel elastisite modülü, ρ : yoğunluk, R_d : Deneysel eğrilik yarıçapı, R_t : Tasarımsal eğrilik yarıçapı

ve biçimlenmeye bağlı olarak R azalmıştır. Küçük ve deneysel yapılarda önceliklerden tecrübeye; kesitlerin inceltildiği, modüler ve çok katmanlı üretim yapıldığı, ayrıca seçilen ağacın kusursuz olmasıyla en yüksek eğilme dayanımı ve en küçük eğrilik yarıçapına ulaşılmıştır.



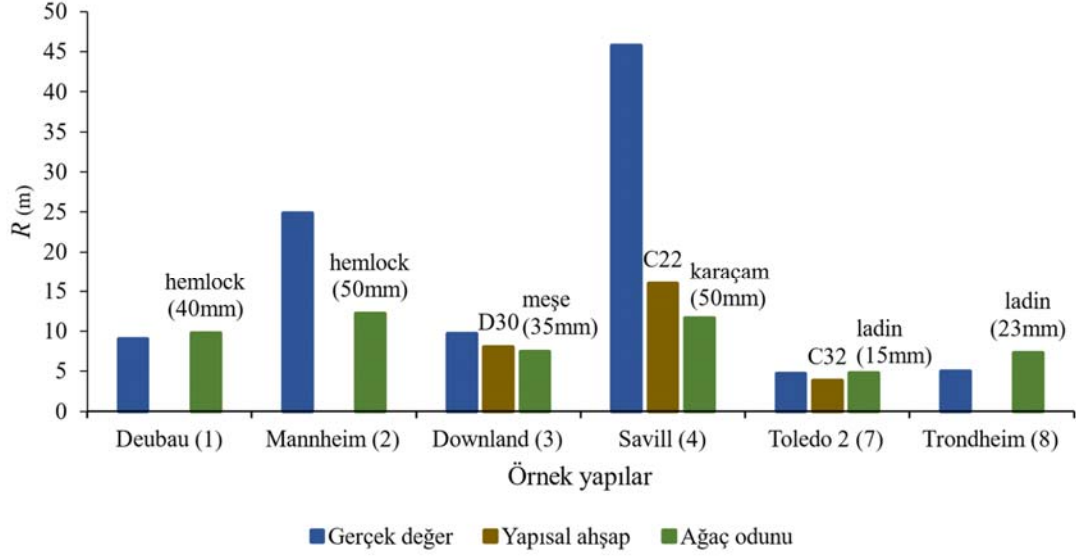
Şekil 8. 25,4 mm kalınlıklı bazı ağaç odunlarının deneysel (R_d) ve tasarımsal (R_t) eğrilik yarıçapının karşılaştırması
(Comparison of experimental and design radius of curvature in some woods with 25,4 mm thickness)

Türkiye'de yetişen ağaç türlerinin karakteristik özellikleri, Avrupa ve incelenen yapılardaki örnekleri ile benzer olsa da tedarik, maliyet ve

