

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MİMARLIK ANABİLİM DALI

**AHŞAP KARŞILIKLI ÇERÇEVE STRÜKTÜRLERDE BAĞLANTI NOKTALARI ÜZERİNE BİR
İNCELEME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynep GÜLER

**TEMMUZ 2023
TRABZON**





KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK ANABİLİM DALI

**AHŞAP KARŞILIKLI ÇERÇEVE STRÜKTÜRLERDE BAĞLANTI NOKTALARI
ÜZERİNE BİR İNCELEME**

Zeynep GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"YÜKSEK MİMAR"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 05 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 06 / 07 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nihan ENGİN

Trabzon 2023



ÖNSÖZ

“Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerde Bağlantı Noktaları Üzerine Bir İnceleme” adlı yüksek lisans tez çalışması, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilgisi Bilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Yüksek lisans eğitim süreci boyunca sabırla her konuda beni destekleyen, bilgi ve tecrübeleriyle sürekli yanımda olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nihan ENGİN’e içtenlikle teşekkür ederim. Jüri üyesi hocalarıma görüş ve değerlendirmeleri için teşekkür ederim. Lisans ve yüksek lisans eğitimi boyunca öğrencisi olmaktan mutluluk ve onur duyduğum Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü hocalarıma bilgi birikim ve tecrübelerini paylaştıkları için teşekkür ederim. Bu süreçte yanımda olan Bursa Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümü hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Eğitim öğretim hayatım boyunca hep en iyi yerlere gelmemi teşvik eden maddi manevi her zaman ve her anlamda yanımda olan, uzak mesafelere rağmen benimle bu zorluğu paylaşan aileme var oldukları için teşekkür ederim. Sevgisi ve şefkatiyle hep benimle olan canım annem Şükran GÜLER’e, her zaman arkamda olan ve benden önce beni düşünen canım babam Taner GÜLER’e, eğitim hayatımda başarısıyla hep örnek aldığım ve beni yalnız bırakmayan canım ablam Gamze GÜLER’e her şey için çok teşekkür ederim. Her daim yanımda olan ve bu yolu birlikte yürüdüğümüz sevgili arkadaşlarım Elif BARBAROS, Fatma Berfin ABANOZ, Hüda KOÇAL, Meryem ARACI, Rana KİBAROĞLU KANTARCI ve değerli ailelerine içtenlikle teşekkür ederim.

Zeynep GÜLER

Trabzon 2023



TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerde Bağlantı Noktaları Üzerine Bir İnceleme” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Nihan ENGİN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/07/2023

Zeynep GÜLER



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.3. Çalışmanın Yöntemi.....	3
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	4
2.1. Ahşap Yapım Sistemleri	4
2.2. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürler	8
2.2.1. Tarihsel Gelişim	12
2.2.2. Geometrik Parametreler	15
2.2.3. Form Bulma Yöntemleri	19
2.2.4. Yapım ve Üretim	25
2.2.5. Sürdürülebilirlik	29
2.3. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerde Izgara Düzeni.....	29
2.4. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerin Bağlantı Detayları.....	33
2.4.1. Üst Üste Koyma	35



2.4.2.	Bağlama Kolu Kullanımı	36
2.4.3.	Dübel ve Plaka Kullanımı	38
2.4.4.	Çentik Kullanımı	42
2.5.	Analiz Çalışmaları	44
2.5.1.	Örneklerin Tespit Edilmesi	44
2.5.2.	Örneklere Ait Analiz Tablolarının Oluşturulması	45
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER	69
3.1.	Örneklere Ait Genel Bilgiler ile İlgili Bulgular ve İrdelemeler	69
3.2.	Strüktür Izgara Düzenleri ile İlgili Bulgular ve İrdelemeler	70
3.3.	Strüktür Bağlantı Detay Türleri ile İlgili Bulgular ve İrdelemeler	72
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
4.1.	Örneklere Ait Genel Bilgiler ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler	76
4.2.	Strüktür Izgara Düzenleri ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler	76
4.3.	Strüktür Bağlantı Detay Türleri ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler	77
4.4.	Genel Sonuçlar ve Öneriler	78
5.	KAYNAKLAR	80
6.	EKLER	85

ÖZGEÇMİŞ



ÖZET

AHŞAP KARŞILIKLI ÇERÇEVE STRÜKTÜRLERDE BAĞLANTI NOKTALARI ÜZERİNE
BİR İNCELEME

Zeynep GÜLER

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mimarlık Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Nihan ENGİN
2023, 84 Sayfa, 2 Sayfa Ek

Karşılıklı çerçeve strüktürler süreksiz kısa kirişlerin bir araya gelmesiyle oluşan, kolon-kiriş gibi ögeler arasında birincil/ikincil yük taşıma ayrımının bulunmadığı sistemler olarak ifade edilebilir. Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin incelendiği bu çalışmada konu, bağlantı detayları üzerinden ele alınmıştır. Amaç; karşılıklı çerçeve strüktürlerin diğer yapım sistemlerinden ayırt edici özelliklerini belirlemek, ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerdeki elemanların bağlantı detaylarını incelemek ve bu detayları etkileyen parametreleri ortaya koyarak tartışmak, bu strüktürler ile oluşturulmuş pavyon yapı örneklerindeki düğüm noktası çözümlerini analiz etmek ve karşılaştırmak, Türkçe literatürde rehber olabilecek bir çalışma ortaya koymaktır.

Kapsamlı tarama araştırmasının yapıldığı literatür kısmında ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerle ilgili bilgiler aktarılmıştır. Analiz çalışmasında dergi, kitap, makale, bildiri, tez, internet vb. yazılı ve görsel kaynaklardan taranarak elde edilen 2012-2019 yılları arasında inşa edilmiş 7 pavyon yapı örneği ele alınmıştır. Örnekler yapıya ait genel bilgiler, ızgara düzeni ve bağlantı noktası ile bu başlıklara ait konu kapsamındaki çeşitli alt başlıklardan oluşturulan tablo üzerinden analiz edilip değerlendirilmiştir.

Çalışmanın sonucunda; detay çözümlerinde ana etkenlerden birinin ızgara düzenindeki modül eleman türü ve biçimi olduğu, bağlantı uzunluğu, tabaka sayısı, örtü elemanı gibi diğer verilerin ise eleman türünün biçiminden etkilenen ikincil veriler olduğu düşünülmektedir. Bağlantı detayının üretimi, rijitlik, montaj ve demontaj, yeniden kullanım, estetik görünüm gibi çeşitli özelliklerinin sağladığı avantaj ve dezavantajların strüktürün oluşumunda önemli bir yeri olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Taşıyıcı sistemler, Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürler, Pavyon yapı



Master Thesis

SUMMARY

AN INVESTIGATION ON CONNECTION POINTS IN TIMBER RECIPROCAL FRAME STRUCTURES

Zeynep GÜLER

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Architectural Graduate Program
Supervisor: Prof. Nihan ENGİN
2023, 84 Pages, 2 Pages Appendix

Reciprocal frame structures can be defined as systems consisting of discontinuous short beams, where there is no primary/secondary load-carrying distinction between elements such as columns and beams. In this study, where timber reciprocal frame structures are examined, the subject is handled through connection details. The aim is to determine the distinguishing features of reciprocal frame structures from other construction systems, to examine the connection details of the elements in timber reciprocal frame structures and to discuss the parameters affecting these details, to analyze and compare the nodal point solutions in pavilion structures built with these structures, and to put forward a study that can be a guide in the Turkish literature.

In the literature section where a comprehensive review research was conducted, information about timber reciprocal frame structures was provided. In the analysis study, 7 examples of pavilions built between 2012-2019, which were obtained by scanning from written and visual sources such as magazines, books, articles, papers, theses, internet, etc., were analyzed. The examples were analyzed and evaluated through the general information of the building, grid layout and connection point, and the table created from various subheadings within the scope of these titles.

As a result of the study; it is thought that one of the main factors in detail solutions is the type and form of module element in the grid layout, while other data such as engagement length, number of layers, cover element are secondary data affected by the form of element type. It has been seen that the advantages and disadvantages provided by various features such as production, rigidity, assembly and disassembly, reuse, aesthetic appearance of the connection detail have an important place in the formation of the structure.

Key Words: Structural systems, Timber reciprocal frame structures, Pavilions



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Sepet işi strüktür örneği, Pompidou Centre (URL-2).....	9
Şekil 2. Üç elemanlı basit bir karşılıklı çerçeve strüktür ünitesi (Gustafsson, 2016).....	16
Şekil 3. Karşılıklı çerçeve strüktür ünitenin geometrik parametreleri.....	17
Şekil 4. Sol; referans çokgen geometri, sağ; optimize edilmiş karşılıklı çerçeve strüktür (Mesnil, vd., 2018a)	21
Şekil 5. Robotik üretim ile gerçekleştirilen karşılıklı çerçeve ahşap blok eleman, BUGA Ahşap Pavyonu (URL-4)	26
Şekil 6. Çift katmanlı ahşap ızgara kabuğun plan ve kesiti (Harris, vd., 2003 akt; Naicu, 2012)	32
Şekil 7. Üst üste koyma bağlantı detayı (Gustafsson, 2016).....	35
Şekil 8. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde üst üste koyma detay örneği; Life Sciences Laboratuvarı, Torikabuto (Larsen, 2008)	36
Şekil 9. Ahşap karşılıklı çerçeve kirişlerin ip ile bağlanması (Gustafsson, 2016)	37
Şekil 10. Sol; kelepçe türü bağlantı kolu kullanımı (Gustafsson, 2016), sağ; ahşap kirişlerde kiriş askı kullanımı (URL-5).....	38
Şekil 11. Ahşap dübel bağlantı detayı (Swedish Wood, 2020).....	40
Şekil 12. Yapıştırılmış çubuk kesiti (Feldt ve Thelin, 2018)	41
Şekil 13. Karşılıklı çerçeve strüktür yapıda vida bağlantısı; KREOD Pavyonu (URL-7) ..	42
Şekil 14. Sol; yarım bindirmeli bağlantı, sağ; kamalı gömme-zıvana bağlantı (Swedish Wood, 2020).....	43
Şekil 15. Çentik bağlantısının örneği; SC Pavyonu (Thönnissen, 2014).	44



TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Ahşap taşıyıcı sistemler	6
Tablo 2. Ahşap katlanmış plak ve ızgara kabuk strüktür örnekleri	7
Tablo 3. Dokuma strüktürlerin sınıflandırması (Baverel ve Larsen, 2011).....	10
Tablo 4. Farklı malzemelerle yapılan karşılıklı çerçeve strüktür örnekleri	11
Tablo 5. Karşılıklı çerçeve strüktür eski kullanım örnekleri	13
Tablo 6. Karşılıklı çerçeve strüktürlerin tarihsel gelişimi	14
Tablo 7. Eksantriklik değerleri ve kirişlerin eğrilik durumu (Baverel, 2000)	17
Tablo 8. Farklı karşılıklı çerçeve strüktür ünite düzenleri	19
Tablo 9. Karşılıklı çerçeve strüktür geometrik tasarım yöntemleri (Godthelp, 2019)	20
Tablo 10. Öteleme yöntemi ile karşılıklı çerçeve strüktür örüntüsü oluşturma süreci	22
Tablo 11. Geometrik parametrelerin değişkenliğine göre farklı karşılıklı çerçeve strüktür örüntüler	23
Tablo 12. Örnek olarak ele alınan karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapı ve yapım-üretim süreci	26
Tablo 13. Karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapı yapım aşamaları	27
Tablo 14. Modül elemanların türleri (Gustafsson, 2016)	31
Tablo 15. Gustafsson'ın (2016) sınıflandırdığı bağlantı türleri	34
Tablo 16. Dübel tipi bağlayıcı elemanlar (Swedish Wood, 2022).	38
Tablo 17. KREOD Pavyonu (Popovic Larsen, 2014; URL-7, 8, 9, 10, 11)	46



Tablo 18. Mekândan Taşanlar (URL-12, 13, 14, 15).....	51
Tablo 19. Plaka Pavyonu (Miodragovic Vella, 2019; Miodragovic ve Kotnik, 2017; URL-16, 17)	54
Tablo 20. Kabarcık Pavyonu (URL-18, 19, 20, 21)	57
Tablo 21. Ejderha Derisi Pavyonu (URL-22, 23, 24, 25).....	61
Tablo 22. R2 Pavyonu (Douthé, vd., 2018; Mesnil, vd., 2018a; Mesnil, vd., 2018b).....	63
Tablo 23. Gelecek Ağacı (URL-26, 27).....	66
Tablo 24. Örneklere ait genel bilgiler ile ilgili bulgular	70
Tablo 25. Strüktür ızgara düzenleri ile ilgili bulgular	71
Tablo 26. Strüktür bağlantı detay türleri ile ilgili bulgular.....	73
Ek Tablo 1. Örneklem grubunun karşılaştırması	85



KISALTMALAR VE SEMBOLLER DİZİNİ

CAD	: Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım
CLT	: Cross-Laminated Timber – Çapraz Lamine Ahşap
CNC	: Computer Numerical Control – Sayısal Kontrol
PVC	: Polyvinyl Chloride – Polivinil Klorür
RF	: Reciprocal Frame
TR	: Türkiye
°C	: derece santigrat
cm	: santimetre
kg	: kilogram
kg/m ²	: yüzey yoğunluğu – kilogram/metrekare
m:	: metre
m ²	: metrekare
mm:	: milimetre



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İnsanoğlu var olduğu günden bugüne yapı yapma eğiliminde olmuştur. Temel ihtiyaçları için barınma yapıları, psikolojik ihtiyaçları için kültürel ve sosyal yapılar gibi farklı işlevlerde yapılar yapmıştır ve halen de yapmaya devam etmektedir. Bu yapım süreci insanlığın erken dönemlerinde ilkel çözümler barındırmış, zaman ilerledikçe de birden fazla etkenin bu sürece dâhil olduğu çözümler görülmüştür. İşlev, kullanıcı durumu ve estetik değerlerin yanı sıra yapım sürecinde karşılaşılan etkenler coğrafyanın jeolojik özellikleri, iklimsel verileri, erişilebilen/yerel malzemelerin özellikleri gibi verilerdir. Çünkü bu veriler doğrultusunda taşıyıcı sistem seçimi yapılmakla beraber yapıya ait alt detayların çözümleri şekillenmektedir.

Yapıdaki taşıyıcı bileşenler, malzeme ve detay çözümler birlikte bir kurgu oluştururlar. Bu kurgu, taşıyıcı sistem kurgusu olarak da ifade edilebilmektedir. Tarih boyunca farklı biçim ve özellikte taşıyıcı sistem kurguları görülmüştür. “Reciprocal frame” strüktürler de bunlardan bir tanesidir. Literatürde “reciprocal frame structure” ifadesini Karakoç (2017) “mütekabil elemanlar”, Başoğlu (2021) “geçmeli strüktür”, Kılıç ve Orhon (2019) ve Özen (2022) ise “karşılıklı/kilit çerçeve” şeklinde ifade etmiştir. Bu tez çalışmasında “reciprocal frame” ifadesi “karşılıklı çerçeve” şeklinde ifade edilmektedir.

Karşılıklı çerçeve strüktürler taşıyıcı özellikteki yapı bileşenlerinin karşılıklı şekilde birbirini destekleme ve yük aktarımı yapma prensibine dayanır. Bu sisteme dair örneklerle yüzyıllar öncesinden günümüze kadar pek çok şekilde rastlanılmaktadır. Beton, çelik gibi malzemelerle oluşturulan yapı örnekleri mevcut olmasına karşın yaygın kullanımı ahşap elemanlar üzerindedir.



1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Yapıyı oluşturan elemanların birbirleri ile ilişkileri, bağlanma şekilleri, taşıyıcılık ve üretim özellikleri bir mimarın tasarım yaparken bilmesi gereken en temel özelliklerdir. Diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırıldığında kullanımı daha eskiye dayanan ahşap malzeme sayısız katkısına karşın günümüz modern yapılarında özellikle ülkemizde çok tercih edilmemektedir. Bu durumla ilişkili olarak ahşap yapı üretiminin artması ve ahşap yapım sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla tez çalışmasında ahşap yapım sistemlerinden biri olan ahşap karşılıklı çerçeve strüktürler (reciprocal frame) üst başlık olarak ele alınmıştır.

Karşılıklı çerçeve strüktür yapıları anlamak ve üretebilmek için sistemi oluşturan parametreler ve değişkenler üzerinde incelemeler yapılan bu çalışmanın amaçları;

- Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin diğer yapım sistemlerinden ayırt edici özelliklerinin ortaya konması,
- Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerdeki elemanların bağlantı detaylarının incelenmesi ve bu detayları etkileyen parametrelerin ortaya konarak tartışılması,
- Ahşap karşılıklı çerçeve strüktür ile oluşturulmuş pavyon yapı örneklerinde düğüm noktası çözümlerini analiz etmek ve karşılaştırmak,
- Türkçe literatürde rehber olacak bir çalışma ortaya koymak,

şeklindedir.

Çalışma kapsamında karşılıklı çerçeve strüktürler bağlantı noktası üzerinden ele alınmıştır. Ahşap karşılıklı çerçeve strüktür özelinde etkin yapı örneklerinin az olması, kullanımının çoğunlukla geçici yapılarda görülmesi nedeniyle örneklem grubu pavyon yapılar olarak seçilmiştir. 2012-2019 yılları arasında inşa edilen 7 adet pavyon yapı örneği dergi, kitap, makale, tez, internet vb. kaynaklardan taranarak elde edilmiştir. Örnekler, yapıya ait genel bilgiler, ızgara düzeni ve bağlantı noktası ile bu başlıklara ait konu kapsamındaki çeşitli alt başlıklardan oluşturulan tablo üzerinden analiz edilip değerlendirilmiştir.



1.3. Çalışmanın Yöntemi

Çalışma, literatür taraması ile elde edilen bilgilerin analiz edilip değerlendirilmesine dayanmaktadır. Konu ile ilgili kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Lisansüstü tezler, makale, bildiri, kitap, e-kitap, dergi, internet kaynakları gibi pek çok yerli ve yabancı kaynaktan yararlanılmıştır. Çalışmanın birinci bölümünde giriş, amaç ve kapsam, yöntem bölümleri yer almaktadır. İkinci bölümde ahşap strüktürler içerisinde karşılıklı çerçeve strüktürlerin sınıflandırmasına yönelik literatür çalışması yer almaktadır. Devamında literatürdeki çeşitli kaynaklardan yararlanarak karşılıklı çerçeve strüktürler hakkında bilgiler verilmiştir.

Analiz bölümünde 7 örnek yapı analiz tabloları yardımı ile analiz edilmiştir. Analiz tablosunda üç ana başlık ele alınmıştır. Ana başlıklar modül eleman sayısı ve türü, modül tabaka sayısı, ızgara formu, düğüm detayı, örtü kullanımı ve detayı, strüktür-çevre ilişkisi şeklinde alt başlıklara sahiptir ve örnekler bu alt başlıklarda değerlendirilmiştir. Örnek seçimi karşılıklı çerçeve strüktürlerin tanımı üzerinden değerlendirilerek yapılmıştır. Tez kapsamında karşılıklı çerçeve strüktürlerin Song, vd.’nin (2013) “Üniteler 3 ya da daha fazla elemandan oluşmaktadır”, Baverel ve Larsen’in (2011) “süreksiz elemanlar” ve Larsen’in (2008) “karşılıklı çerçeve, esas olarak çatı yapısı olarak kullanılan üç boyutlu bir ızgara yapısıdır” tanımlarından yola çıkılarak örnek yapı seçimleri yapılmıştır.

Çalışmanın bulgular ve irdelemeler kısmında verilen analiz tablolarındaki elde edilen veriler sunulmuş ve irdelenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde elde edilen bulgu ve irdelemelerin sonuçları verilmiştir.



2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Ahşap Yapım Sistemleri

Hasol'a (2014) göre taşıyıcı ögelerin oluşturduğu bütüne taşıyıcı sistem denilmektedir. Taşıyıcı sistemler yapıya etki eden sabit ve hareketli yüklere karşı dayanım göstermesi beklenen kurgulardır. Yapıyı oluşturan elemanlardan taşıyıcılık özelliğine sahip olanlar bu kurgunun bir parçası olmaktadır. Taşıyıcı yapı elemanları kullanılan malzeme ve diğer elemanlarla oluşan birleşimine göre çeşitlenmektedir. Çağlar boyunca insanoğlu doğada var olan ve kullanabileceği malzemeler ile yapı üretiminde bulunmuştur. Taş, ahşap, çamur, lifli bitkiler, kum gibi malzemelerin örneklerini erken dönemlerde görmek mümkündür. Doğal malzemelerin fiziksel olanakları yapı tasarımı ile ilgili sınırlamalar meydana getirmektedir. İlkel zamanlarda doğal malzemelerle yapı üretiminde basit açıklıklar görülürken 20. yüzyılda çelik malzemenin keşfiyle geniş açıklıklı yapı örnekleri de artmaya başlamıştır. Yapı açıklıklarının artmasıyla orta ve geniş açıklık geçen strüktürler ortaya çıkmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle üretim ve montaj yöntemleri gelişmiş, yerinde üretimin yanı sıra fabrikada üretim ve ileri teknoloji ürünü robotik üretimler günümüzde var olmuştur. Böylece anlaşılmaktadır ki teknolojinin gelişmesi ve yeni yapı malzemelerinin keşfi, üretim yöntemlerinin gelişimi, malzemelerin açıklık geçme potansiyelinin artması yapı ölçeğinde, tasarımında ve çeşitliliğinde farklı imkânlar sunabilmiştir.