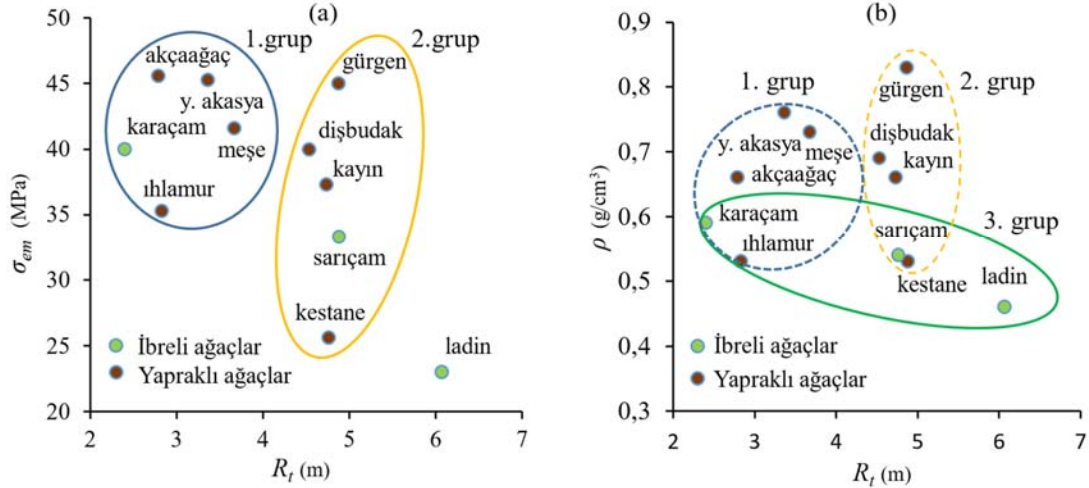
genellikle mekanik dayanım kalitesi ile öne çıkmaktadır. İbrelî ağaçlardan karaçam (Yenice), eğilme dayanımı bakımından Avrupa Karaçamı ve Savill Garden yapısında kullanılan örneğe göre daha niteliklidir. Öte yandan Avrupa Ladinî, Türkiye (Doğu) Ladinine göre daha dayanıklıdır. Kanada menşelidir. Monteri ve Batı Hemlock çamı, uzun boyu ve düzgün lifli yapısı ile ızgara kabuk yapımına uygunken, Türkiye'de ormanı yoktur. Meşe (Çoruh ve Sapsız), Downland Müzesinde görülen İngiltere Meşesi ve Avrupa Meşesine göre eğilme dayanımı bakımından daha nitelikli, elastisite modülü bakımından ise daha zayıftır. Türkiye'deki kayın, gürgen ve kestane de benzer üstünlükler görülür (Tablo 3).

Türkiye'de yetişen ağaç odunları için hesaplanan (Eş. 4) tasarımsal eğrilik yarıçaplarının (R_t), emniyetli eğilme dayanımı (σ_{em}) ve yoğunluk (ρ) ile ilişkisi Şekil 10'da incelenmiştir. Eğrilik yarıçapı açısından karaçam (Yenice), akçaağaç, ihlamur, yalancı akasya ve meşe (1. grup) yüksek; ladin ve kestane ise düşük performansıyla öne çıkar. Grafikteki 2. grup, eğilme dayanımı ve yoğunluk açısından aynı hiyerarşiye sahiptir. 2. grup ve yakın yoğunluklu 3. grubun kesişiminde yer alan sarıçam ve kestane, düşük yoğunluğa karşın, eğrilik yarıçapının düşük olması nedeni ile avantajlıdır. 3. grupta sert ağaçlardan ihlamur, hafiflik ve eğilme yeteneği bakımından; yumuşak ağaçlardan karaçam hafiflik, eğilme dayanımı ve yeteneği açısından en verimli seçenektir.

Söz konusu ağaç odunları için yapılan diğer bir inceleme Şekil 11 ve 12'de yer almaktadır. σ_{em} / E ve E / ρ ile R_t arasında korelasyon katsayısı yüksek doğrusal bir ilişki dikkat çekmektedir. Tasarımsal eğrilik yarıçapı (R_t); elastisite modülü ile doğru, emniyetli eğilme dayanımı ile ters orantılıdır. σ_{em} / E ve E / ρ ile R_t arasında korelasyon katsayısı çok yüksek doğrusal bir ilişki mevcuttur. Buna göre yumuşak ağaçlardan ladin ve sarıçam, sert ağaçlardan ise kestane



Şekil 9. İncelenen yapılardaki taşıyıcı elemanların eğrilik yarıçapı ile kullanılan ağaç odunu ve yapısal ahşaba yönelik eğrilik yarıçaplarının karşılaştırılması
(Comparison of the radius of curvature of the laths in the case studies and the radius of curvature of tree species and timber used)