Taşıyıcı sistem kurgusu yapı malzemesinden ve olanaklarından doğrudan etkilenmektedir. Bu durum ahşabın da tarihi süreç boyunca strüktürel kullanımını etkilemiş ve bu doğrultuda gelişmeler yaşanmıştır. Örneğin masif ahşap kullanımında fiziksel boyutlar sınırlamalar getirir de yapısal ahşap elemanların üretilmesi bu sınırları ortadan kaldırmış ve farklı geometrilere sahip strüktür kurguları ortaya çıkabilmiştir. Ahşabın mimaride strüktürel kullanımı geçmişten günümüze incelendiğinde farklı ana başlıklarda sınıflandırmalar elde etmek mümkündür.



Strüktür sınıflandırmaları malzeme, geometrik biçim, yük aktarımı, geleneksel ve çağdaş sistemler, üretim ve montaj durumu, açıklık geçme gibi pek çok başlıkta ele alınabilir. Türkçü'ye (2017) göre her sınıflandırma türünde olumlu ve olumsuz özellikler bulunmaktadır. Bunun nedeni çok sayıda var olan taşıyıcı sistem türlerinin gruplanırken biçim, kuvvet ve yük aktarımı gibi özelliklerin çoğu kez birbirleriyle çakışmasıdır (Türkçü, 2017).

Geleneksel yapı ürünlerinden ahşabın strüktürel olarak kullanımı eskiye dayanır. Geçmişte çoğunlukla “taşıyıcı olarak yığma ya da iskelet halinde bir taş duvarın ya da temelin üstüne oturtularak kullanılmıştır” (Hasol, 2014). 20. yüzyıl itibarıyla de “lamine ahşap yapı elemanları kolon, düz veya eğri kiriş gibi temel biçimlerde üretilip birbirleriyle birleştirilerek kemer, kafes, kiriş/makas, 2 veya 3 mafsallı çerçeve ve kemerlere, düzlem ve eğri yüzeyli uzay kafes sistemlere dönüştürülmektedir” (Türkçü, 2017). Bu kapsamda farklı türde ahşap yapı sistemlerinden bahsetmek mümkündür. Bu sistemler yığma yapılar, kolon kiriş sistemler, kemerler, makaslar, tonozlar, kubbeler, ızgara kabuklar, katlanmış plaklar ve dokuma yapılar şeklinde sıralanabilir (tablo 1 ve 2).

Yığma yapılar geleneksel yapı sistemlerinden biri olup ahşap elemanlar yatay düzlemde üst üste bindirilerek taşıyıcı duvarlar oluşturulur. Kapı ve pencere boşluklarında ise kenarlara dikey elemanlar getirilmektedir. Köşelerde ise tomruklar birbirine geçmeli olarak bağlanır. Böylece duvarlar mekanları ayırıcı göreviyle birlikte yük taşıyan strüktürel öge haline gelirler. Bu sisteme aynı zamanda çantı da denilmektedir.

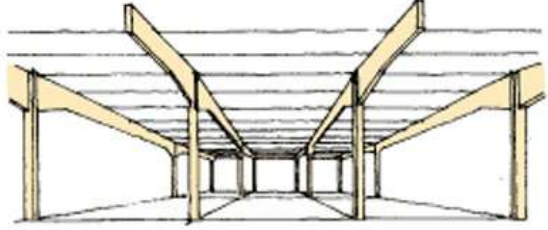
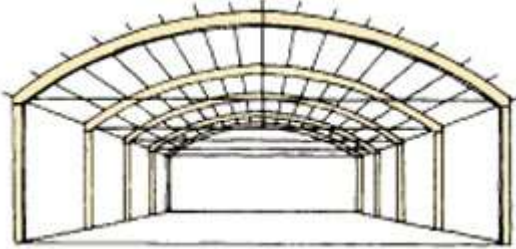
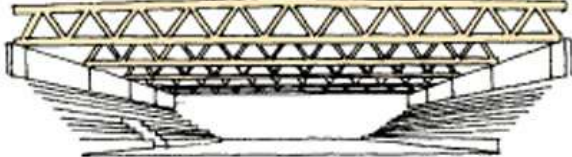
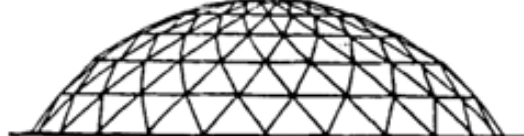
Kolon-kiriş sistemlerde dikme ve kiriş elemanlar belirli aks aralıklarında konumlandırılarak bir kurgu oluşturulur. Döşeme ise kirişlerin üzerine oturtulmaktadır (Erkoç, 2004). Ahşap düzlem ve uzay kafes sistemler ise geniş açıklıklı yapılarda tercih edilmektedir. Makas olarak da ifade edilen kafes kirişler doğrusal çubuklar üçgen şekilli geometrilerde mafsallı noktalarında birleştirilerek ortaya çıkmaktadır (Türkçü, 2017).

Ahşap kemerler tek eğrilikli, basınca çalışan ve farklı derinliklerde üretilen ahşap elemanlardır (Demirbaş, 2019). Kemer yüksekliği azaldıkça yatay itme kuvveti artacağı için basık kemerlerin uçlardan dengelenmesi gerekir. Yani geçilen açıklık ve kemer yüksekliği statik açıdan önem sahibidir. Ahşap düzlem ve uzay kafes sistemler ise geniş açıklıklı yapılarda tercih edilmektedir. Makas olarak da ifade edilen kafes kirişler doğrusal çubuklar



üçgen şekilli geometrilerde mafsal noktalarında birleştirilerek ortaya çıkmaktadır (Türkçü, 2017).

Tablo 1. Ahşap taşıyıcı sistemler

Kolon-Kiriş Sistemler	 (Carling, vd., 2001)
Kemerler	 (Carling, vd., 2001)
Makaslar (Kafes Kirişler)	 (Carling, vd., 2001)
Kubbeler	 (Lan, 1999)

En eski strüktürel formlardan biri olan kubbeler sürekli yüzey olarak inşa edilirken 20. yüzyılda yeni bir görünüm kazanmış ve ayırık yüzeyli kubbeler ortaya çıkmıştır. Bu tip kubbelere çerçeve ve kaburga kubbeler, schwedler kubbeleri, lamel kubbeler, radyal



kubbeler örnek olarak verilebilir (Türkçü, 2017). Ahşap kubbeler yapı ağırlığını azaltarak malzeme tüketiminde ekonomi sağladığı için tercih edilebilmektedir (Demirbaş, 2019). Tonozların temel geometrisi silindir yüzey olmalarıdır. Tek eğrilik nedeniyle basit geometrileri kolay çözülür fakat statik dirençleri çift eğrilikli yüzeylere göre daha azdır. Kubbe ve ızgara kabuklar çift tabakalı yapılabılırken tonozlar yaklaşık 20 metre açıklıktan sonra iki tabakalı yapılmalıdır (Türkçü, 2017). Tonozlara silindirik kabuk da denilmektedir. Sistemin ahşap ile üretilmesinde en büyük adım 1906'da lamella sistemin Alman mimar Zollinger tarafından geliştirmesi olmuştur (Makowski, 2006 akt; Demirbaş, 2019).

Tablo 2. Ahşap katlanmış plak ve ızgara kabuk strüktür örnekleri

	
Ahşap katlanmış plak strüktür prototipi (Stitic ve Weinand, 2015)	Ahşap ızgara kabuk strüktür, Portalen Pavyon Yapısı (URL-1)

“Izgara kabuklar, kabukların yapısal ilkelerini takip eden ve uygulanan yüklere kendi şekilleri ile doğal olarak direnç gösteren bir çeşit uzaysal yapıdır” (Vardar Öz, 2012 akt; Koç, 2020). Bir taşıyıcı örtünün kabuk olarak nitelendirilmesi için kalınlığının geçtiği açıklığa göre az olması gerekir (Hasol, 2014). Strüktürel bir öge olan yapı kabukları için eğrilik, sertlik/rijitlik ve incelik şeklinde üç özellikten bahsedilir. Kabuk strüktürler eğri bir yüzeye sahiptirler ve bu eğrilik tek ya da çift şekilde olabilir (Türkçü, 2017). “Alman mimar Frei Otto (1925-2015), modern ahşap ızgara kabukların temsilcisi sayılmaktadır” (Koç ve Gür, 2021). Ahşap ızgara kabuk sistemler ızgara elemanlar, destek elemanları ve örtü elemanları olmak üzere üç ana elemandan oluşur. Taşıyıcılık özellikleri, ızgara elemanların tabaka sayısı, ızgara düzeni ve kabuk formlarına göre sınıflandırmak mümkündür.

Katlanmış plaklar düzlem yüzeyel taşıyıcı elemanların yani plakların eğik bir açı altında birleşerek oluşturdukları, enkesiti “V veya Λ ” şeklinde olan hacimsel taşıyıcı



sistemlerdir. Biçimsel olarak akordeona benzeyen katlanmış plaklar kağıdın katlanarak strüktürel direnç kazanması prensibine dayanmaktadır. Katlanmış plakların geometrik açılımı prizmatik, piramidal, üçgensel ve çerçeve/tonoz biçimli olabilir. Prizmatik katlanmış plakların yüzeyleri dikdörtgen biçiminde olup en yaygın türüdür. Katlanmış plak etkisini azaltmayan en uygun katlanma açıları alt sınır 20-25 derece ve üst sınır 40-45 derece şeklindedir. (Türkçü, 2017).

Dokuma ahşap yapılar tekstilde kullanılan bağlama, birbirine geçme, örülerek yüzey oluşturma prensibine dayanır. İnsanoğlu var olduğu zamandan beri tekstil malzemelerini barınak, sığınak ve çadır gibi ilkel barınma yapılarında örtücü bir eleman olarak kullanmıştır. Mimaride dokuma tekniğinin kullanımı “ilkel kulübe yapımında duvarların çamur ve yapraklarla kaplı, destekleyici bir yapı oluşturmak için çeşitli boyutlarda ahşap parçalar, dallar ve bitkilerin iç içe geçmesiyle oluştuğu tarif edilmektedir” (Gillow ve Sentance, 2005 akt; Kayaoğlu, 2019). İlkel yapılardan bu yana halen mimaride dokuma tekniği hem strüktürel olarak hem de yüzeysel ögelerde kullanılmaktadır. Afrika’da kulübelerin bambudan dokunarak yapıldığı gibi geniş ölçekli örnekler de mevcuttur (Dethier, vd., 2000 akt; Weinand ve Hudert, 2010). Gerçek anlamda tekstil strüktürler yapıları 1950’lerde görülmeye başlanmıştır. Öncü olarak kabul edilen Frei Otto tarafından yürütülen projeler bu strüktürün ilk örneklerindendir.

Bahsedilen ahşap yapım sistemleri kendi içerisinde çeşitlenebilmektedir. Tez kapsamında incelenen karşılıklı çerçeveler (reciprocal frame) de bu yapım sistemleri içinde dokuma yapılar içinde değerlendirilmektedir.

2.2. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürler

Karşılıklı çerçeve strüktürler birbirini karşılıklı olarak destekleyen bir sistemi ifade eder. Almanca literatürde “hebelstabwerke” olarak ifade edilen sistem kaldıraç mekanizmalarına benzemektedir. İngilizce’de ise “reciprocal frame structure” olarak ifade edilir. İngilizce terimin kökenine bakıldığında “geri” anlamına gelen “recus” ve “ileri” anlamına gelen “procus” ifadelerinden oluşan Latince “reciprocus” kelimesinden



türemiştir. “Reciprocus” “yarar için değış tokuş etme” anlamına gelen karşılıklığı ifade eder (Pugnale, vd., 2011). Türkçe çeviri olarak “karşılıklı çerçeve” anlamına gelen karşılıklı çerçeve yapılar “nexorade” olarak da adlandırılmaktadır. Latin kökenli bir kelime olan “nexor” ifadesi İngilizce’de “link” yani “bağılantı” anlamına gelmektedir (Baverel, 2000). Nexorade “assembly of nexors” yani “kirişlerden oluşan bütünü” ifade eder (Baverel ve Nooshin, 2007). Böylece anlaşılmaktadır ki karşılıklı çerçeve strüktürler yük aktarımını karşılıklı ve bağlantılı şekilde birbirine aktaran üç boyutlu taşıyıcı sistemi ifade eder.

Karşılıklı çerçeve strüktürleri Baverel ve Larsen (2011) dokuma strüktürlerin 4 başlığından biri olarak ele almıştır (tablo 3). Bu başlıklar örgü, dokuma kumaşlar, sepet işi ve karşılıklı çerçeve (reciprocal frame) strüktürler şeklindedir. Örgü türünde elemanlar sürekli ve bitişindeki elemanlara bağlıdırlar. Dokuma kumaşlarda sürekli elemanlar diğer elemanlar arasından geçirilir ve saten, düz, fitilli gibi örnekleri vardır. Sepet işinde sürekli ve süreksiz elemanlar birbirlerine örölür ve bükölme direnci ilk iki türe göre daha iyidir (Baverel ve Larsen, 2011). Pompidou Centre sepet işinin bina ölçeğindeki etkili örneğidir (şekil 1).



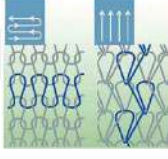
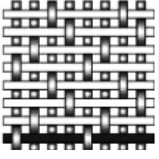
Şekil 1. Sepet işi strüktür örneğı, Pompidou Centre (URL-2)

Karşılıklı çerçeve strüktürlerde ise süreksiz elemanlar karşılıklı destek olacak şekilde yerleştirilir. Bu strüktürlerin çoğunluğu herhangi bir sabitleme olmadan sadece sürtünme ile ayakta durabilmektedirler. (Baverel ve Larsen, 2011). Tekstil tekniklerinin bina ölçeğine



uyarlanmasında çivi, vida, cıvata gibi ek bağlantı elemanları olmadan uygulanabilir olmaları pek olası olmayacağı düşünülmektedir (Weinand ve Hudert, 2010). İlk üç türde sürekli elemanlar kullanılırken karşılıklı çerçeve strüktürlerde süreksiz elemanların kullanılması aralarındaki farkı ortaya koymaktadır.

Tablo 3. Dokuma strüktürlerin sınıflandırması (Baverel ve Larsen, 2011)

Dokuma Strüktürler				
Tip	1. Örgü	2. Dokuma Kumaşlar	3. Sepet Örgüsü	4. Karşılıklı çerçeve (Reciprocal/Nexorades) Strüktürler
Özellik	Bitişigindeki elemanlara bağlanan sürekli elemanlar	Diğer elemanlara geçirilen sürekli elemanlar	Sürekli ve süreksiz elemanlar	Süreksiz elemanlar
Örnek				
Elemanların Bükülme Sertliği	Çok Düşük	Çok Düşük	Orta	Orta-Büyük Arası

Bir strüktür sisteminin karşılıklı çerçeve strüktür olabilmesi için üç özellik taşıması gerekir (Pugnale, vd., 2011);

- Zorunlu etkileşimin oluşması için en az iki eleman olmalıdır.
- Her eleman diğerini desteklemeli ve diğeri tarafından da desteklenmelidir.
- Desteklenen her elemanın desteklendiği elemanla açıklık boyunca buluşmalı ve asla köşelerde buluşmamalıdır.

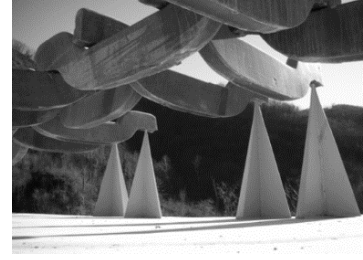
Bunların dışında en önemli noktalardan biri de karşılıklı çerçeve strüktürleri oluşturan elemanlar strüktürün tamamına oranla daha kısa ve süreksiz elemanlardır (Baverel ve



Larsen, 2011). Karakoç'un (2017) ifadesiyle bu sistem "kısa kiriş örgüleriyle geniş açıklıklar geçme" prensibine sahiptir.

Karşılıklı çerçeve strüktürler yekpare yüzey yerine ızgaralardan oluşmaktadır. Birincil ya da ikincil yük taşıyan kolon, kiriş gibi kavramların olmadığı bu taşıyıcı sistemde elemanlar tek başlarına taşıyabileceklerinden daha uzun bir mesafeyi birlikte geçebilirler (Ruan, vd., 2022). Düzlemsel olarak kurgulanabileceği gibi eğri yüzeyli olarak da tasarlanabilirler. Izgara biçiminde bir taşıyıcı sistem olan karşılıklı çerçeve strüktürlerin çoğunlukla ahşap elemanlarla oluşturulmuş örnekleri mevcuttur. Bunun yanı sıra cam, betonarme, çelik, plastik gibi malzemelerin de kullanıldığı örnekler bulunmaktadır (tablo 4).

Tablo 4. Farklı malzemelerle yapılan karşılıklı çerçeve strüktür örnekleri

Plastik karşılıklı çerçeve strüktür örneği; Coca-Cola Pavyonu (URL-3)	
Betonarme karşılıklı çerçeve strüktür örneği (Garavaglia, vd., 2013)	
Ahşap karşılıklı çerçeve strüktür örneği; Bunraku Puppet Tiyatrosu (Larsen, 2008)	
Alüminyum karşılıklı çerçeve strüktür örneği; arkeolojik alan örtüsü (Gelez, Aubry ve Vaudeville, 2011)	



2.3. Tarihsel Gelişim

Karşılıklı olma prensibi yüzyıllardır kullanılmaktadır. Buna karşın 20. yüzyılda tanımlanan “reciprocal frame” terimi ilk kez İngiltere’de bu tür bir yapıyı geliştiren Graham Brown’dan gelmektedir. Erken kullanım örneklerinden çadırlar, karşılıklı çerçeve strüktürler ile benzer özellikler taşımaktadır (Larsen, 2008). Çadırlardaki tepede birleşen elemanların birbirine destek sağlaması bu strüktür sisteminin prensibini yansıtmaktadır.

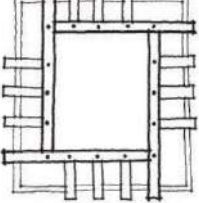
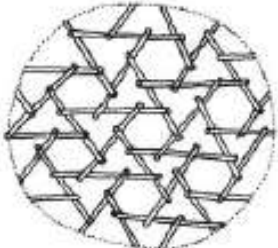
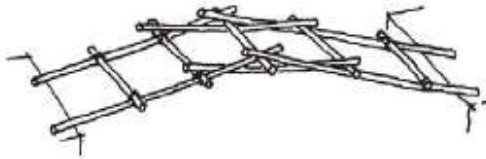
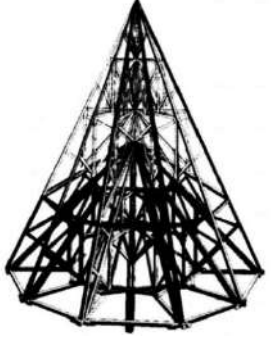
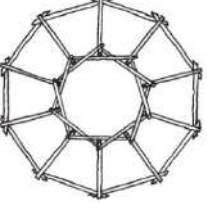
Karşılıklı çerçeve strüktürlere köken olarak hem Avrupa’da hem de Doğu ülkelerinde rastlanmıştır. İlk olarak Batı’da geniş açıklıkların kısa elemanlarla geçmesiyle kullanılırken Doğu ülkelerinde geleneksel iç içe geçme dokuma sepetlerden gelişen “mandala çatılarında” kullanılmıştır (Garcia Puyol, 2015; Baverel ve Pugnale, 2014). M.Ö. 55-53’teki Galya Savaşı esnasında Roma İmparatoru Julius Caesar’ın Avrupa’nın en büyük nehirlerinden Ren Nehri üzerine yaptırdığı köprünün konstrüksiyonu da karşılıklı çerçeve strüktür prensiplerine dayanmaktadır (Pugnale ve Sassone, 2014). Asya’daki uygulamalarda “Çin ve Japon mimarisinde 12. yüzyıldan itibaren kullanılan ahşap karşılıklı çerçeve strüktür örneklerine rastlanmaktadır” (Di Carlo, 2008). Avrupa’da ise orta çağ ve sonrası dönemde karşılıklı çerçeve sistemler ile ilgili daha fazla benzerlik bulunmaktadır. “Leonardo da Vinci’nin yapısal eskizleri, Fransız mimar Villar de Honnecourt’un zemin ve çatı ızgaraları, Sebastiano Serlio ve Wallis’in yapıları örnek olarak gösterilebilmektedir” (Larsen, 2008). 13. yüzyılda yer alan etkili örneklerden biri ise Lincoln Katedrali’nin çatı bölümüdür. 21 metre uzunluğunda kullanılan ahşap çerçeve en geniş İngiliz katedrallerinden biridir (Di Carlo, 2008).

1459 yılında Palazzo Piccolomini tarafından yapılan Müzik Odası’nın tavanında karşılıklı düzen açıkça görülebilmektedir. 1580 yılında yapılan Wollaton Hall zemin planında kısa ahşap kirişlerle oluşturulan karşılıklı ve düzensiz bir örüntü görülmektedir. Bu örneklerin devamında en önemli gelişmelerden birisi de 17. yüzyılda John Wallis’in “Operum Mathematicorum” adlı kitabında karşılıklı çerçeve strüktürlerdeki elemanlara etki eden kuvvetlerin nasıl hesaplanacağına ilişkin yöntemi ilk kez tanımlamıştır (Pugnale ve Sassone, 2014). “Wallis’in bu ilk bilimsel yaklaşımına ek olarak, Fransız askeri mühendis Émy, 1837’de çok sayıda karşılıklı çerçeve strüktür önerisi önermiş ve “Traité de l’art de la



charpenterie” adlı eseri modern ahşap mühendisliğinin temellerinden biri haline gelmiştir.” (Thönnissen, 2015 akt; Godthelp, 2019).

Tablo 5. Karşılıklı çerçeve strüktür eski kullanım örnekleri

		
Hint Çadırları (Eskiz: A.E. Piroozfar, akt; Larsen, 2008)	Hogan Konutları (Eskiz: A.E. Piroozfar, akt; Larsen, 2008)	Honnecourt’ın Düzlemsel Izgara Düzeni (Eskiz: A.E. Piroozfar, akt; Larsen, 2008)
		
Leonardo da Vinci’nin Düzlemsel Izgara Düzeni ve Köprü Tasarımı (Eskiz: A.E. Piroozfar, akt. Larsen, 2008)		
		
Lincoln Katedrali (Eskiz: A.E. Piroozfar, akt. Larsen, 2008)	Müzik Odası (Pugnale & Sassone, 2014)	



Karşılıklı çerçeve strüktürlerin 20. yüzyıla kadar olan gelişiminde ahşap elemanların kullanımı görülmektedir. 20. yüzyılda beton malzemenin ortaya çıkışı ve endüstri devrimi ile çelik yapı malzemelerinin kullanımının artmasıyla geniş hacimli mekânlarda hem ahşap hem de karşılıklı çerçeve strüktür kullanımına rastlanmamaktadır. Kazuhiro Ishii tarafından yapılan ve 1992-2002 yılları arasında inşa edilen Bunraku Puppet Tiyatrosu uzun yıllar sonra görülen karşılıklı çerçeve strüktürün etkili örneklerinden olmuştur. Günümüzde çok sayıda çağdaş karşılıklı çerçeve strüktür örneklerine rastlanmaktadır. Karşılıklı çerçeve strüktürlerin 2000’li yılların başlarına kadar olan tarihsel süreci tablo 6’da gösterilmiştir.

Tablo 6. Karşılıklı çerçeve strüktürlerin tarihsel gelişimi

TARİH	GELİŞME
M.Ö. 2000	Eskimo ve Hint çadırları, Hogan konutlarında karşılıklı çerçeve strüktür prensibinin olması (Larsen, 2008)
M.Ö. 55-53	Julius Caesar’ın Ren Nehri’ne yaptırdığı köprüde karşılıklı çerçeve strüktür prensibinin olması (Pugnale ve Sassone, 2014)
12. yy	Çin ve Japon mimarisinde karşılıklı çerçeve strüktür kullanımının başlaması (Di Carlo, 2008)
1220-1235	Alexander of Lincoln / Lincoln Katedrali (Larsen, 2008)
1225-1250	Villar de Honnecocourt’un düzlemsel ızgara düzeni (Larsen, 2008)
1452-1519	Leonardo Da Vinci’nin ızgara düzeni ve köprü tasarımı / Codex Atlanticus
1459	Palazzo Piccolomini / Müzik Odası (Pugnale ve Sassone, 2014)
1580	Wollaton Hall (Godthelp, 2019)
1695	John Wallis / Operum Mathematicorum (Pugnale ve Sassone, 2014)
1837	Émy / “Traité de l’art de la charpenterie” adlı kitabını yayınlaması (Thönnissen, 2015 akt; Godthelp, 2019)
1924	Friedrich Zollinger’in, geliştirdiği karşılıklı çerçeve sistem ile benzeyen bağlantı sistemi için patent alması
1964	Dean vd.’nin “lamella beams” terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
1965	Emilio Perez Piñero / katlanabilir karşılıklı çerçeve strüktür patentini alması (Pugnale ve Sassone, 2014)
1975	Erwin Walle ve Sigurd Prinz / karşılıklı çerçeve prefabrike beton ünitelerini tescil ettirmesi (Pugnale ve Sassone, 2014)
1978	Gat’ın “SIGMA (selfsupporting interlocking grids for multiple applications)” terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)



Tablo 6'nın devamı

1989	Graham Brown'ın "reciprocal frame" ifadesini tanımlaması ve patent alması
1990	John Clinton'ın bilimsel yayınlar yapması (Pugnale ve Sassone, 2014)
1992	Chilton ve Choo'nun "Mandala-Dach" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
1992-2002	Kazuhiro Ishii tarafından karşılıklı çerçeve prensibindeki Bunraku Puppet Theatre'ın yapımı (Larsen, 2008)
1996	Olga Popovic Larsen'in doktora tezini karşılıklı çerçeve alanında yayınlaması
2000	Baverel'in Nexorade terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2001	Rizzuto vd.'nin "multi-reciprocal element (MRE)" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2003	Rizzuto ve Chilton'ın "mutually supported element" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2005	Roelofs'un "Leonardo's lattice" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2010	Proll vd.'nin "selfsupporting framework" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2010	Tamke ve Jungjohann'ın "lamella flock" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)
2012	Song-Ching Tai'nin "interlocking frame" terimini kullanması (Pugnale ve Sassone, 2014)

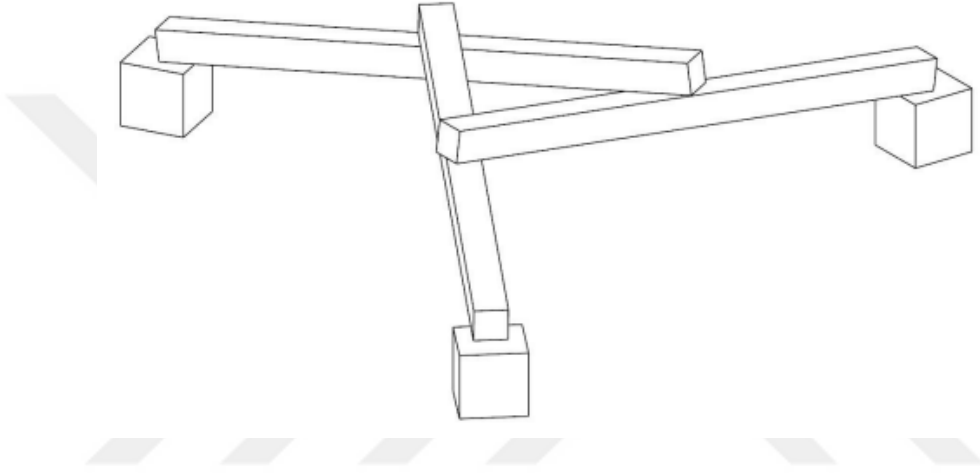
2.3.1. Geometrik Parametreler

Karşılıklı çerçeve strüktür; fan, modül ya da ünite adı verilen kapalı devrelerden oluşmaktadır. Bu üniteler bir araya gelerek bir doku oluştururlar ve bu dokunun üç boyuta kaldırılmasıyla karşılıklı çerçeve strüktürler oluşmaktadır. "Üniteler 3 ya da daha fazla elemandan oluşmaktadır" (Song, vd., 2013). Bu ünitelerin bir araya gelme şekli ile geometrik parametreler ortaya çıkmaktadır. Bu parametrelerin doğru anlaşılabilmesiyle dengeli bir tasarım oluşturulabilir. Bu parametreler Popovic'e (1996) göre;

- kiriş sayısı (n),
- dış desteklere kadar yarıçap (r0),



- kiriş kesişimlerine kadar yarıçap (r_i),
- dış desteklerden kesişim noktasına kadar kirişin dik yüksekliği (h_1),
- kirişlerin kesişim noktasında aksları arasındaki düşey fark (h_2),
- eğimli kirişin boyu (L) şeklindedir.



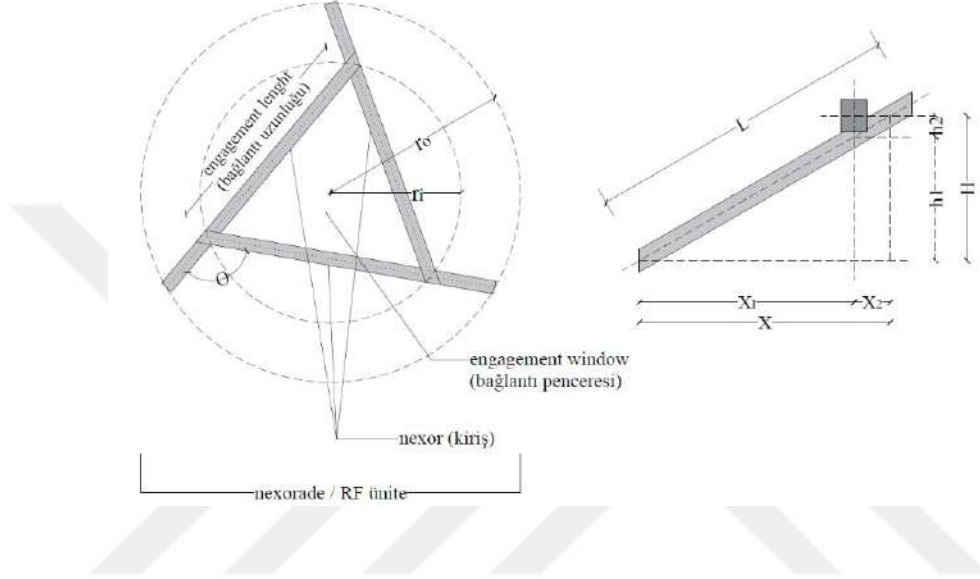
Şekil 2. Üç elemanlı basit bir karşılıklı çerçeve strüktür ünitesi (Gustafsson, 2016)

Karşılıklı çerçeve ünitelerindeki her bir elemana “kiriş” (nexor) denilirken, ünitelerde oluşan ızgara boşluğu açıklıklarına “bağlantı açıklığı” (engagement windows), bağlantı açıklığındaki bir kirişin uzunluğuna da “bağlantı uzunluğu” (engagement length) denilmektedir. Bağlantı uzunluğu ve kirişin tüm uzunluğunun oranına “bağlantı oranı” (engagement ratio) denilir ve bu oran genelde 0.1-0.4 aralığındadır (Popovic, 1996; Baverel ve Nooshin, 2007).

Popovic’in (1996) bahsettiği parametrelerde kiriş sayısı (n) bir üniteyi oluşturan elemanların sayısı yani değerliliği (valency) olarak adlandırılır. Şekil 3’teki h_2 uzunluğu eksantriklik (dış merkezlilik) değeridir ve e sembolü ile de gösterilir. Eksantriklik elemanların merkez eksenleri arasındaki farkı ifade eder. Bu yükseklik farkı ile sistemde bir eğim açısı oluşur ve bu eğrilik bağlantı noktası çözümünü etkilemektedir. “Eğim < 0 olursa

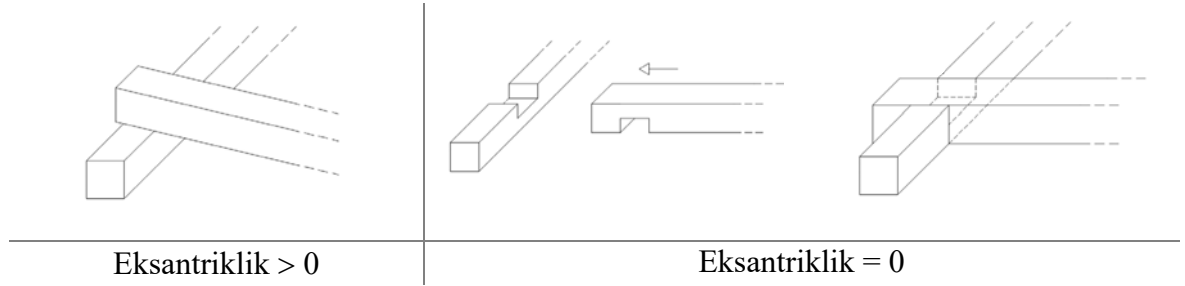


konkav eğrili, eğim = 0 olduğunda da düzlemsel bir sistem oluşturulur” (Kohlhammer ve Kotnik, 2011). Tablo 7’de gösterildiği gibi eksantriklik sıfıra eşit olduğunda düzlemsel strüktürler elde edilirken, eğri yüzeyli kabuklar için eksantriklik değeri sıfırdan büyük olmaktadır (Baverel, 2000).



Şekil 3. Karşılıklı çerçeve strüktür ünitenin geometrik parametreleri

Tablo 7. Eksantriklik değerleri ve kirişlerin eğrilik durumu (Baverel, 2000)



Karşılıklı çerçeve strüktürlerin geometrisini oluşturan bu parametrelere ait trigonometrik eşitlikler şu şekildedir (Chilton ve Choo, 1992 akt., Larsen, 2008);



$$\theta = \frac{360}{n} \quad (2.1)$$

$$x_2 = 2r_i \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.2)$$

$$x_1 = \left[r_0^2 - \left(r_i \cos \frac{\theta}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{x_2}{2} \quad (2.3)$$

$$x = x_1 + x_2 \quad (2.4)$$

$$h_1 = H \frac{x_1}{x} \quad (2.5)$$

$$h_2 = H - h_1 \quad (2.6)$$

$$L = (x^2 + H^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.7)$$

Karşılıklı çerçeve strüktürün plan boyutları (r_i ve r_o) ve H yüksekliği ile yukarıda verilen denklemleri kullanılarak türetilen eğriler, yapı için en uygun kiriş sayısı ve derinliğini seçmede kullanılabilir. Bununla birlikte iç yarıçap (r_i) küçüldükçe ve kiriş sayısı arttıkça kirişlerin eğimi artar. İç yarıçap büyüdükçe ve kiriş sayısı arttığında ise eğim azalır. Karşılıklı çerçeve strüktürleri tasarlarken bu parametrelere dikkat edilmesi gerekir. Mekanda geçilen açıklık karşılıklı çerçeve ünitelerin kiriş sayısını belirlemektedir (Larsen, 2008).

Belirtilen parametrelerin değişimi ve ünitelerin bir araya geliş şekliyle farklı ızgara düzenleri ve strüktürel kurgular elde etmek mümkündür. “Eğer ünite dönüşü saat yönünde ise “sağ fan”, eğer dönüş saat yönünün tersinde ise “sol fan” denilmektedir” (Baverel ve Larsen, 2011). Ünite düzenleri elemanların üst ya da aşağı gelme durumlarına göre de farklılaşır ve aşağı yönlü ya da yukarı yönlü olarak ifade edilebilir. Bu durum gözlemcinin üniteye bakış açısına göre de farklı yorumlanabilir fakat gözlemcilerin ünitelere daima yukarıdan baktığı genel bir kabuldür (Baverel, 2000). Sağ ve sol ünitelerin aşağı ya da yukarı yönlü şekilde ayrı ya da birlikte kullanımları ile farklı mozaikler elde edilebilmektedir. Karşılıklı çerçeve strüktürleri oluşturan üniteler bir araya gelirken tekrarlanarak çoğalabileceği gibi farklı ünitelerin bir araya gelmesiyle de bir doku oluşturulabilirler (tablo 8).



Tablo 8. Farklı karşılıklı çerçeve strüktür ünite düzenleri

Aşağı ve yukarı yönlü üniteler (Mesnil, vd., 2018)	
Sağ ve sol üniteler (Baverel ve Larsen, 2011)	
A: Sağ ünitelerle oluşturulan örüntü, B: Sol ve sağ ünitelerle oluşturulan örüntü, C: Sol ünitelerle oluşturulan örüntü (Baverel, 2000)	

2.3.2. Form Bulma Yöntemleri

Karşılıklı çerçeve strüktürler düzlemsel ya da eğrisel yüzeylerde düzenli ya da düzensiz geometrik örüntülerden meydana gelir. Örüntüdeki ünite düzenleri aynı ya da farklı çeşitte olabilmektedir. Dolayısıyla karşılıklı çerçeve strüktürlerde farklı çeşitlerde örüntü düzeni tasarlanma imkanı bulunmaktadır. Bu çeşitlilik geometrik parametrelerdeki değişkenlerle sağlanmaktadır.

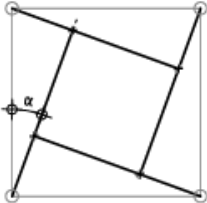
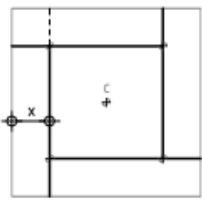
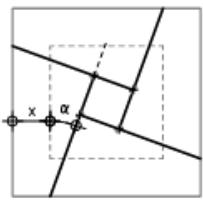
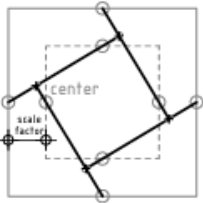
Karşılıklı çerçeve strüktür mozaiklerin yapımında önemli olan konu örüntünün üçüncü boyutta nasıl optimize edileceğidir. “Diğer strüktür sistemlerinin aksine elemanların ikili olarak birbirine bağlanması, kirişler arasında eksantriklik oluşması yapı geometrisinde karmaşıklığa sebep olabilmektedir” (Douthe, vd., 2018). Bu durumu ortadan kaldırmak için form bulma yöntemleri üzerine çeşitli çalışmalar yapılmış ve geliştirilmeye devam



edilmektedir. Form bulma süreci karşılıklı çerçeve strüktür ünitelerin geometrik oluşumu ve bu ünitelerin çoğalarak bir örüntü üretmelerini, bu örüntüleri oluşturan elemanların karşılıklı taşıma ve diğeri tarafından taşınma prensibini koruyarak düzlemsel ya da eğrisel formlarda optimize edilmesini kapsar.

Form bulma uygun şekilde mimari ve strüktürel biçimin bulunmasını ifade eder (Coenders ve Bosia, 2006 akt. Veenendaal ve Block, 2012). Yıllar boyunca araştırmacılar farklı yöntemlerden yararlanmışlardır. Godthelp (2019) temel tasarım yönteminin ızgara yapıyı oluşturan geometrik şekilden yola çıkılarak oluşturulabileceğini ifade etmiş ve bunu yapmanın 4 farklı türünden bahsetmiştir. Bunlar döndürme, öteleme, döndürme ve öteleme, merkezden merkeze öteleme şeklindedir. Bu yöntemler düzlemsel örtülerde rahatlıkla kullanılabilirken karmaşık yüzeylerde bilgisayar tabanlı modellemelerin daha etkili olduğu bilinmektedir. Senechal vd.'nin (2011) ele aldığı döndürme (rotation) yönteminde dışbükey çokgenleri oluşturan doğrular için başlangıç ve bitiş noktaları belirlendikten sonra bir açı ile döndürülmektedir. Baverel'in (2000) çalışmasında detaylı el aldığı öteleme (translation) yönteminde çokgen belli bir mesafede belirli açı ile ötelenmektedir. Döndürme ve öteleme (rotation and translation) de ise bu iki yöntem birlikte uygulanır. Merkezden merkeze öteleme yönteminde belirli bir ölçekte geometri ötelenir. Oluşan bu ikinci çokgendeki kenarların orta noktaları ile ilk baştaki çokgendeki komşu kenarların orta kenarları birleştirilir (Godthelp, 2019).