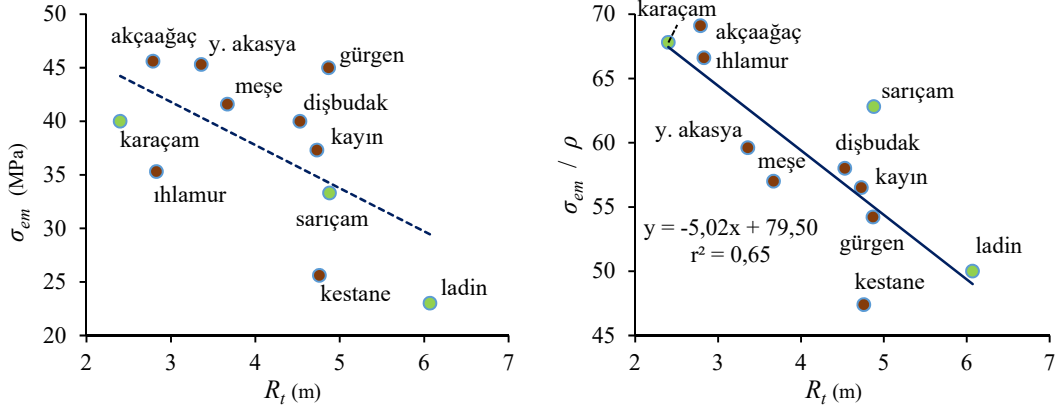
Şekil 10. Türkiye'deki 20 mm kalınlıklı bazı ağaç odunlarında tasarımsal eğrilik yarıçapının (R_r) emniyetli eğilme dayanımı ve yoğunluk ile karşılaştırılması
(Comparison of radius of curvature with allowable bending strength and density of some woods in Turkey in 20mm thickness)

genel olarak düşük performanslıdır; ancak hafif olmaları bakımından avantajlıdır. Sarıçam yoğunluğuna oranla yüksek eğilme dayanımına sahip olması nedeniyle, doğrusal bağıntının üst tarafında kalmaktadır. Karaçam (Yenice) en yüksek σ_{em} / E ve en düşük R_r değeri ile ayrıcalıklı bir yere sahiptir. Sert ağaçlardan akçaağaç, ihlamur, yalancı akasya ve meşe; yüksek σ_{em} , σ_{em} / E ve düşük R_r bakımından yüksek performansa sahiptir; kestane ise düşük eğilme dayanımı nedeniyle doğrunun alt tarafında yer almaktadır. Yüksek σ_{em} , düşük E değerine sahip akçaağaç ve ihlamur ise, düşük yoğunluğuyla avantaj sağlamaktadır. Şekil 11 ve 12'ye göre; yumuşak ağaçlardan karaçam, sert ağaçlardan ise akçaağaç ve ihlamur, bu bakımdan en verimli örneklerdir.

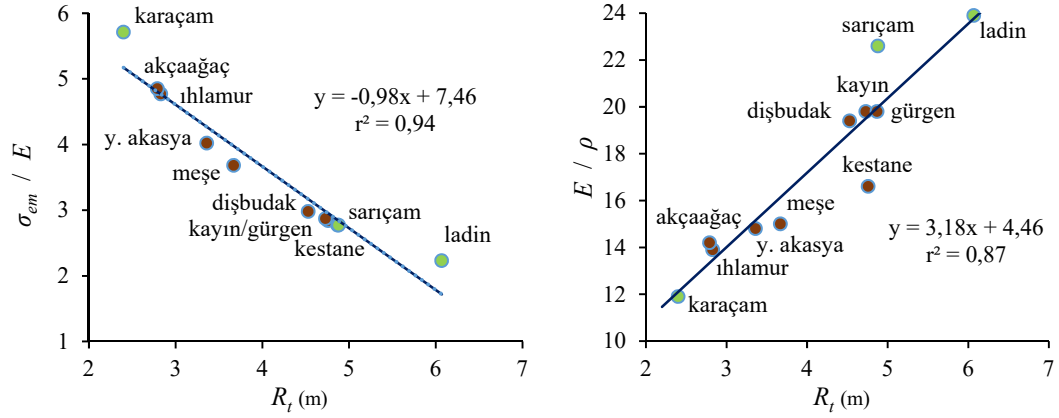
Söz konusu ağaç türleri Şekil 13'de maliyet ve üretim miktarı açısından da incelenmiştir. Meşe ve Yenice Karaçamı'na (Bakraz bölgesi) göre düşük eğilme dayanımına sahip Dursunbey Karaçamı