Tablo 9. Karşılıklı çerçeve strüktür geometrik tasarım yöntemleri (Godthelp, 2019)

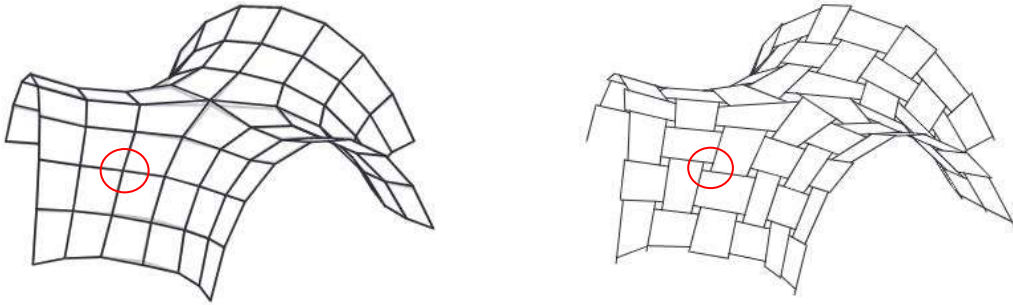
			
Döndürme (rotation)	Öteleme (translation)	Döndürme ve öteleme (rotation and translation)	Merkezden merkeze öteleme (center to center offset)

Bahsedilen bu geometrik yöntemler analitik olarak çokgen formların modifiye edilmesi ve karşılıklı çerçeve strüktür örüntülerin oluşturulması için kullanılırken karmaşık



ünite düzenlerinin algoritmik olarak düzenlenmesinde yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple çoğu araştırmacı tarafından hesaplamalı tasarım yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler Pugnale ve Sassone (2014) tarafından üç ana başlığa ayrılmıştır. İlk yöntem tek bir üniteye eklenen diğer ünitelerle örüntünün çoğalarak oluşturulması “iterative additions” yani “yinelemeli eklemeler” olarak ifade edilir. Baverel (2000) ve Douthe ve Baverel’in (2009) çalışmalarında geliştirdiği optimizasyon stratejileri olarak ifade edilen ikinci yöntemde ise çerçeve geometrisindeki hatalar yinelemeli olarak iyileştirilir. Üçüncü yöntem ise son şeklin tanımlanması için kinematik olarak belirsiz sistemlerin modellenmesini kapsamaktadır (Pugnale ve Sassone, 2014). Bu modellemeler sayesinde düzlemsel ya da eğri yüzeylere iki boyutta tasarlanan karşılıklı çerçeve strüktür örüntüleri üç boyuta kaldırılarak uyarlanabilmektedir. CAD (bilgisayar destekli tasarım) aracılığı ile araştırmacılar çeşitli form bulma araçları geliştirmektedir.

Karakoç’un (2017) çalışmasında aktardığı gibi Saidani ve Baverel’e (1998b) göre karşılıklı çerçeve strüktür örüntülerin ızgara geometrisi referans olarak seçilen çokgen dizilimlerine bağlıdır. Mesnil vd., (2018) çalışmalarında referans geometriden yola çıkarak karşılıklı çerçeve strüktür elde etmişlerdir (şekil 4). Çalışmanın bu kısmında bağlantı noktasını etkileyen ana unsurlardan ızgara düzenini türetilmesini göstermek için bahsedilen form bulma yöntemlerinden en yaygın olan öteleme (translation) yöntemi ve referans çokgen dizilimine bağlı olarak bir örüntü şeması oluşturulmuştur.

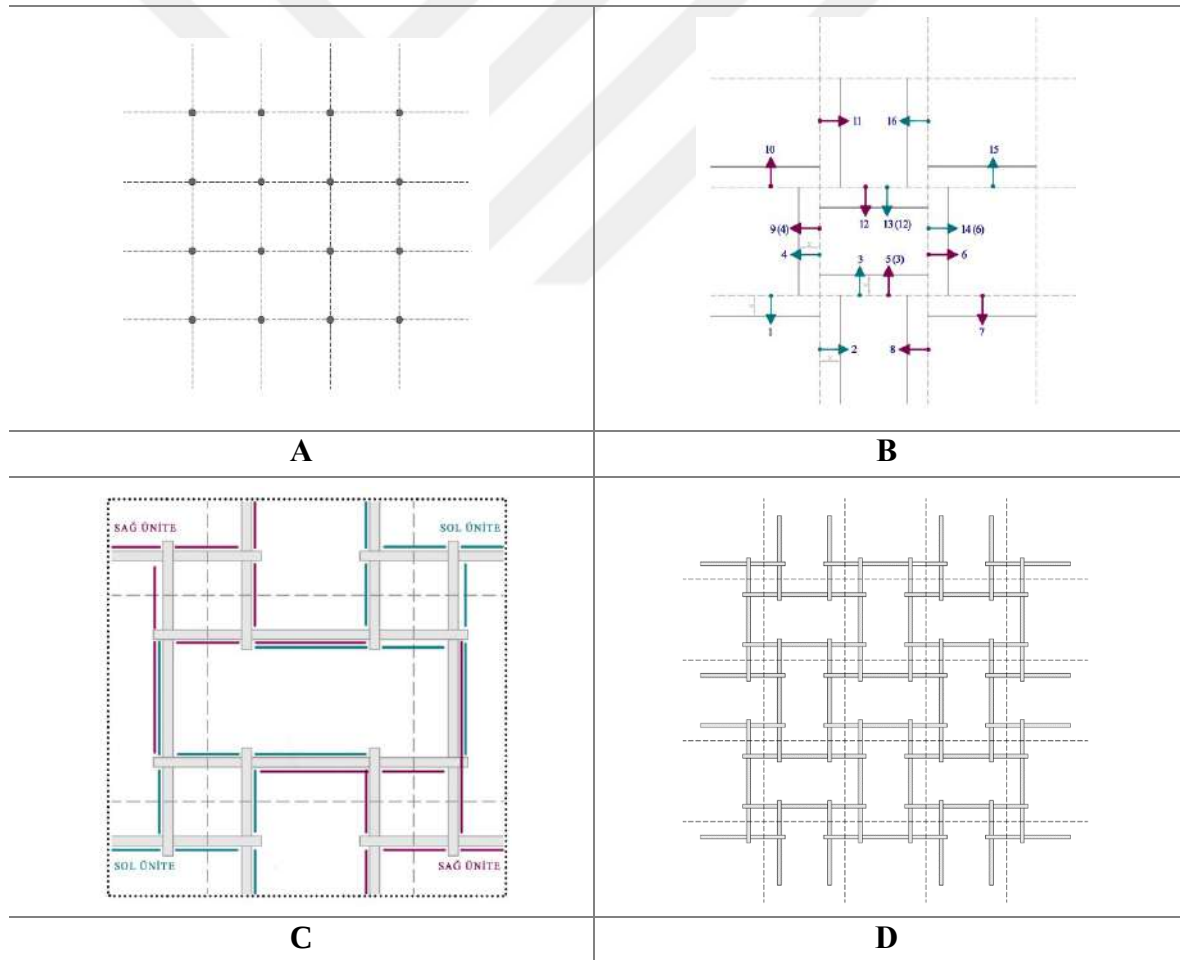


Şekil 4. Sol; referans çokgen geometri, sağ; optimize edilmiş karşılıklı çerçeve strüktür (Mesnil, vd., 2018a)



Tablo 10'nin A bölümünde kare şeklinde kılavuz çizgiler oluşturulmuştur. Bu yöntemde kılavuz çizgilerin kesiştiği noktalarda bağlantı penceresi oluşturacak şekilde öteleme yapılmıştır. B bölümünde öteleme yönü bir üniteye sabit olacak şekilde birinci adımdan başlanmıştır. Elde edilen ilk ünite dörtgen sol üniteye. 3 numaralı adım komşu köşedeki hareketin şeklini doğal olarak belirlemiştir ve 5 numaralı adımdan devam edilerek ikinci ünite dörtgen sağ ünite olmuştur. Örüntü düzeni öteleme yöntemi ile bu şekilde devam etmektedir. D bölümünde karşılıklı çerçeve örüntüsünün son hali yer almaktadır. Bu mozaik sağ ve sol dörtgen ünitelerle oluşturulan bir örnektir.

Tablo 10. Öteleme yöntemi ile karşılıklı çerçeve yapı örüntüsü oluşturma süreci



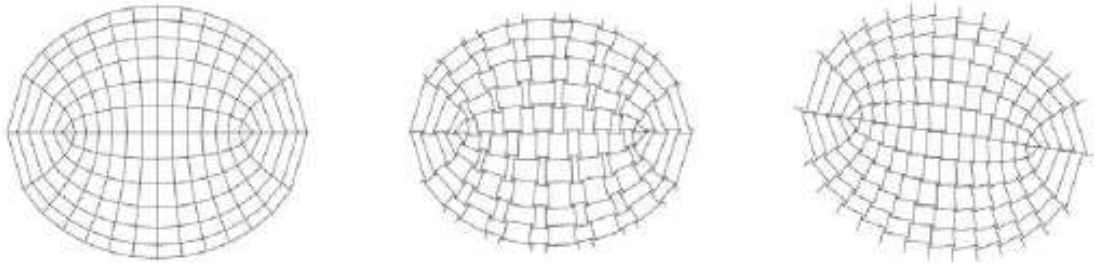
Geometrik parametrelerin ızgara düzenine etkisi Tablo 11'de aktarılmıştır. Örüntülerde ünite dönüş yönü çeşitlerinin kullanımı aynı referans çokgen diziliminde farklı ızgara düzeni



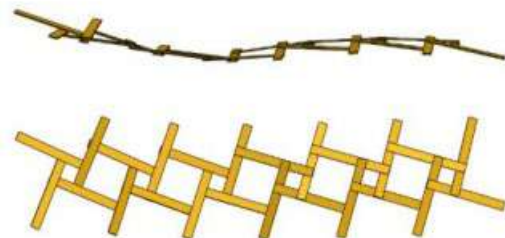
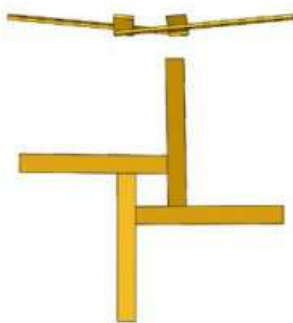
ortaya çıkabilmektedir. Ünite kirişlerinin aşağı ve yukarı yönlü durumları ise strüktürün eğri yönünü değiştirmektedir. Üniteye farklı bağlantı uzunlukları ve kiriş şekilleri ızgara formunu değiştirmektedir. Düzenli ve düzensiz geometriler de farklı ızgara biçimleri sunar. Popovic'in (1996) bahsettiği gibi tüm kirişler aynı uzunlukta değilse, dış ve iç çokgenler düzenli olmaz ve kirişler arasındaki açılar da farklı olabilmektedir.

Parametrelerde yapılan değişiklikler ve farklı yüzeylerde farklı yöntemlerle yapılan çalışmalar göstermektedir ki çok çeşitli ızgara düzenleri ortaya çıkmaktadır. Önceki bölümde bağlantı noktası ve ızgara düzenini etkileyen alt başlıklardan bahsedilmişti. Bu alt başlıkların her birinin yukarıda bahsedilen farklı form bulma yöntemleri ile bir araya gelmesiyle çeşitli ızgara düzenleri elde edilebilir. Düzlemsel ve eğrisel yüzeylerde eksantriklik değeri farkından dolayı eğri yüzeylerde farklı optimizasyon stratejileri uygulanması gerekir.

Tablo 11. Geometrik parametrelerin değişkenliğine göre farklı karşılıklı çerçeve strüktür örüntüleri



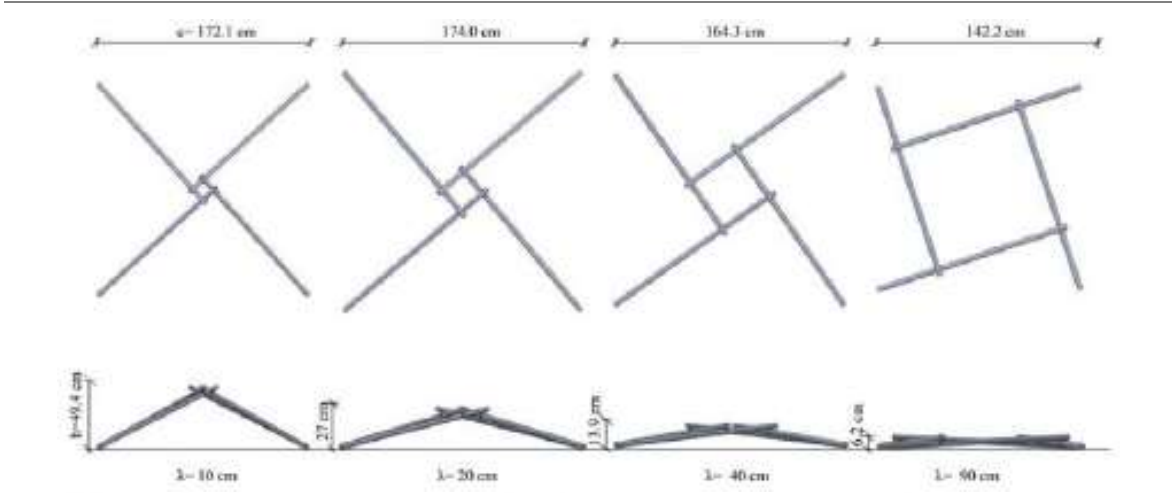
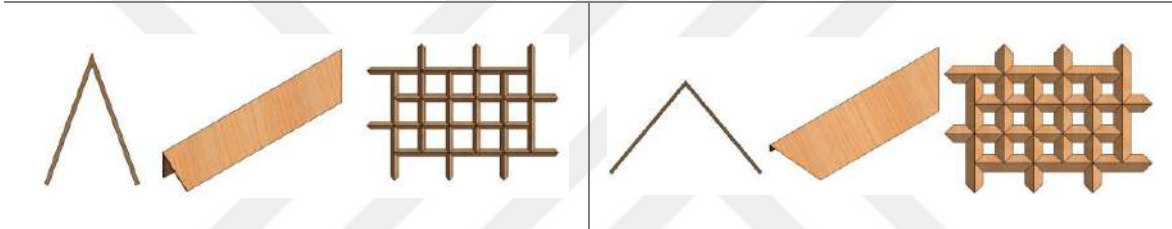
A: Sol; referans çokgen dizilimi, orta; sol ve sağ ünitenin birlikte uygulanışı, sağ; sadece sağ ünitenin uygulanışı (Mesnil, vd., 2018a)



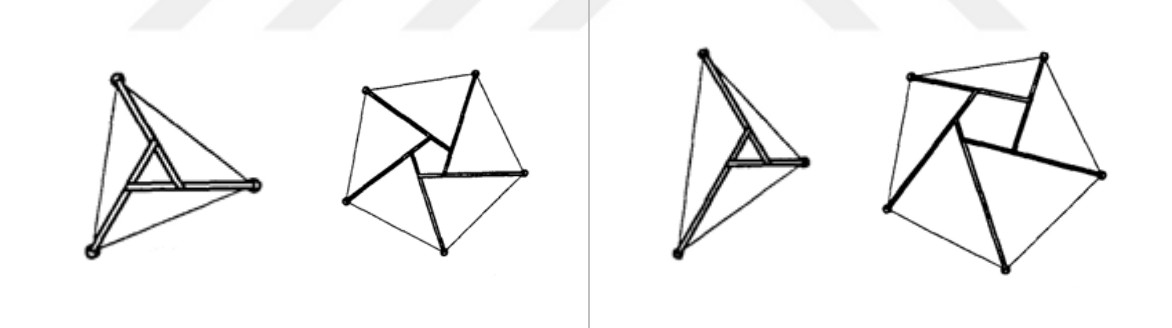
B: Sol; aşağı yönlü kirişlerle oluşturulan karşılıklı çerçeve sistem, sağ; aşağı ve yukarı yönlü kirişlerle oluşturulan karşılıklı çerçeve sistem (Gherardini ve Leali, 2017)



Tablo 11'in devamı

C: Farklı bağlantı uzunlukları (λ) ile oluşturulan üniteler (Özen, Kiper ve Korkmaz, 2022)

D: Farklı V-şekilli kiriş elemanın ızgara düzenini etkilemesi (Gherardini ve Leali, 2017)



E: Sol; aynı kiriş uzunluğundaki üçgen ünite ve beşgen ünite, sağ; farklı kiriş uzunluğundaki üçgen ünite ve beşgen ünite (Popovic, 1996)

Bu bilgiler doğrultusunda bağlantı nokta detay tasarımını etkileyecek olan en büyük etken ızgara düzeninin çeşitliliğidir. Izgara düzenini çeşitlendiren geometrik ve biçimsel parametreler; karşılıklı çerçeve ünitelerin modül eleman sayısı/geometrisi, kiriş elemanların biçimi, ünitenin tabaka sayısı, üniteye örtü elemanı kullanma durumu, kirişlerin bağlantı uzunluğu, kirişlerin eksantriklik değeri, kirişlerin aşağı ve yukarı gelme pozisyonları, ünitenin dönüş yönü şeklindedir. Bu parametrelere ek olarak karşılıklı çerçeve strüktür oluşturmak için seçilen form bulma yöntemi de ızgara düzenini etkilemektedir. Dolayısıyla bağlantı nokta detayları bu değişkenlere göre çeşitlilik göstermektedir.



2.3.3. Yapım ve Üretim

Yapım ve üretim süreci içerisinde farklı önemli noktalar bulunmaktadır. Bir binanın yaşam döngüsü tasarım, üretim, inşa, kullanım ve yıkım süreçlerinden oluşur. Karşılıklı çerçeve strüktürlerin üretiminde diğer yapım türlerinde de olduğu gibi yapı malzemesi önemli bir etkidir ve tasarım süreci etkiler. “Sünek özelliğe sahip olması istenen sürekli serbest biçimli yapılarda kullanılan malzemelerin aksine, karşılıklı çerçeve strüktürlerde uzun boyutlarda kullanılabilecek ve burkulma dayanımına sahip çelik, alüminyum ve ahşap gibi malzemeler kullanılır” (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019). Seçilen malzeme üretim aşamasını ve montaj türünü etkilemektedir. Örneğin ahşap elemanlarla yapılan üretimler yapısal ahşap ürünlerin üretimi ile başlar.

Yapının kalıcı ve geçici olma durumu da malzeme seçimini etkiler. Karşılıklı çerçeve çağdaş strüktür uygulamaları çoğunlukla geçici yapılarda görülmektedir. Çünkü karşılıklı çerçeve strüktürlerin dezavantajlarından biri elemanların kalıcılığını sağlamaktır. Bir elemandaki strüktürel başarısızlık tüm strüktür karşılıklı çalıştığı için yapının tamamının çökmesine yol açar. Izgara yapıların tasarım ve üretim aşaması beton, çelik gibi kolon-kiriş yapılardan farklı süreçler içerir. Diğer strüktür yapılarından farklı olarak yapısal elemanların ve desteklerin konumlarının kesin olarak tanımlanması gerekir. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde ızgara düzenini etkileyen geometrik ve biçimsel parametrelerin değişkenliği yinelemeli bir süreç ortaya çıkmaktadır. Yinelemeli süreçteki malzeme seçimi bile imalat sürecini etkilerken inşaat aşamasında değişiklikler olması da muhtemeldir (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019). Düzlemsel karşılıklı çerçeve strüktürler serbest eğrisel formlu karşılıklı çerçeve strüktürlere göre daha düşük maliyetli ve kolay üretilmektedir (Garcia Puyol, 2015). Günümüzde karşılıklı çerçeve strüktürlerde form optimizasyonuna ve eğrisel formlarda olduğu gibi karmaşık algoritmik hesaplamalara ihtiyaç duyulduğu için CAD tabanlı tasarım yöntemleri tasarım ve üretim aşamasının temelini oluşturur. Fakat lazer kesim makineleri, robotik üretimler gibi dijital fabrikasyonlar inşaat sektöründe ve ülkemizde henüz yaygınlaşmayan üretim yöntemleridir.





Şekil 5. Robotik üretim ile gerçekleştirilen karşılıklı çerçeve ahşap blok eleman, BUGA Ahşap Pavyonu (URL-4)

Douthe vd., (2018) çalışmalarında form bulma sürecinden kurulum sürecine kadar ele alınan “shell-nexorade hybrid” adında karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapısı üretmişlerdir. 6,5 metre açıklıkta tasarlanan yapı ahşap elemanlarla üretilmiştir. Form bulma sürecinde öteleme yöntemi kullanılmış ve Karamba3D yazılımı ile strüktürel analizi yapılmıştır. Kirişlerin bağlantı çözümü “T-bağlantı” şeklinde tanımlanan vidalı birleşimlerle sağlanmıştır. Tüm kirişler şantiye alanında manuel olarak kurulan yapının hesaplamalı iş akışı tablo 12’de gösterilmiştir.

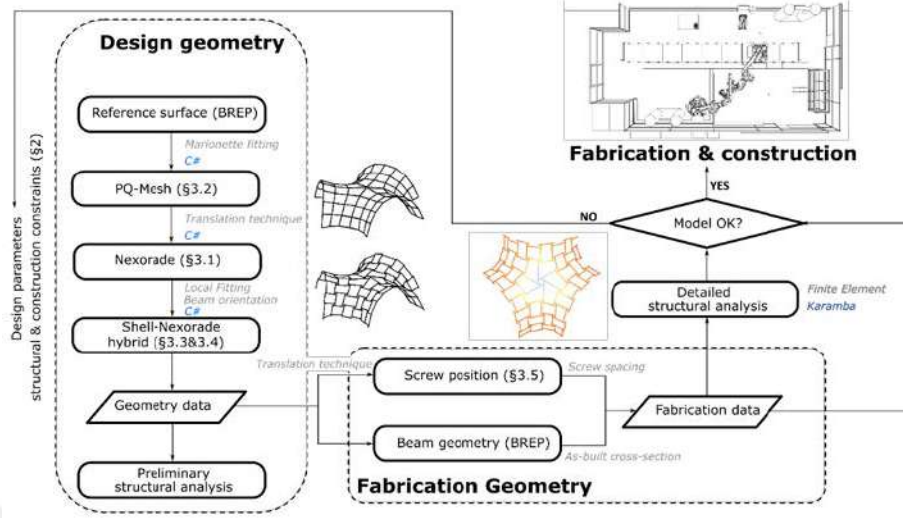
Tablo 12. Örnek olarak ele alınan karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapı ve yapım-üretim süreci



A: Douthe, vd.’nin (2018) ürettiği ahşap karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapısı



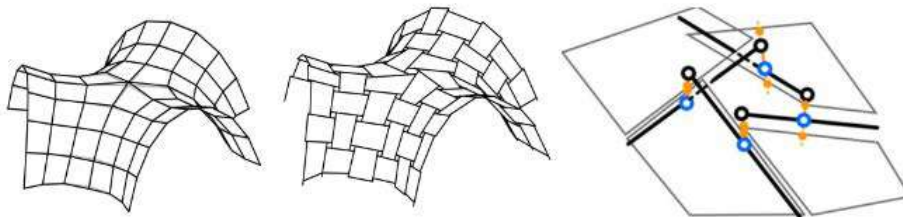
Tablo 12'nin devamı



B: Douthe vd.'nin (2018) ürettiği pavyon yapının hesaplamalı iş akışı (Mesnil, vd., 2018b)

Karşılıklı çerçeve strüktürlerin eski kullanım örneklerinde el ile tasarım ve şantiye alanında insan gücü ile yapı üretimi yapılırken günümüzde tercih edilen yaklaşıma dair örnek yukarıda bahsedilmiştir. Bahsedilen iş akışı göstermektedir ki referans yüzeylerden başlayarak tasarlanan yapının üretim aşamasına kadar bağlantı detay tasarımları ve strüktürel analizler hesaplanmaktadır. Bu aşamaların her birinde elde edilen çıktılarına göre süreç yinelemeli olarak bir önceki aşamaya dönecek şekilde gerçekleştirilebilir. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde üretim ve inşa aşaması bu kapsamda tasarımdan ayrı olarak düşünülmemelidir.

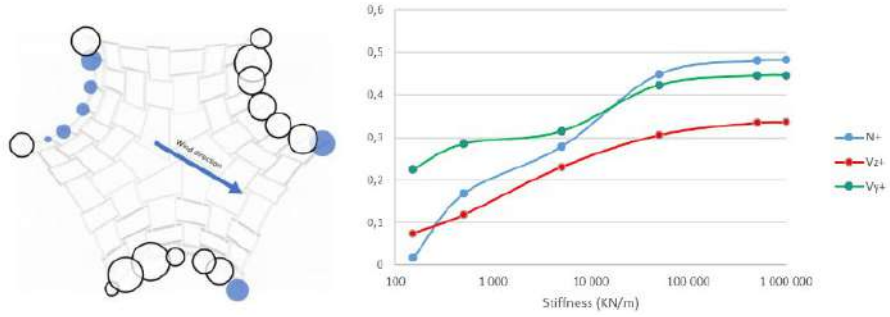
Tablo 13. Karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapı yapım aşamaları



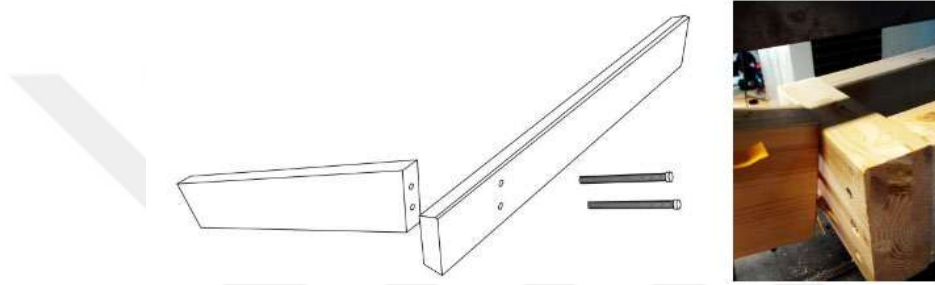
A: Karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapının form tasarım süreci (Douthe, vd., 2018)



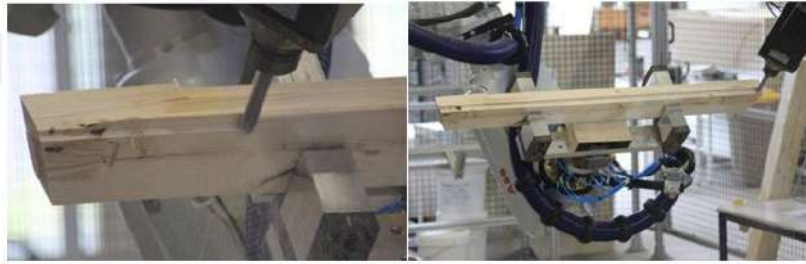
Tablo 13'ün devamı



B: Rüzgar yükü altında statik hesaplama süreci (Douthe, vd., 2018)



C: Bağlantı detayının tasarlanma süreci (Douthe, vd., 2018)



D: Panel bağlantısı için kirişlerin robotik olarak frezelenmesi (Mesnil, vd., 2018b)



E: Şantiye alanında kurulum aşamaları (Douthe, vd., 2018)



2.3.4. Sürdürülebilirlik

Karşılıklı çerçeve strüktürlerin sürdürülebilirlik açısından da etkili olduğu düşünülmektedir. Çoğu karşılıklı çerçeve strüktür 3-12 metre açıklık aralığında olduğu için malzeme olarak genelde ahşap ve lamine ahşap kullanılmaktadır (Popovic, 1996). Yaygın olarak ahşap yapı malzemesinin kullanılmasının sürdürülebilirlik için önemlidir. Karşılıklı çerçeve strüktür sisteminin sürdürülebilir avantajları olarak Popovic'in (1996) değerlendirdiği maddeler şu şekildedir;

- 1- Düşük U değerine sahip panellerden kullanılarak tasarlanabildiği, yenilebilir materyallerden inşa edilebildiği, sıcak iklimlerde gölgeleme sağlayabildiği için enerji tasarrufu sağlar.
- 2- Kolay havalandırılabilen çatı açıklığına imkan verebildikleri için iklime uygun çalışırlar.
- 3- İç desteklere ihtiyaç olmadığı için mekanda işlev değişikliğine ve yapının yeniden kullanımına izin veren esnek alanlar oluşturduğu için, sökülebilir karşılıklı çerçeve yapılarda aynı malzemelerin yeniden kullanılabilirdiği için yeni kaynak kullanımlarını en aza indirir.
- 4- Sökülür yapı olarak tasarlanırsa çevreye ve inşa alanına zarar vermez.

2.4. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerde Izgara Düzeni

Karşılıklı çerçeve strüktürlerde geometrik parametrelerin yanı sıra ızgara düzenleri ve ünitelerin biçimsel değişkenleri de sistem için çeşitlilik sağlamaktadır. Bağlantı noktası tasarımı ve uygulaması bu parametrelerle önemli ölçüde ilişkilidir. Çünkü bir karşılıklı çerçeve strüktür ünite elemanların şekli ve bir araya gelme açısı bile farklı kenetlenme durumları ortaya çıkarmaktadır. Izgara düzenini etkileyen 4 alt başlık belirlenmiştir.



Sistemi Oluşturan Modül Eleman Sayısı / Modül Geometrisi

Üniteler en az üç elemandan oluşur. 3,4,5 ya da daha fazla sayıda elemanlar bir modül oluşturarak üçgen, dörtgen, beşgen geometrilili ızgaralar oluşmaktadır. Izgara düzenlerinde tek bir geometri yer alabileceği gibi farklı geometrilerin de birlikte kullanılmasıyla bir örüntü elde etmek mümkündür. Bağlantı boşluğunu tanımlayan geometri modül geometrisidir. Godthelp (2019) çalışmasında 3 ve 4 üniteli karşılıklı çerçeve sistemleri karşılaştırdığında 4 üniteli sistemde daha fazla sayıda giriş ve bağlantı kullanıldığını ve daha büyük giriş uzunluklarından belirtmiştir. Ancak bu uzunluk giriş boyutlarını azaltarak daha düşük bir giriş yükü ortaya çıkarmaktadır

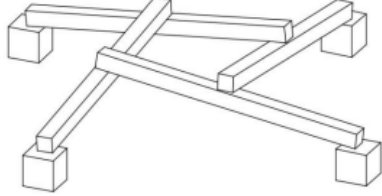
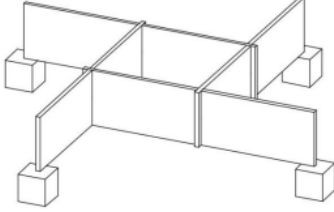
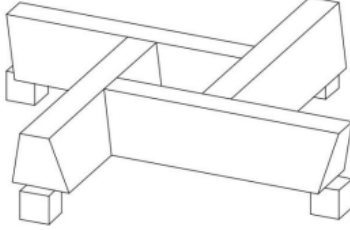
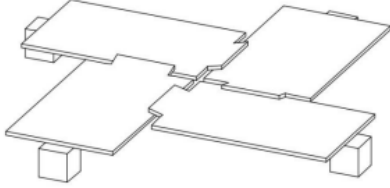
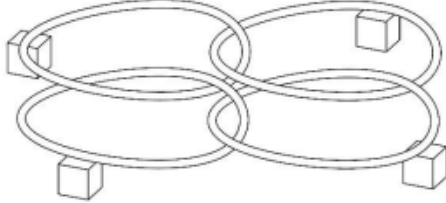
Sistemi Oluşturan Modül Elemanın Türü

Elemanların ebatları ve formları da ızgara düzenini ve bağlantı noktasını etkileyen önemli unsurlardandır. Kullanılacak elemanın boyutu ve türü strüktürün açıklığını, yüksekliğini, formunu, örtü kaplamasının kullanıp kullanılmayacağını, montaj sürecini, ünitenin bağlantı uzunluğunu, strüktürün oluşturduğu açıklık-kapalılığı, yapısal ağırlığı ve bağlantı türünü etkilemektedir (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019). Baverel'e (2000) göre girişler ince uzun elemanlardan, düzlemsel elemanlardan, uzay kafes elemanlardan ve plaka elemanlardan olabilir. Gustafsson'a (2016) göre de modüllerde çubuk, panel, blok, levha ve halka şeklinde elemanlar kullanılabilir. Çubuklar ince kesitli ve yüksekliği az olan boyuna elemanlardır. Paneller yüksekliği fazla ama ince kesitli elemanlardır. Çubuklarla oluşturulan bir üniteye eksantriklik daha az olabilirken, panel elemanların yüksekliği nedeniyle eksantriklik fazla olabilmektedir. Bu sebeple çubuklarda üst üste konarak birleşim sağlanabilirken panel elemanlarda genellikle çentik şeklinde bağlantılar kullanılır. Panellerin yüksekliği aynı zamanda görüş açısını da engelleyerek ızgara kurgusunun çubuk elemanlara göre daha az algılanmasına neden olur. Blok elemanlar kısa uzunlukta olurken kesitleri panel ve çubuk elemanlara göre daha kalındır. Levha elemanlar ise yüksekliği oldukça az fakat genişlik ve derinliği fazla olan elemanlardır. Panel elemanlar gibi levhalar da görüş açısını engelleyerek ızgara kurgusunun görünmesine olanak sağlamaz. Halka elemanlar ise biçimi gereği kapalı bir döngüye sahiptir. Elemanlar birbirleri içine geçme sistemi ile bir araya getirilebilmektedir. Bu 5 eleman türü tek başına örüntü oluşturabildiği gibi farklı kombinasyonlarla da örüntü elde etmek mümkündür (Gustafsson, 2016). Her eleman türü strüktüre farklı özellikler sağlamaktadır. Örneğin lineer elemanlar yapısal ağırlık açısından



daha güvenli olmasına karşın levha elemanlar yapının sağlamlığını ve derinliği artırmaktadır (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019).

Tablo 14. Modül elemanların türleri (Gustafsson, 2016)

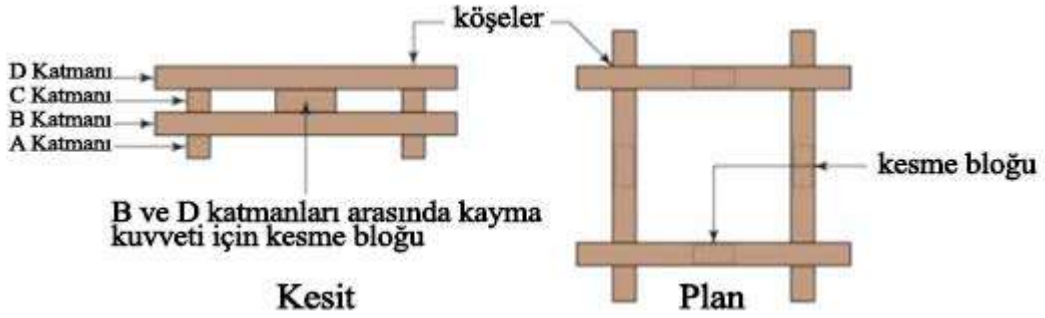
Çubuk elemanlarla oluşturulan dörtgen karşılıklı çerçeve strüktür ünite	
Panel elemanlarla oluşturulan dörtgen karşılıklı çerçeve strüktür ünite	
Blok elemanlarla oluşturulan dörtgen karşılıklı çerçeve strüktür ünite	
Levha elemanlarla oluşturulan dörtgen karşılıklı çerçeve strüktür ünite	
Halka elemanlarla oluşturulan dörtgen karşılıklı çerçeve strüktür ünite	



Sistemin Tabaka Sayısı

Bahsedilen eleman türlerinin kaç tabaka halinde bir ünite oluşturacağı da ızgara düzeni ve bağlantı noktası detayını etkilemektedir. Kirişlerin tek katmanlı ya da çift katmanlı ızgara kurguları olabileceği gibi strüktüre eklenen örtü elemanın varlığı da yeni bir tabaka olarak değerlendirilmelidir.

Ahşap ızgaraların diğer kabuklara kıyasla temel özelliklerinden biri ızgaranın iki yönü boyunca birbiri üzerine binerek katmanlı bir yapısal sistemin oluşturulabilmesidir. Katmanlı ızgaraların inşaat sırasında katmanların birbirleri üzerinde serbestçe kayması gerekmesi düğüm bağlantıları için zorluk oluşturmaktadır (Naicu, 2012). Çift katmanlı kabuklarda üst ve alt çıtlar arasında kesme aktarımının sağlanması gerekir (Happold ve Liddell, 1975 akt; Naicu, 2012). Bu bağlantıların kendileri ve çıtlar arasına yerleştirilen kesme bloklarının kullanımıyla sağlanır ve daha fazla dayanım sağlanır (Harris, vd., 2003 akt; Naicu, 2012). Karşılıklı çerçeve strüktürlerde örüntü birbirini tekrar eden modüllerden oluştuğu için bağlantı noktalarındaki çözüm her modüle uygulanır ve pratiklik sağlanır.



Şekil 6. Çift katmanlı ahşap ızgara kabuğun plan ve kesiti (Harris, vd., 2003 akt; Naicu, 2012)

Örtü Elemanı

Izgara sistemi yapısı gereği boşluklardan oluşan bir kurguyu ifade eder. Doluluklar kullanılan ızgara elemanının en, boy, genişlik ölçüleri ile sağlanır. Bunun haricinde ise ızgaranın boşluk kısımlarına örtü elemanlarının konulması strüktürel örüntüye tutunan yeni



bir tabakayı ifade eder. Örtü elemanının varlığı ünitelerin bağlantı noktasına etki eden önemli bir parametredir. Örtü elemanın strüktür sisteminin altında, üstünde ya da tabakalar arasında kullanılma durumu çeşitli detaylar ortaya çıkarmaktadır.

Karşılıklı çerçeve strüktürlerde kullanılan elemanın türü yapı için kapalılık ve açıklık durumunu belirler. Dış ortam şartlarından korunmak için yapılarda işleve göre geçirgenlik değişmektedir. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde kullanılan kaplamalar elemanlar arasında polikarbonat veya PVC levhalar ya da yapının içinde veya dışında bulunan membran kaplamalar şeklinde olabilmektedir (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019). Örtü malzemelerinin yapının işlevine ve iklime uyum sağlaması istenir. Hafif, dayanımı yüksek, montaj ve bakımının kolay olması da olması gereken özelliklerdendir (Vural, 2004).

2.5. Ahşap Karşılıklı Çerçeve Strüktürlerin Bağlantı Detayları

Karşılıklı çerçeve strüktürlerde yapının kendi ağırlığı dışında çatı kaplaması, kar, rüzgar, deprem yükü gibi başka etkenlere maruz kalmaktadır. Bu yüklerden bazıları asimetrik olabileceği için yapıda kaldırma, burulma ve eğilme gibi etkilere yol açabilir. Bu sebeple tasarımda bu etkenler göz önüne alınmalıdır. Tasarım kararları dışında bahsedilen bu bilgiler de kirişlerin boyutlarını belirlemektedir. Bağlantıların tasarımı da aynı şekilde yapının davranışı, imalat ve montaj kolaylığı elde etmek için önemlidir. (Larsen, 2008). Bağlantılar yük aktarımı ve yapısal stabiliteyi sağladıklarından dolayı da büyük öneme sahiptirler (Rizzuto ve Larsen, 2010). Castriotto vd., (2022) çalışmalarında karşılıklı çerçeve strüktür bağlantı detayı tasarımı için bazı gereksinimleri karşılayarak tasarım geliştirmek istemişlerdir. Bu gereksinimlere göre bağlantı detayı karmaşık yüzeyler de dahil olmak üzere çeşitli küresel formlara uygulanabilir olmalı, kolay montaj ve demontaj imkanı sağlayarak yapının birden fazla kez kullanımına izin vermeli, yapısal performans ve montaj sürecini üzerinde etkisini azaltmak için bağlantının ekstra ağırlığının en aza indirilmesi, kirişleri zayıflatmaması, çeşitli ahşap ürünlerinin ve boyutlarının kullanımına izin vermesi gerektiği şeklindedir (Castriotto, vd., 2022).



Karşılıklı çerçeve strüktürlerde yapıda yer alan üç farklı bağlantı noktasından bahsedilebilir. Bunlardan ilki kirişlerin birbiri ile bağlantısı, ikincisi kirişlerin kaplama/örtü tabaksı ile bağlantısı, üçüncüsü ise kirişlerin çevresel desteklere (zemine) bağlantısıdır. Bağlantılarda doğru açının sağlanması, örtü elemanları ve strüktürün çevreyle olan bağlantı detayındaki zorlukların çözümü için dijital fabrikasyon araçlarının kullanımı, ek elemanların kullanımı ve eksenel döner bağlantı elemanlarının kullanımı gereklidir (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019).

Karşılıklı çerçeve kirişlerin bağlantısında avantajlardan biri karmaşık düğümlerden ziyade yalnızca iki ögenin bağlanmasıdır (Bowne, vd., 2021). Tez kapsamında ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin bağlantısı incelenmiştir. “Ahşap çok yönlülüğü, işlenebilirliği, mukavemet-ağırlık oranı ve bolluğu nedeniyle karşılıklı çerçeve strüktürlerin üretiminde kolaylıkla kullanılan bir yapı malzemesidir” (Rizzuto ve Larsen, 2010). Bu özellikleri nedeniyle farklı üretimleri bulunan ahşabı bağlantı noktası özelinde işlemek, bir araya getirmek, birbirine geçirmek gibi farklı çözümleri vardır. Kirişlerin birbiri ile olan bağlantı çeşitlerini Larsen (2008) çentik kullanımı, sürtünme kuvvetinden yararlanmak için üst üste koyma, sabit bir ara bağlayıcı eleman kullanmak şeklinde sınıflandırmıştır. Bunlara ek olarak metal bağlantılardan ve ip bağlama tekniklerinin de kullanılabileceğini ifade etmiştir. Gustafsson (2016) ise kirişlerin birbiri ile olan bağlantı türlerini 5 başlıkta incelemiştir (tablo 15). Tez çalışması kapsamında bu bağlantı türleri ahşap karşılıklı çerçeve strüktürler özelinde incelenecektir.