dışarıda tutulursa, R_r ile maliyet arasında doğru orantı görülmektedir. Üretim miktarı ile maliyet arasında ise belirgin bir bağıntı yoktur. Kayın ve gürgen benzer eğilme dayanımı ve daha düşük üretim miktarına sahip olmasına karşın, karaçam ve meşeden daha düşük maliyetlidir. Ladin düşük eğilme dayanımı ile düşük maliyetli; meşe ise çevre şartlarına daha dayanıklı olması nedeniyle yüksek maliyetlidir. Yüksek maliyet; orman alanı ve üretilen ağaç gövdesine oranla kereste üretim miktarının çok düşük olmasına da bağlıdır. Orman Genel Müdürlüğü'nün (OGM) [31] verilerinin analizine göre, meşenin lif-yonga odunu olarak kullanım hacmi, endüstriyel odun kullanımının %77'sidir. Yapısal ahşaba dönüştürülen tomruk ise, %12'lik bir dilime sahiptir. Bu oranlar, çam türlerinde sırasıyla %34 ve %38, kayında ise %45 ve %37'dir.

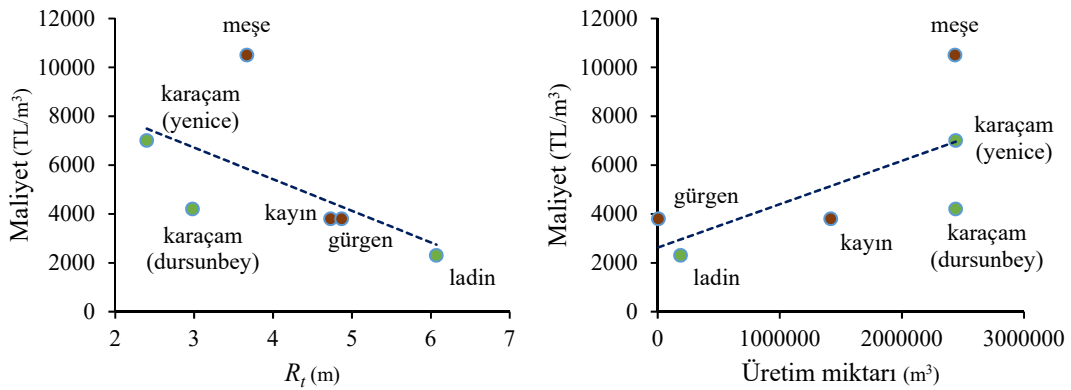
Ayrıca bazı ağaç odunlarının eğilme-etkin strüktürlerde kullanım yeri ve önemine yönelik değerlendirmeleri içerecek şekilde bir tablo



Şekil 11. Türkiye’deki bazı ağaç odunlarının emniyetli eğilme dayanımı ve emniyetli eğilme dayanımı/yoğunluk oranlarının tasarımsal eğrilik yarıçapı ile karşılaştırılması
(Comparison of allowable bending strength and allowable bending strength/density with design radius of curvature of some woods in Turkey)



Şekil 12. Türkiye’deki bazı ağaç odunlarının eğrilik yarıçapının emniyetli eğilme dayanımı/elasticite modülü ve emniyetli eğilme dayanımı/yoğunluk oranı ile karşılaştırılması
(Comparison of radius of curvature of some woods in Turkey according to allowable bending strength/modulus of elasticity and allowable bending strength/density ratio)



Şekil 13. Türkiye’deki bazı ağaçların 1. sınıf kereste maliyeti ile eğrilik yarıçapı ve üretim miktarının karşılaştırılması (Comparison of radius of curvature with production amount and cost of some 1.class woods in Turkey)

hazırlanmıştır (Tablo 4). Önem kriterinde belirtilen 1. derece ahşaplar; genellikle Avrupa’daki örnek yapılarda yer alan benzerlerine göre daha nitelikli olup Türkiye’deki orman ve üretim miktarı en üst düzeylerde olan ekolojik ve verimli seçeneklerdir. 2. derece olanlar;

orman alanı nispeten az ve OGM’nin üretim yapmadığı ancak tedarik edilebilen ahşaplardır. 3. derece olanların, oldukça uygun şartlara sahip olmasına karşılık, orman alanı yoktur ve üretimi nadirdir; bu nedenle ekolojik ve verimli değildir. Değerlendirmede, çok budaklı

veya yüksek eğrilik yarıçapına sahip ağaçlar parçalı, modüler, çok katmanlı ya da destekli yapılar için; çevre şartlarına dayanımı düşük olan ağaçlar ise geçici veya deneysel yapılar için uygun bulunmuştur. Yüksek eğme enerjisi gerektiren yüksek yoğunluklu ağaçlar ve çevre şartlarına yüksek dayanımı ile bilinen meşe ile kestane, büyük yapılar için önerilmiştir.