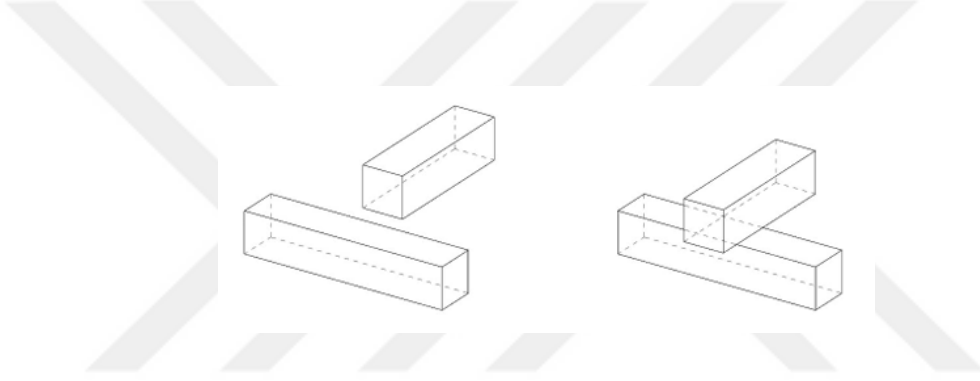
Tablo 15. Gustafsson’ın (2016) sınıflandırdığı bağlantı türleri

Kirişlerin Birbiri İle Olan Bağlantı Türleri	Üst Üste Koyma (Superposition)
	Bağlama Kolu Kullanımı (Coupler)
	Dübel ve Plaka Kullanımı (Dowels and Plates)
	Çentik Kullanımı (Notches)
	Özel Detaylar



2.5.1. Üst Üste Koyma

Karşılıklı çerçeve strüktürlerde elemanların birbirine bağlanması genellikle mekanik bağlantılar olmadan basınç ve sürtünme ile gerçekleştirilebilir (Kohlhammer ve Kotnik, 2011). Üst üste koyma tekniği de bu ilkeye dayanmaktadır. Bu bağlantı türünde kirişler birbiri üzerine konarak sürtünme kuvveti sayesinde bütünlük sağlanır. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde genellikle yüksek eğilme mukavemetine sahip ince uzun ahşap elemanlar üst üste bindirilerek bağlantı sağlanır (Pugnale ve Sassone, 2014). Böylece her kiriş üzerine oturan kirişleri taşıırken komşu diğer kiriş tarafından da taşınmaktadır.



Şekil 7. Üst üste koyma bağlantı detayı (Gustafsson, 2016)

Düşey yönde gelen yükler kesme kuvveti ile karşılanırken ters yönde elemanın kaldırmaya karşı emniyete alınması gerekir. Yatay yönde gelen kuvvetler ise sürtünme kuvveti ile karşılanır (Gustafsson, 2016). Bu bağlantı türünde montaj aşaması nispeten daha kolaydır çünkü elemanlar arasında ahşap veya çelikten yapılmış cıvata gibi özel bir bağlayıcı yoktur (Pugnale ve Sassone, 2014). Ara elemanların olmaması da estetik açıdan ahşabın homojen bir görünümünü sunar. Ancak bağlantı detayının rijit olmaması ise bir dezavantajdır. Tüm elemanlar tamamlanmadan statik bütünlük sağlanmadığı için strüktür tamamlanana kadar geçici destek elemanlarına ihtiyaç duyulur ve demontaj esnasında da tek bir elemanın çıkarılması tüm elemanları yerinden oynatır (Gustafsson, 2016). Kullanılan kirişler arasında doğal olarak eksantriklik değeri sıfırdan büyüktür. Bu sebeple bu bağlantı türü kullanıldığında formda eğimden söz edilebilir.



Sürtünme kuvvetine dayalı bu bağlantı türü küçük ölçekli karşılıklı çerçeve strüktür yapılarında kullanılmaktadır. Büyük açıklıklı yapılarda sadece sürtünme kuvvetine bağlı olarak yapı güvenliği tam olarak sağlanamayabilir. Bu sebeple ek bağlantı detayları geliştirilebilmektedir.



Şekil 8. Karşılıklı çerçeve strüktürlerde üst üste koyma detay örneği; Life Sciences Laboratuvarı, Torikabuto (Larsen, 2008)

2.5.2. Bağlama Kolu Kullanımı

Bu bağlantı türünde kirişler arasında ek bir bileşen kullanılarak kirişler birbirine kenetlenmektedir. Genellikle karşılıklı çerçeve strüktürün erken dönem örneklerinde kullanılan bağlama detayı çelik ve çeşitli lifler gibi farklı malzemelerle yapılabilir (Gustafsson, 2016). Kirişler sürtünme kuvvetinden yararlanarak bir arada durduğu gibi ip vb. elemanlar ile bağlanarak daha fazla stabilite sağlanmaktadır. Baverel'e (2000) göre ahşap kirişler arasında iki tür bağlantı detayı bulunur. Bunlardan ilki bitişik kirişleri ip ile bağlamak, kirişlerin bir araya geldiği yerde delikler açarak bir ara eleman yerleştirmektir (Baverel, 2000). Bu şekilde bağlama yapılarak kullanılan detaylarda bağlantı elemanlarının ötelenmesi engellenir fakat dönme gerçekleşebilir. (Gelez ve Saby, 2011).



Bağlama kolu kullanımında ip kullanılabildiği gibi kelepçe sistemler de kullanılmaktadır. Bu bağlantı türü genelde geçici yapılarda kullanılmaktadır. Çünkü bu detay ile yapı kolayca sökülüp başka bir yerde kolayca yeniden kurulabilir. (Rizzuto ve Larsen, 2010). Kelepçe genellikle yuvarlak kesitli çelik boru elemanlarda kullanılsa da ahşap elemanlar için de kullanılması mümkündür (Gustafsson, 2016). Kelepçelerde hataya karşı tolerans mümkündür fakat kelepçelerin gücü ve sertliği düşüktür (Qi, vd., 2021).

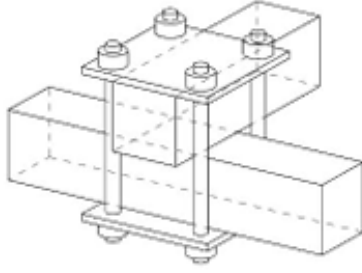
Yaygın ahşap birleşimlerden biri olan kiriş askısı (joist hanger) yöntemi de bağlama kolu kullanımında değerlendirilmektedir. Genelde metal bir bileşen olan kiriş askısı kirişlerden birine tutturulurken diğer kirişin askı üzerinde durması sağlanır. Bu eleman türünde öteleme ve dönüşler engellenmektedir. Kiriş özelliklerine göre özel olarak üretilmesi gereken kiriş askıları belirli açıda bir araya getirilmektedir. (Gustafsson, 2016).



Şekil 9. Ahşap karşılıklı çerçeve kirişlerin ip ile bağlanması (Gustafsson, 2016)

Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerde bağlama kolu kullanımı farklı materyallerle gerçekleştirilebilmektedir. İp gibi lifli elemanların kirişleri birbirine bağlaması, ara kelepçe eleman kullanımı ve kiriş askısı kullanımı şeklinde üç yöntem aktarılmıştır. Bağlama ipi ve kelepçe kullanımı kirişlere zarar vermezken kiriş askısı kullanımında kirişlerde delikler açılmaktadır. Böylece ahşap kirişlerin yeniden kullanım durumunda ip bağlama ve kelepçe yöntemi daha avantajlı olmaktadır. İp bağlama ve kelepçe yönteminde kirişler birbiri üzerine geldiği için eksantriklik değeri sıfırdan büyük olur ve eğim ortaya çıkmaktadır.



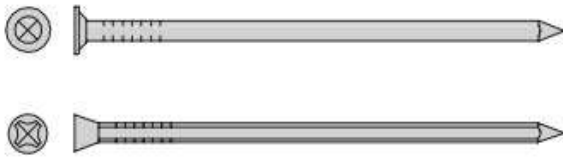


Şekil 10. Sol; kelepçe türü bağlantı kolu kullanımı (Gustafsson, 2016), sağ; ahşap kirişlerde kiriş askı kullanımı (URL-5)

2.5.3. Dübel ve Plaka Kullanımı

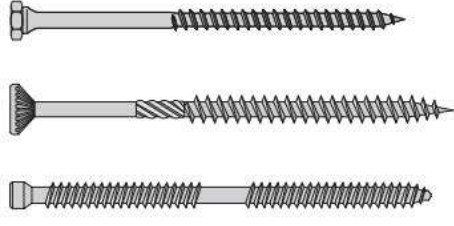
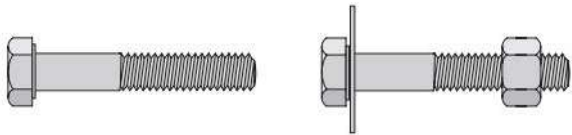
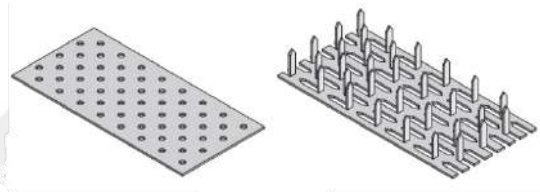
Bu bağlantı türünde dübel, çivi, vida, cıvata, plaka kullanımına ek olarak yapıştırılmış çubuk yönteminden de bahsedilebilir (Gustafsson, 216). Dübel ve plaka tipi bu bağlantı detaylarında ahşap kirişler içerisinde bu ara elemanlar geçirilir. Dolayısıyla kirişlerde boşluk açılmaktadır. Bu durum da ahşap kirişlerin sonradan geri kullanımı için dezavantaj olmaktadır.

Tablo 16. Dübel tipi bağlayıcı elemanlar (Swedish Wood, 2022).

Dübel	
Çivi	



Tablo 16'nın devamı

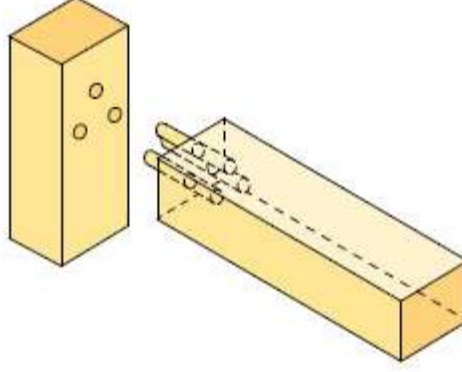
Vida	
Cıvata	
Plaka	

Dübeller genellikle ahşaptan yapılan ince silindir şeklindeki çubuk elemanlardır ve eski ahşap bağlantı detaylarındandır. Dübellerde çivi ve vidaların aksine başlık kısmı bulunmaz ve Eurocode5'e göre 6-30 mm çapında olmaktadır. Önceden boşluk açılan ahşap elemanlara kirişin geri kalanından daha güçlü bir ağaç türünden dübel kullanılmaktadır. Dübel tipi bağlantılar yapıyı sünek şekilde çalıştırır bu da güvenli bir strüktür sağlamaktadır. Ayrıca dübeller gelen yüke karşı dik olarak yerleştirilirler. (Swedish Wood, 2022). Ahşap dübeller daha uygun maliyetleri ve olumlu çevresel etkisi sebebiyle ilgi çekicidir ve son yıllarda dübelli ahşap birleşimler için yapılan araştırmalar artmaktadır (O'Loinsigh, vd., 2011).

Çivi ve vidalar ise metal silindir şeklinde bağlayıcı elemanlardır. Çivilerin çapı 8 mm'den küçük, vidaların çapı ise maksimum 6 mm'dir. Çiviler direkt ahşap kirişe çakılabildiği gibi önceden delik açılarak da çakılabilir. Vidalar için ise genelde önceden delik açmaya gerek yoktur. (Swedish Wood, 2022). Ahşap birleşimlerde en yaygın yöntemlerden biri olan çivi ve vidalar dış mekânda kullanıldığında korozyona karşı korunmalı veya paslanmaz çelikten yapılmalıdırlar. Vidalarda çivilere göre daha yüksek çekme kuvveti sağlanmaktadır. Çiviler vidalardan daha yumuşaktır ancak vidalar daha kolay sökülebilmektedir. Çivilerin ahşap elemanlara çakılmasındaki önemli bir hususta çivi başlığının elemana çok fazla girmemesi gerektiğidir. Aksi takdirde ahşap çivi başlığı



çevresinden neme maruz kalabilir. Dolayısıyla çivi ve vida başlıkları monte edildiği yüzeyle aynı seviyede bitmelidir (URL-6).



Şekil 11. Ahşap dübel bağlantı detayı (Swedish Wood, 2020)

Cıvatalar dübel ve vidaya benzer genelde altıgen başlığa sahip önceden boşluk açılarak monte edilen bağlayıcı elemanlardır (Swedish Wood, 2022). Açılan boşluklar cıvata çapından daha büyüktürler böylece cıvatalar kayması için yeterli alan sağlar (Rizzuto ve Larsen, 2010). Cıvataları sabitlemek için somun adı verilen elemanlar kullanılır. Rondelalar ise somun ve cıvataları sıkmaya yardımcı olan ara parçalardır ve gelen yükü daha geniş bir alana dağıtarak tahribatı engellerler. Günümüzde cıvataların farklı çeşitlerini bulmak mümkündür.

Cıvataların mukavemet ve rijitliği yüksektir ancak önceden açılmış deliklere pimlerin doğru şekilde bağlanması gerekir. Yivli pimle birbirine bağlanan iki eleman pimin etrafında dönerek tüm yapının da rijitliğini etkileyebilir. Bu da inşaat alanında zorluklar sunabilir ve verimliliği azaltır (Qi, vd., 2021). Cıvataların dezavantajlarından biri de ahşabın daha az dirençli olduğu kesme kuvvetlerini artırmasıdır (Castriotto, vd., 2022).

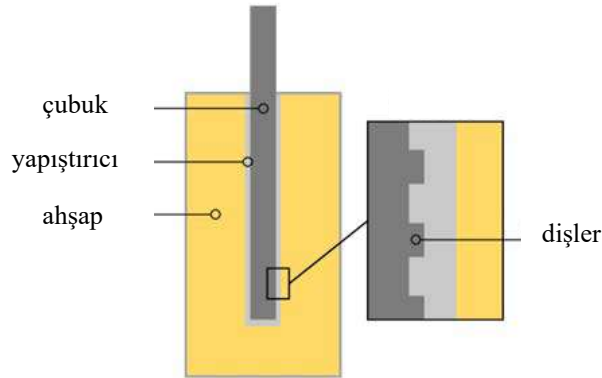
Plaka tipi bağlantı elemanları ara bağlayıcı elemanlardır. Ahşap elemanlarda çelik bir levha kullanımı oldukça yaygındır ve ahşap elemanların ahşap ile bağlantısına göre çelik-ahşap bağlantıları bağlantının kapasitesini artırır. Delikli metal plakalar çivi ve plakaların bir



entegrasyonudur ve plakadan çivi delinerek üretilir. Plakaların kalınlığı 2 mm'yi geçemez ve çivilerin uzunluğu genelde 8-15 mm arasındadır. Delikli metal plakalar hidrolik presle ahşaba monte edilir. Bu sebeple şantiye alanında bu uygulama tavsiye edilmemektedir (Swedish Wood, 2022). Dübel bağlantılarını güçlendirmek için metal plaka elemanlarının kullanılması da yük taşıma kapasitesini iki katına çıkarmaktadır (Blass, 2003 akt; Swedish Wood, 2022).

Ara bağlantı elemanlarının kullanımından başka olarak yapıştırılmış çubuklar da ahşap bağlantı detayları arasındadır. Elemanın içine çelik bir çubuk yerleştirilerek güçlü şekilde yapıştırıcı ile sabitlenir. Böylece çubuk diğer ahşap elemana yerleştirilerek güçlü ve sert bir bağlantı oluştur (Swedish Wood, 2011 akt; Gustafsson, 2016). Çubuklar ahşabın lif yönüne paralel veya dik olarak uygulanabilmektedir. Çubuklar çelik veya fiber takviyeli plastikten olabileceği gibi sert ağaçtan yapılmış dübeller de kullanılabilmektedir (Feldt ve Thelin, 2018).

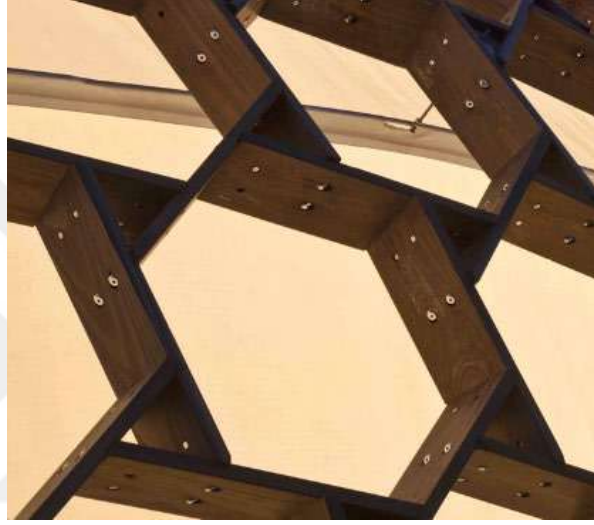
Bahsedilen ek elemanlar iki kirişe de nüfuz ederek kuvvetlerin aktarılmasını sağlar. Bu bağlantı türleri montajdan önce hazırlık gerektirmektedir. Yapı, dübel ve plaka tipi ara bağlantı elemanlarının kullanımında parçalar halinde inşa edilip daha sonra bütün haline getirilebilir. Monte edilen dübel, çivi, vida, cıvata ve plaka elemanların çıkarılması görece daha zordur (Gustafsson, 2016). Ahşap kirişlerde açılan boşluklar ve bağlantı elemanlarının sökülümünün zorluğu ahşap elemanların yeniden kullanımı için dezavantajdır.



Şekil 12. Yapıştırılmış çubuk kesiti (Feldt ve Thelin, 2018)



Bu başlıkta bahsedilen bağlantı detaylarında eksantriklik değeri sıfır ve sıfırdan büyük olacak şekilde ızgara örüntülerine uygulanabilmektedir. Bağlantı kolu kullanımlarında olduğu gibi dübel tipi elemanların kullanımında da homojen bir ahşap görüntüsü elde edilemez. Fakat çivi, vida, cıvata gibi elemanlar yapıları gereği strüktür içerisinde gözü yormayacak bir görünüm oluştururlar. “Bu tür bağlantıların olumlu özelliklerinden birisi de belirsiz ahşap yapılarda sünek bir davranış sağlayabilmeleridir (Aicher, vd., 2014 akt; Gustafsson, 2016)”.



Şekil 13. Karşılıklı çerçeve strüktür yapıda vida bağlantısı; KREOD Pavyonu (URL-7)

2.5.4. Çentik Kullanımı

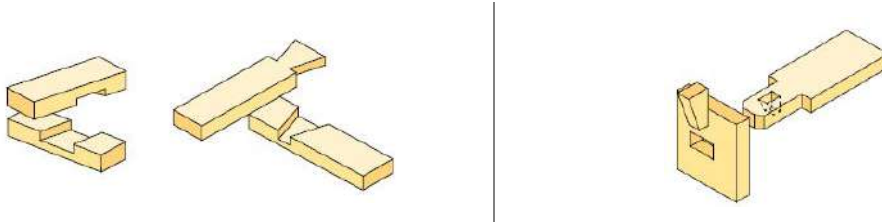
Erken dönem karşılıklı çerçeve strüktürlerde bağlantı detaylarında genellikle çentik detayı kullanılmıştır. Çentiğin elemandan malzeme çıkarılarak yapılması kesme kuvvetlerinin ve gerilmenin yüksek olduğu noktalarda elemanları zayıflatmaktadır (Larsen, 2008; Bowne, vd., 2021). “Ancak, karşılıklı çerçeve elemanları azaltılmış mukavemet varsayılarak tasarlanırsa ve hafif çatı malzemeleri (membranlar) kullanılırsa, bu sorun olmamalıdır”(Popovic, 1996.). Eğimli RF strüktürlerde kirişlerde çentik açılması karmaşık



bir üç boyutlu geometri oluşturur ve CAD tabanlı yazılımlarla hassasiyetle kesilmesi gerekir (Larsen, 2008).

Çentik kullanımının avantajlarından birisi imalat atölyesi gibi kontrollü ortamda elemanların önceden kesilebilmesidir (Rizzuto ve Larsen, 2010). Çentik bağlantı detayında çentiğin derinliğine göre eksantriklik değerini ayarlayabilmek mümkündür. İstenirse üst üste koyma bağlantısında olduğu gibi eğimin yüksek olduğu kompozisyonlar elde edilirken istenirse de tamamen düzlemsel bir sistem oluşturulabilir. İki çeşit çentik türünden bahsedebiliriz. Bunlar yarım bindirmeli bağlantılar ve gömme-zıvana bağlantılardır.

Yarım bindirmeli bağlantılarda desteklenecek eleman destek elemanının bindirmesine oturur. İki elemanın yüzleri arasındaki teması bağı olarak bu bağlantı az ya da çok rijit olabilir. Gömme-zıvana bağlantılarda desteklenen ögenin destekleyici ögeye girmesi sağlanır. Eğer desteklenen eleman destek elemanının içerisinden geçip dışarı çıkarsa bir kama ile kilitlenerek dişli gömme-zıvana bağlantısı oluşturulur. Eğer eleman dışarı çıkmazda kör gömme-zıvana bağlantısı denilmektedir (Gustafsson, 2016).



Şekil 14. Sol; yarım bindirmeli bağlantı, sağ; kamalı gömme-zıvana bağlantı (Swedish Wood, 2020)

Bu tür geçmeli bağlantılarda uygulamadan önce çentiklerin konumunun ve uzunluğunun kesin olarak tasarlanması gerekir (Asefi ve Bahremendi-Tolou, 2019). Günümüzde CNC makineleri gibi dijital araçlarla çentikler çok daha kolay ve çok yüksek bir hassasiyetle oluşturulabilmektedir. Çentikli bağlantıların kullanıldığı yapılarda montaj ve demontaj sırasında zarar görülmeyeceği için tekrar kullanılabilirlik genelde yüksektir (Gustafsson, 2016). Çentik bağlantılarda eksantriklik değeri azaltılarak ızgara örüntüsü düzlemsel bir şekil alabilir. Böylece kaplama elemanların eklenmesi de kolay olabilecektir.



Ayrıca başka malzemeden oluşan ara elamanlar kullanılmadığı için homojen bir ahşap görünümü sunulmaktadır.



Şekil 15. Çentik bağlantısının örneği; SC Pavyonu (Thönnissen, 2014).

2.6. Analiz Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde pavyon yapı strüktürlerden seçilen örneklem grubu, ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin ızgara düzeni ve bağlantı detayları üzerinden analiz edilmiştir.

2.6.1. Örneklerin Tespit Edilmesi

Karşılıklı çerçeve strüktürlere ait yapı örnekleri çoğunlukla geçici pavyon yapıları ve enstalasyon yapılarında görülmektedir. Dolayısıyla etkin bir incelemenin oluşması için tez çalışması kapsamında ahşap karşılıklı çerçeve pavyon yapılar tez ana konusu olan ızgara düzenleri ve bağlantı nokta detayları kapsamında incelenmiştir. Bahsedilen detaylara ve ızgara düzenlerine örnek verebilmek amacıyla seçilen örneklem grubu 2012-2019 yılları arasındaki 7 adet pavyon yapıdan oluşmaktadır. . Bu yapılar içerisinde 1, 2, 6 ve 7 numaralı örnekler kaynaklarda karşılıklı çerçeve strüktür (reciprocal frame) şeklinde ifade edilmiştir.



3, 4 ve 5 numaralı örnekler kaynaklarda başka strüktür sistemi üzerinden tanımlanmamış, tezin literatür bölümünde yer alan bilgiler doğrultusunda karşılıklı çerçeve tanımları doğrultusunda karşılıklı çerçeve strüktür (reciprocal frame) olarak ele alınmıştır.

Tez kapsamında karşılıklı çerçeve strüktürler Song, vd.’nin (2013) “Üniteler 3 ya da daha fazla elemandan oluşmaktadır”, Baverel ve Larsen’in (2011) “süreksiz elemanlar” ve Larsen’in (2008) “karşılıklı çerçeve, esas olarak çatı yapısı olarak kullanılan üç boyutlu bir ızgara yapısıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Sözü edilen üç örnek pavyon yapısı da bu tanımlardan yola çıkılarak seçilmiştir.

2.6.2. Örneklerle Ait Analiz Tablolarının Oluşturulması

Örneklerin her biri 3 ana başlık altında analiz edilmiştir. Bu başlıklar yapıya ait bilgiler, ızgara düzenine ait bilgiler ve bağlantı noktalarına ait bilgiler şeklindedir. Yapıya ait bilgiler yapım yeri, yapım yılı, mimari tasarım, yapı alanı, yapı malzemesi ve açıklama alt başlıklarından, ızgara düzenine ait bilgiler modül eleman sayısı/geometrisi, modül eleman türü, modül tabaka sayısı ve ızgara formu alt başlıklarından, bağlantı noktasına ait bilgiler ızgara düğüm detayı, örtü kullanımı, ızgara ve örtü elemanın bağlantı detayı, strüktür-çevre ilişkisi/bağlantı detayı alt başlıklarından oluşmaktadır.

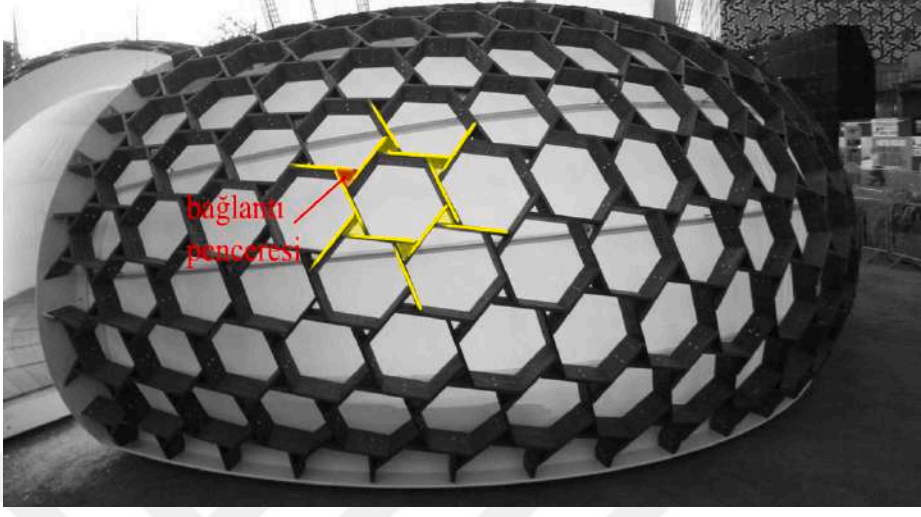
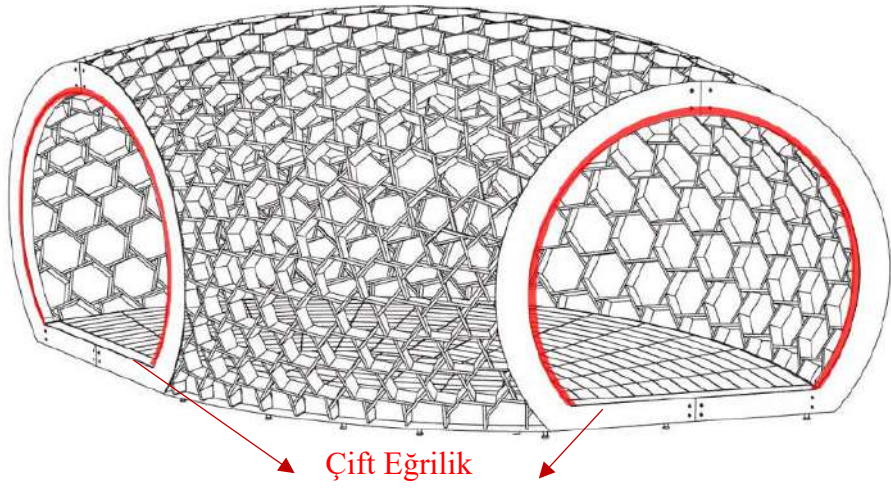


Tablo 17. KREOD Pavyonu (Popovic Larsen, 2014; URL-7, 8, 9, 10, 11)

ÖRNEK NO: 1		YAPI ADI: KREOD PAVİLYONU		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Londra, UK	2012	Chun Qing Li, Pavilion Architecture	60 m ²	Ahşap – Masif Sarıçam
Açıklama	Organik formlu pavyon strüktür doğadan ilham alan ve çevre dostu bir yapıdır. Üç bölümden oluşan yapı sergi ve farklı işlevlerde kullanılabilir. 3 metre yüksekliğindeki yapıda her bölüm 20 metrekare civarındadır. Dış ortama uygun, yapısal olarak sağlam ve yumuşak ahşabın elde edilmesi için özel işlemden geçen Kebony firmasına ait ahşap elemanlar kullanılmıştır.			
				
				
				



Tablo 17'nin devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:	3 Elemanlı Modül / Üçgen
		
	Modül Eleman Türü:	Panel Eleman
		
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
	Izgara Formu:	Çift Eğrilikli
		



Tablo 17'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI

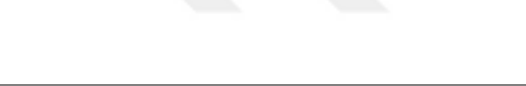
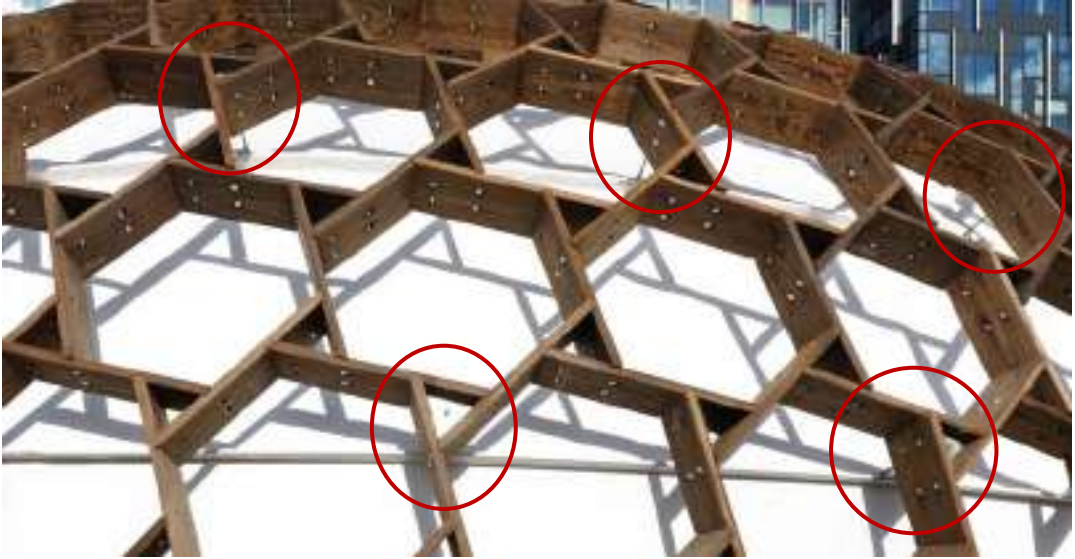
Izgara Düğüm Detayı:

Cıvata Bağlantısı + Dübel Bağlantısı

Ahşap plakalar birbirleriyle kesiştikleri noktada hafif çentik oluşturularak cıvata ile birbirine bağlanmıştır. Komşu plakadan gelen cıvata kısmında metal dübeller takılarak sistem sabitlenmiştir.

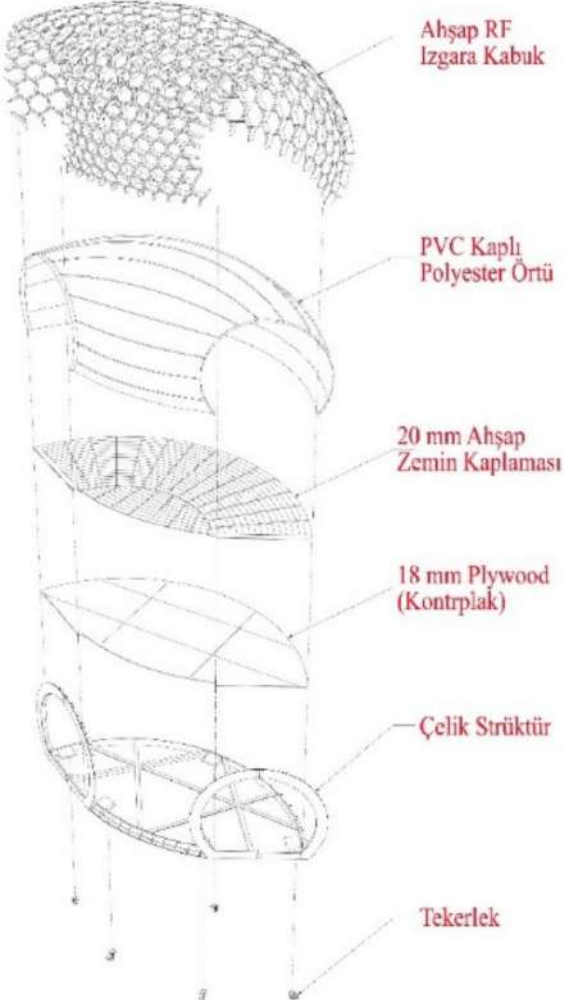
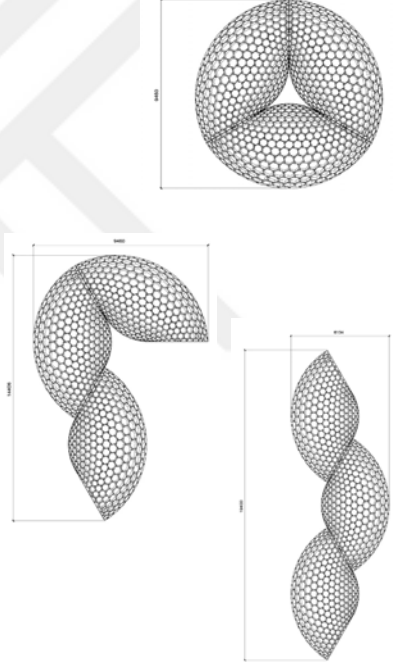


Tablo 17'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Örtü Kullanımı:	Izgara Altında - PVC Kaplı Polyester
		
		
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Izgara Kabuğa Çelik Gergi Bağlantısı
		PVC örtünün dikiş hatlarından ızgara kabuğa gergi ile bağlantı sağlanır. Bazı modüllerin bağlantı penceresine denk gelen bu bağlantı da çelik kablo gergilerin tutturulduğu görülmektedir.



Tablo 17'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Çelik Strüktüre Cıvata Bağlantısı
	 Ahşap RF Izgara Kabuk PVC Kaplı Polyester Örtü 20 mm Ahşap Zemin Kaplaması 18 mm Plywood (Kontrollak) Çelik Strüktür Tekerlek	Ahşap karşılıklı çerçeve yapı zemin kotunun üzerinde kurulan çelik strüktüre cıvatalar ile sabitlenmiştir. Çelik strüktürün altında ise tekerlekler yer almaktadır. Böylece toplam üç bölümden oluşan yapı çeşitli şekilde taşınarak bir araya getirilebilmektedir. 
		



Tablo 18. Mekândan Taşanlar (URL-12, 13, 14, 15)

ÖRNEK NO: 2		YAPI ADI: MEKÂNDAN TAŞANLAR		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
İstanbul, TR	2018	Zehra Karakoç, Emir Alban	23 m ²	Ahşap
Açıklama	Yeditepe Bienali için gerçekleştirilen yapı karşılıklı çerçeve strüktür ilkelerine göre yapılmıştır. Düzgün beşik tonoz formundaki strüktürün ızgara düzeni Selçuk İsa Bey Camiinin pandantiflerindeki geometrik desenlerden ilham alınarak geliştirilmiştir. Toplamda 5,10 metre açıklık geçilen yapının üretim işlemleri robotik CNC cihazı ile gerçekleştirilmiş ve montajı üç günde tamamlanmıştır.			
				
				



Tablo 18'in devamı

IZGARA DÜZENİ

Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:

3 Elemanlı Modül + 6 Elemanlı Modül /
Üçgen + Altıgen

Modül Eleman Türü:

Panel Eleman

Ahşap plakalar 50 cm uzunluğunda olup toplamda 618 plaka kullanılmıştır. Bunlardan 180 tanesi birbirinden farklıdır. Her bir plakanın kesim ve delme işlemleri üç boyutlu modelden alınarak fabrikada robotik CNC cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

Modül Tabaka Sayısı:

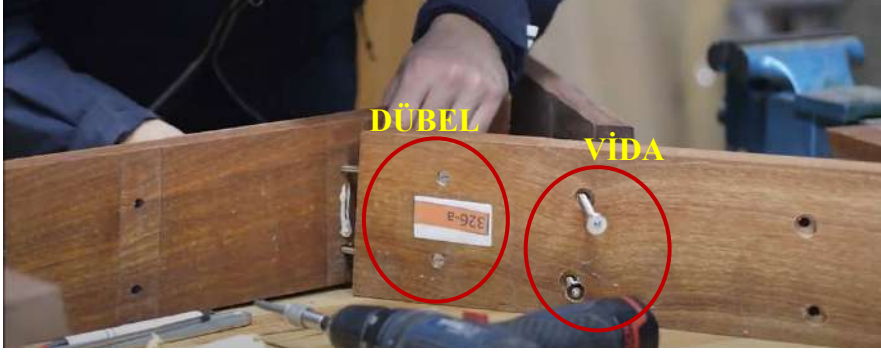
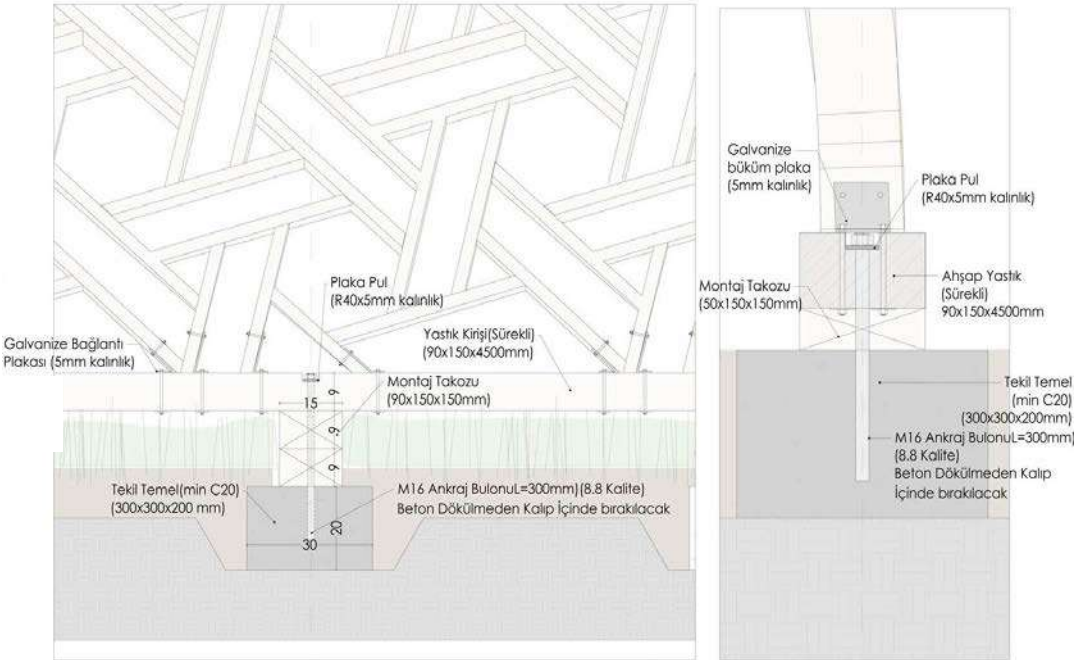
Tek Tabakalı

Izgara Formu:

Tek Eğrilikli



Tablo 18'in devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Dügüm Detayı:	Vida Bağlantısı + Dübel Bağlantısı
		
	İlk olarak önceden delim işlemleri yapılan ahşap panellere metal dübeller takılır. Vidalar yerleştirildikten sonra paneller birbirine geçirilir. En sonda ise vidalarla sıkılarak sistem sabitlenir.	
	Örtü Kullanımı:	Yok
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Yok
	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Betonarme Tekil Temele Bulon/Cıvata Bağlantısı
Kabuk strüktürün iki tarafında da -0.33 ve -0.20 kotlarında betonarme tekil temel dökülmüştür. Beton kalıbı içinde bırakılan ankraj bulonu ile ahşap takozlar ve yastık kirişi arasında bağlantı sağlanmıştır. Karşılıklı çerçeve strüktür yastık kirişine galvanize bağlantı plakaları ile cıvata elemanlarla bağlanmıştır.		
		