Tablo 4. Türkiye'deki bazı ağaç odunlarının eğilme-etkin strüktürlerde kullanımına yönelik değerlendirme (Suggestions for the use of some woods in Turkey in bending-active structure)

Ağaç cinsi	Önem	Kullanım yeri
Karaçam	1	Çeşitli boyutlarda yapılar
Meşe	1	Parçalı/modüler; büyük yapılar
Kayın/ Gürgen	1	Büyük ve geçici yapılar
Dişbudak	2	Büyük ve geçici yapılar
Ihlamur	2	Geçici ve/veya deneysel yapılar
Kestane	2	Çok katmanlı; deneysel ve büyük yapılar
Ladin	2	Az eğrilikte, çok katmanlı, destekli yapılar
Sarıçam	2	Parçalı/ modüler yapılar
Akasya	3	Parçalı/ modüler yapılar
Akçaağaç	3	Tek parça elemanlı büyük ve geçici yapılar

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Eğilme-etkin strüktürler hafif, etkin, sürdürülebilir, esnek ve uyarlanabilirliği itibarıyla son yıllarda önem kazanmıştır. Masif ahşap, ilkel olandan günümüz yapılarına kadar bu alanda en sık kullanılan malzeme olmuştur. Ahşap seçiminde eğrilik yarıçapı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, yoğunluk, dayanım sınıfı ve maliyet temel ölçütlerdir. Yüksek eğilme yeteneği (düşük eğrilik yarıçapı), boyutlandırma açısından ince kesit ve birden fazla katmana; mekanik özellikler açısından yüksek eğilme dayanımı ve düşük elastisite modülüne; fiziksel özellikler açısından düzgün liflere, az sayıda budağa ve düşük yoğunluğa bağlıdır.

Bu çalışmada incelenen konulardan aşağıdaki sonuç ve önerilere ulaşılmıştır:

- Büyük ölçekli örnek yapılarda, eğrilik yarıçapı (R) 9,02 m ile 45,75 m arasındadır. Küçük ve deneysel yapılarda ise büyük ölçüde azaltılarak (4,7-5 m) tasarım eğrilik yarıçapı (R_t) sınırları zorlanmıştır. Bu durum; modüler ve çok katmanlı üretimin, eğrilik imkânlarını genişlettiğine işaret etmektedir.
- Türkiye'de yetişen, literatürde mevcut ağaç türlerine ait σ_e ve E değerlerinden hareketle R_t değerleri Eş. 4 bağıntısından elde edilmiş ve R_d değerleri (USFPL) ile doğruluğu kontrol edilmiştir (Şekil 8, $r=0,97$).
- Malzeme kesiti ve eleman birleşimlerinde, açıklığın artışına bağlı olarak ilave katmanlaşma veya destek elemanı görülmemektedir. Küçük yapılarda standart eleman ve basit çözümler mevcut iken, büyük boyutlu yapılarda düğüm noktası ve mesnete yönelik özel detaylar üretilmiştir.
- Hafiflik ve eğilebilirlik açısından, yumuşak ağaçlardan karaçam, sert ağaçlardan akçaağaç ve ihlamur en nitelikli örneklerdir; ancak akçaağaç ve ihlamurun kereste üretim miktarı oldukça düşüktür.
- Genellikle eğrilik yarıçapı düştükçe maliyet yükselmektedir. Nitelikli özelliklerine karşılık meşenin maliyeti benzer eğrilik yarıçapı için beklenenin yaklaşık iki kat daha yüksektir.
- Yerli ağaç türlerinden karaçam, meşe ve kayının eğilme yeteneği, düşük elastisite modülü ve yüksek eğilme dayanımı ile Avrupa'daki örneklerine göre daha yüksektir. Avrupa Ladini ise Türkiye'deki örneğine göre daha niteliklidir.

- İncelenen parametreler ve Tablo 4'e göre; yumuşak ağaçlardan karaçam, sert ağaçlardan ise kayın ve meşe ülkemizdeki en verimli ağaçlar olarak önerilir. Ancak meşenin maliyeti kullanımını zorlaştıran bir faktördür.
- Kestane, ladin ve sarıçam eğilme dayanımlarının zayıf olması nedeniyle düşük eğrilikli, ilave katmanlı veya modüler üretim için uygundur.
- Izgara kabuk tasarımında, örnek yapılardan hareketle, yükseklik/eleman boyu oranı 0,23-0,30 (f/l) ve yükseklik/açıklık oranı (f/L) 0,33-0,41 olarak önerilir.

Kaynaklar (References)

1. Engel H., Structure Systems, Hatje Cantz, Ostfildern, Germany, 2013.
2. Lienhard J., Knippers J., Considerations on the Scaling of Bending-Active Structures, International Journal of Space Structures, 3-4 (28), 137-147, 2013.
3. Lienhard J., Bending-Active Structures: Form-Finding Strategies Using Elastic Deformation in Static and Kinematic Systems and the Structural Potentials Therein, Doktora Tezi, University of Stuttgart, Institute of Building Structures, Stuttgart, 2014.
4. Naicu D., Harris R., Williams C., Timber Gridshells: Design Methods and Their Application to a Temporary Pavilion, World Conference on Timber Engineering, Kanada-Quebec, 10-14 Ağustos, 2014.
5. Chilton J., Tang G., Timber Gridshells: Architecture, Structure and Craft, Routledge, New York, ABD, 2017.
6. Molina J. C., Neto C.C., Diego da Fe A., Freitas U. M., Morais P. H., Silva Matos G., Gridshell em Madeira: Aspectos Teóricos e Construtivos, Ambiente Construído, Porto Alegre, 1 (20), 277-29, 2020.
7. Pedreschi R., Form, Force and Structure: A Brief History, Architectural Design, 78 (2), 12-19, 2008.
8. Liddell I., Frei Otto and the development of gridshells, Case Studies in Structural Engineering, Case Studies in Structural Engineering, 4, 39-49, 2015.
9. Koç S., Gür N. V., Mimaride Etkin Strüktürler Olarak Ahşap Izgara Kabuklar, Mimarlık ve Yaşam Dergisi, 6 (2), 349-369, 2021.
10. Lara-Bocanegra A. J., Majano-Majano A., Arriaga F., Guaita M., Long-Term Bending Stress Relaxation in Timber Laths for the Structural Design of Lattice Shells, Construction and Building Materials, 193, 565-575, 2018.
11. As N., Büyüksarı Ü., Masif Ağaç Malzemenin Bükülmesi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 60 (1), 29-37, 2010.
12. Koç S., Ahşap ızgara kabuk strüktürlerin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
13. Sigmasenmo. Difference Between ETFE Membrane and PTFE Membrane. <http://sigmasenmo.com/en/article/2491.html>. Erişim tarihi Ekim 15, 2022.
14. Collins M., O'Regan B., Cosgrove T., Potential of Irish Orientated Strand Board in Bending Active Structures, International Journal of Civil, Construction and Architectural Engineering, 9 (3), 305-312, 2015.
15. Collins M., Cosgrove T., Mellad A., Characterisation of OSB Properties for Application in Gridshells, Materials and Structures, 50 (131), 2017.
16. Cofa Architects. Multihalle Transformation. <https://cofoarchitects.com/work/multihalle-transformation>. Erişim tarihi Mart 11, 2022.
17. Harris R., Romer J., Kelly O., Johnson S., Design and construction of the Downland Gridshell, Building Research and Information, 31 (6), 427-454, 2003.
18. Harris R., Roynon J., The Savill Garden Gridshell Design and Construction, The Structural Engineer, 86 (17), 27-34, 2008.
19. D'Amico B., Design and Building of a Post-formed Timber Grid-shell (Master Thesis). Researchgate. <https://www.researchgate.net/publication/235921729>. Yayın tarihi Temmuz, 2010. Erişim tarihi Mart 3, 2022.
20. D'Amico B., Kermani A., Zhang H., Pugnale A., Colabella S., Pone S., Timber gridshells: Numerical simulation, design and construction of a full scale structure, Structures, 3, 227-235, 2015.
21. Dyvik S. H., Mork J. H., Nilsen M., Luczkowski M. Modular Kinematic Timber Gridshell; a Simple Scheme for Constructing Advanced Shapes, Proceedings of the IASS Annual Symposium,

- “Spatial Structures in the 21st Century” K. Kawaguchi, M. Ohsaki, T. Takeuchi (ed.), Japonya, Tokyo, 26–30 Eylül, 2016.
22. Malkoçoğlu A., Çakmak A., Mobilya ve Doğrama Endüstrisinde Kereste Kalite Standartları Seçimi, Mobilya Dekorasyon Dergisi, 134, 36-48, 2016.
 23. Bal B. C., Bektaş İ., Odunun Yoğunluğu ile Mekanik Özellikleri Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi, 1 (2), 51-61, 2018.
 24. Baysal E., Peker H., Çolak M., Tarimer İ., Verniklenmiş Ağaç Malzemenin Yanma Özellikleri ve Borlu Bileşiklerle Ön Emphyre İşleminin Yanmayı Geciktirici Etkisi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15 (4), 645-653, 2003.
 25. Sivrikaya H., Saraçbaşı A., Bor Madeninin Ahşap Koruma Endüstrisinde Değerlendirilmesi, II. Uluslararası Bor Sempozyumu, Türkiye, Eskişehir, 23-25 Eylül, 2004.
 26. Yangın Güvenlik. Alev Geciktiriciler. http://www.yanginguvenlik.com.tr/yayin/0/alev-geciktiriciler-gecmisi-ve-etkileri_6786.html. Yayın tarihi Ekim 2, 2014. Erişim tarihi Mart 11, 2022.
 27. Stevens W. C., Turner N., Wood Bending Handbook, Woodcraft Supply, Parkersburg, USA, 1970.
 28. Lara-Bocanegra A. J., Majano-Majano A., Arriaga F., Guaita M., Eucalyptus Globulus Finger Jointed Solid Timber and Glued Laminated Timber with Superior Mechanical Properties: Characterisation and Application in Strained Gridshells, Construction and Building Materials, 265 (4), 2020.
 29. Efe H. ve Çağatay K., Çeşitli Masif Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Politeknik Dergisi, 14 (1), 55-61, 2011.
 30. Çetin F. ve Gündüz G., Türkiye’deki Bazı Ağaç Türü Odunlarının Fiziksel Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmaların Değerlendirilmesi, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 18 (2), 175-193, 2016.
 31. OGM. Resmi İstatistikler. <https://www.ogm.gov.tr/tr/ormanlarimiz/resmi-istatistikler>. Erişim tarihi Mart 11, 2022.
 32. Çetin F., Gündüz G., Türkiye’deki Bazı Ağaç Türü Odunlarının Mekanik Özellikleri Üzerine Yapılan Araştırmaların Değerlendirilmesi, Bartın Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, 19 (1), 161-181, 2017.
 33. Üstündağ C. Ahşap Yapıların Tasarımı Bölüm 1-1: Genel kurallar ve bina kuralları. İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi Ahşap Yapıların Tasarımı (Eurocode 5) Tanıtım Semineri. <https://docplayer.biz.tr/2419078-Ts-en-1995-1-1-ahsap-yapilarin-tasarimi-bolum-1-1-genel-kurallar-ve-bina-kurallari.html>. Yayın tarihi Ekim 22, 2014. Erişim tarihi Mart 11, 2022.
 34. Çalışkan Ö., Meriç E., Yüncüler M., Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünü, Bugünü ve Yarını, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 6 (1), 109-118, 2019.
 35. European Wood. Selected European Wood Species. <https://jp.europeanwood.org/en/living-with-wood/selected-european-wood-species/index.html>. Erişim tarihi 11 Mart, 2022
 36. Wood-database, Wood filter. https://www.wood-database.com/wood-filter/?fwp_location=europe&fwp_name=H. Erişim tarihi 11 Mart, 2022.