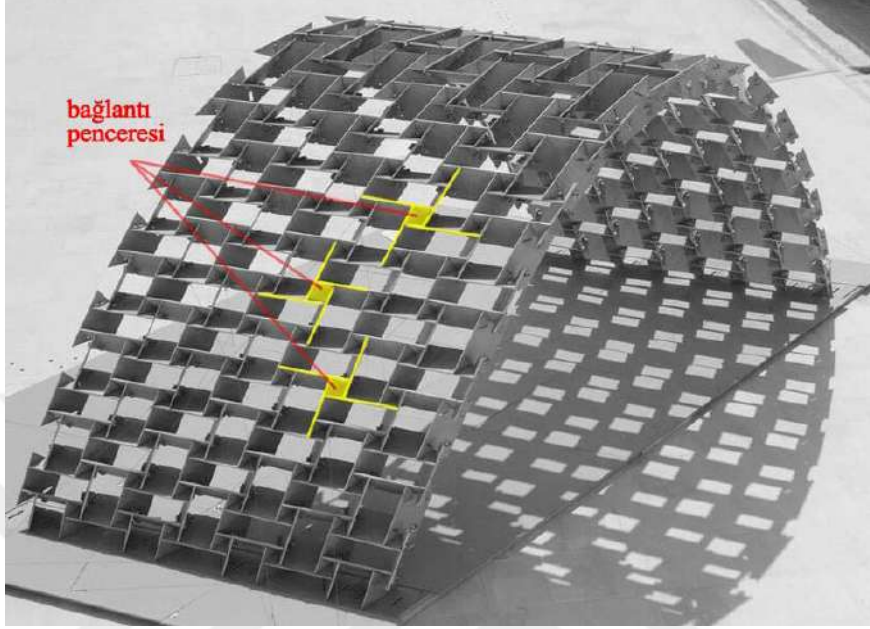
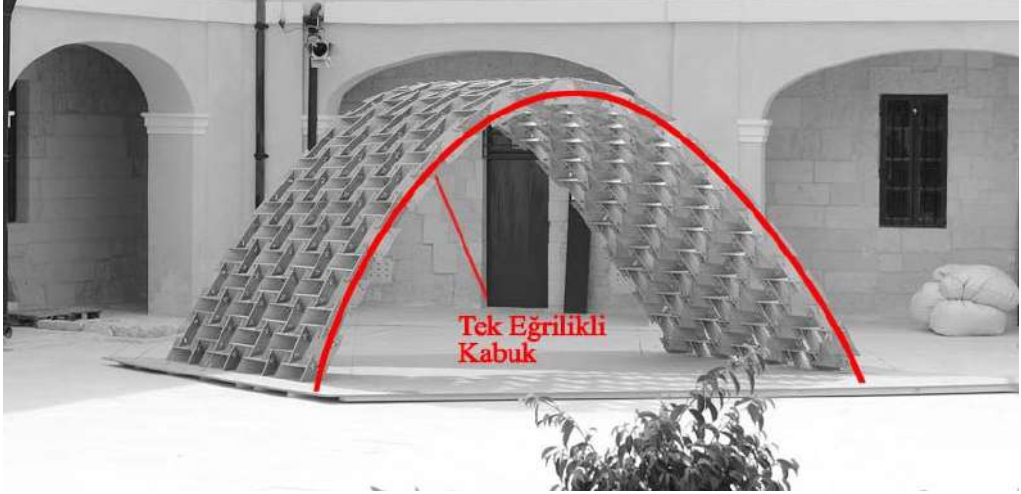


Tablo 19. Plaka Pavyonu (Miodragovic Vella, 2019; Miodragovic ve Kotnik, 2017; URL-16, 17)

ÖRNEK NO: 3		YAPI ADI: PLAKA PAVİLYONU		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Valletta, Malta	2014	Irina Miodragovic Vella, Steve DeMicoli, Toni Kontik	20 m ²	Ahşap – Plywood (Kontrollak)
Açıklama	Malta Tasarım Festivali için yapılan bu geçici yapı tarihi bir yığma yapının yeniden yorumu olarak tasarlanmıştır. Izgara strüktürde yer alan boşluklar ışık ve rüzgâr için geçirgenlik sağlamaktadır. Karşılıklı çerçeve strüktürün prensibine uygun olarak elemanlar birbirini taşıırken diğeri tarafından da taşınmaktadır. Yapıda 5x4 metre ebatlarında açıklık geçilmiştir.			

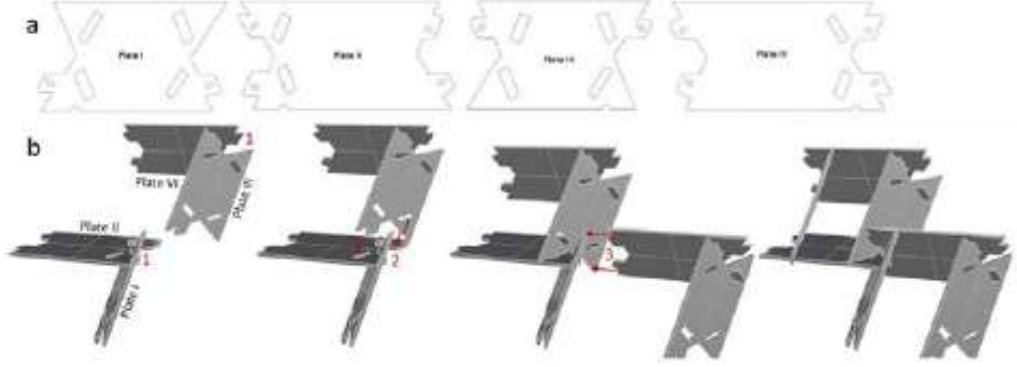
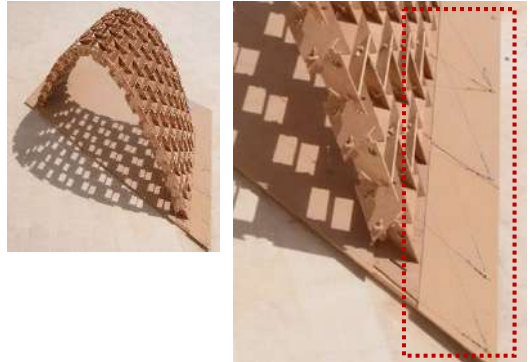


Tablo 19'un devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:	4 Elemanlı Modül / Dörtgen
		
	Modül Eleman Türü:	Panel Eleman
		Parabolik tonoz formundaki karşılıklı çerçeve strüktürde 413 adet kontrplak panel kullanılmıştır. Panellerin dikeyde sapmasını önlemek için en uygun dönme açısı 60° olarak belirlenmiştir.
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
	Izgara Formu:	Tek Eğrilikli
		



Tablo 19'un devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Dügüm Detayı:	Çentik (Kamalı Gömme Zıvana) Bağlantısı
		Kontrplak panel elemanların kenarlarında dişler bırakılmış ve boşluklar oluşturulmuştur. Panellerin boşluklarına komşu panelin diş geçirilmiş ve kama ile kilitlenmıştır. Bu şekilde 4 panel birbiriyle birleşerek modülü ve strüktürü oluşturmuştur.
		
		
	Örtü Kullanımı:	Yok
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Yok
	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Ahşap çıtalar üzerinde geçici şekilde konumlandırılmıştır. Strüktür çelik kablo gergilerle döşemeye tutturulmuştur.
		

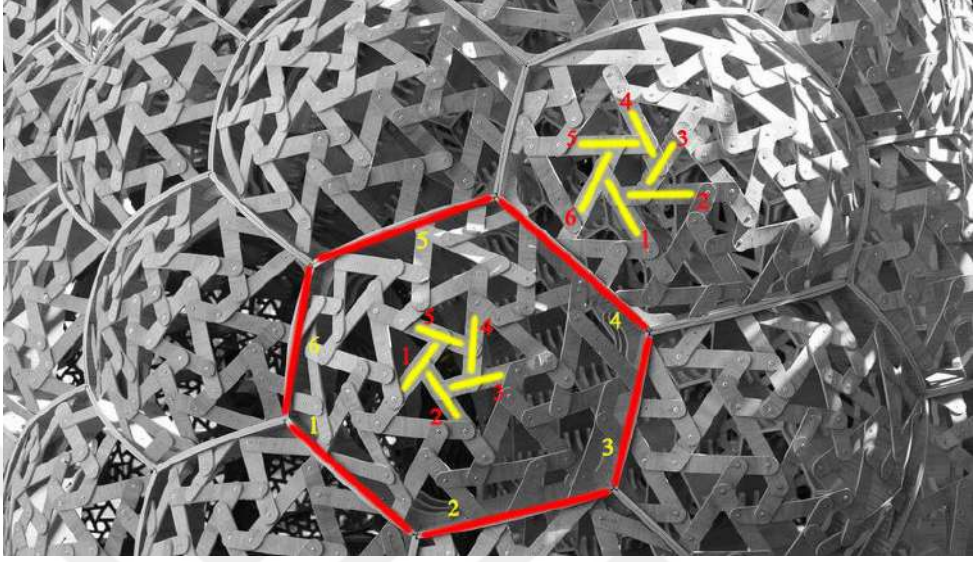
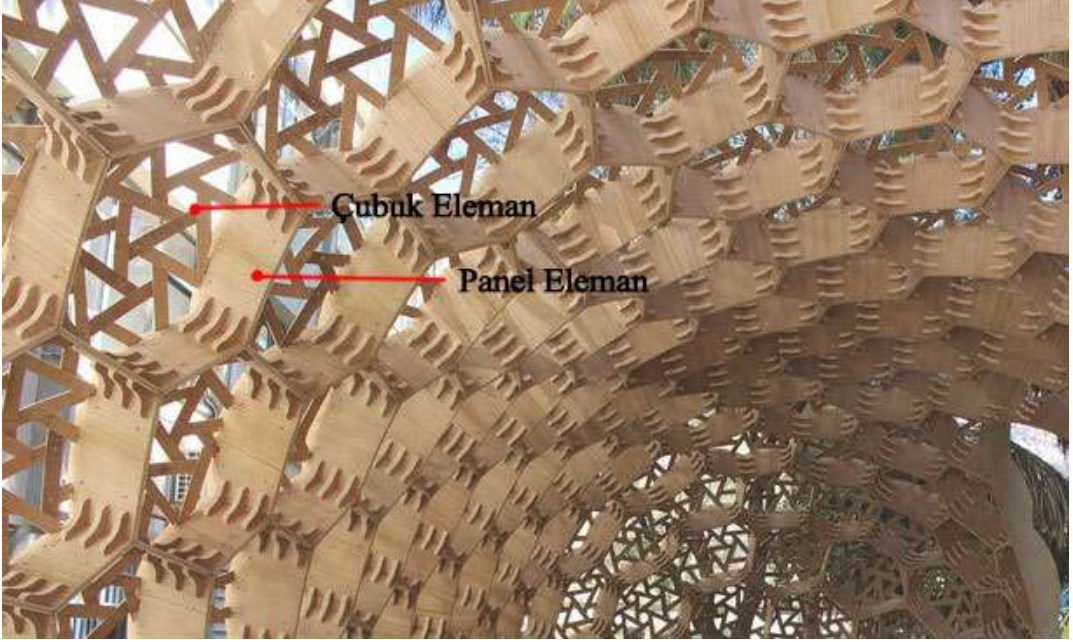


Tablo 20. Kabarcık Pavyonu (URL-18, 19, 20, 21)

ÖRNEK NO: 4		YAPI ADI: KABARCİK PAVİLYONU		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Sevilla, İspanya	2018	Roberto Narváez-Sevilla Üniversitesi	-	Ahşap – Plywood (Kontrplak)
Açıklama	Hesaplamalı ve parametrik tasarım araçlarının kullanım pratiğini artırmak için Sevilla Üniversitesi tarafından gerçekleştirilen projede küresel baloncuk kümelerden oluşan bir pavyon yapı inşa edilmiştir. Yapı formu sabun köpüğünden ilham alınmış ve baloncukların mimariye dönüştürülmesi düşünülmüştür.			

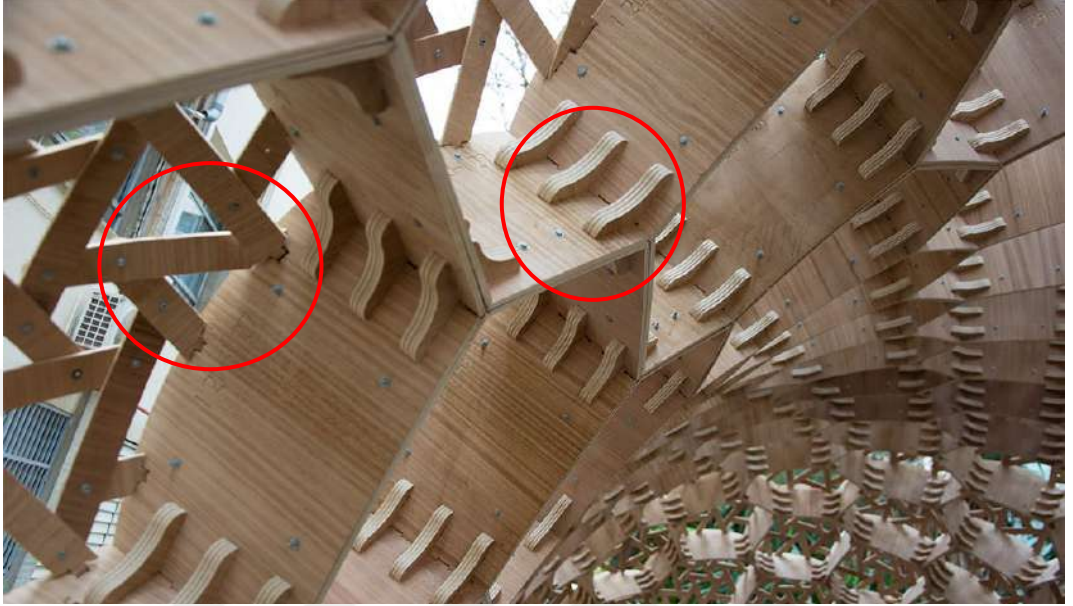


Tablo 20'nin devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:	5, 6 Elemanlı Modüller / Beşgen, Altıgen
		
	Küresel baloncuk kümelerden oluşan karşılıklı çerçeve strüktürde panel elemanlardan oluşan altıgen modüller birbirini destekleyerek bütünlük oluşturmuştur. Bu kümelerin içerisinde çubuk elemanlardan oluşan altıgen ve beşgen üniteler karşılıklı çerçeve örüntü oluşturmuştur.	
	Modül Eleman Türü:	Çubuk Eleman + Panel Eleman
		
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
	Izgara Formu:	Serbest Eğrilikli Kabuk



Tablo 20'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Dügüm Detayı:	Pim Bağlantısı + Vida İle Beraber Ahşap Ara Eleman Kullanımı + Çentik Kullanımı
		
		
		
	Çubuk elemanlar birbirleri üzerine konarak cıvata bağlantısı ile monte edilmiştir. Panel elemanlar birbirleri ile hem cıvata hem de ahşap ara eleman ile birbirine kenetlenmiştir. Ahşap elemanlar panellere vidalanmıştır. Çubuk elemanların panel elemanlara tutturulmasında da çentik detayı kullanılmıştır.	
	Örtü Kullanımı:	Yok
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Yok



Tablo 20'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Strüktür ahşap platform zemin üzerine kendini taşıyacak ve ayakta kalabilecek şekilde yerleştirilmiştir.
		
		
		



Tablo 21. Ejderha Derisi Pavyonu (URL-22, 23, 24, 25)

ÖRNEK NO: 5		YAPI ADI: EJDERHA DERİSİ PAVİLYONU		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Hong Kong	2012	Emmi Keskisarja, Kristof Crolla, Sebastien Delagrangé, Pekka Tynkkynen	16 m ²	Ahşap – Plywood (Kontrplak)
Açıklama	Yapı düzenli şekilde tekrarlayan levhalardan oluşmaktadır. Ahşap levhalar Finlandiya’da üretilip Hong Kong’a gönderilmiş ve orada inşa edilmiştir. Strüktürün ilk versiyonu 8 günde sıfırdan inşa edilirken ve ikinci versiyonunda bölgenin iklimine uygun neme dayanıklı şekilde inşa edilmiştir.			



Tablo 21'in devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:	4 Kenarlı Kavisli Eleman / -
	Modül Eleman Türü:	Levha Eleman
		
	Önceden 148 °C derecede ısıtılan ahşap dörtgen levhalara CNC makinede kavisli bir şekil verilmiştir. Izgara strüktür 163 kontplak levhadan oluşmaktadır.	
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Formu:	Çift Eğrilikli
	Izgara Düğüm Detayı:	Çentik Detayı
		
	Örtü Kullanımı:	Yok
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Yok
	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Yok

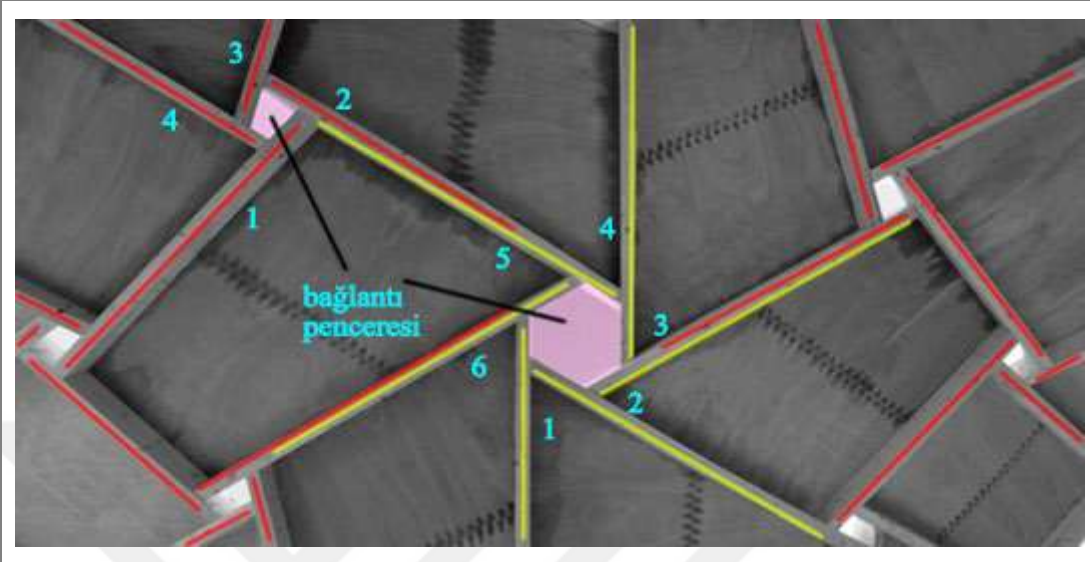
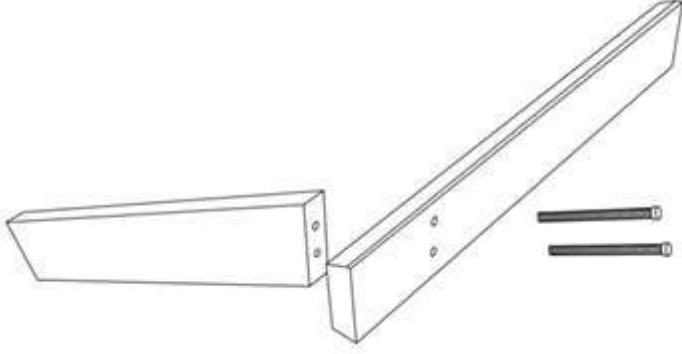
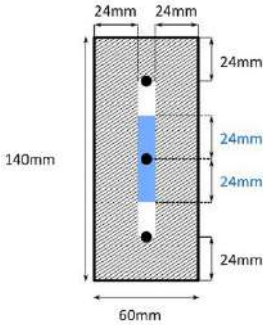


Tablo 22. R2 Pavyonu (Douthe, vd., 2018; Mesnil, vd., 2018a; Mesnil, vd., 2018b)

ÖRNEK NO: 6	YAPI ADI: R2 PAVİLYONU			
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Paris, Fransa	2017	Cyril Douthe, vd.	50 m ²	Ahşap - CLT
Açıklama	“Wooden Shell-Nexorade Hybrid” olarak da bilinen yapı bir araştırma projesinin ürünüdür. Yaklaşık 6,5 metre açıklığa sahip yapıda 14 cm’lik kirişler 5 kg ağırlığındadır. Tüm strüktür ise yaklaşık olarak 15 kg/m² ağırlığındadır. Sağ ve sol yönlü ünitelerden oluşmaktadır. Kirişler robotik fabrikasyonla üretilmiştir. Ünitelerin bağlantı uzunluğu 0,2 metre civarındayken 6 elemanlı ünitelerde bu değer 0,25 m civarında olmaktadır. Projenin analizleri kendi ağırlığı, kar yükü ve rüzgar yüküne göre yapılmıştır.			

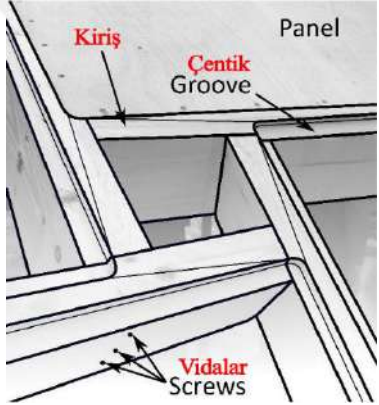


Tablo 22'nin devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi: 4, 6 Elemanlı Modül / Dörtgen, Altıgen	
		
	Modül Eleman Türü:	Çubuk Eleman
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
	Izgara Formu:	Çift Eğrilikli
BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Düğüm Detayı:	Vida Bağlantısı
	 	
	 Vida düzeni için geometrik kısıtlamalar şekildeki gibidir. Mavi alan vidalar arasındaki minimum boşluğu ifade ederken, vidalar için kabul edilebilir alanlar beyaz alanla gösterilmiştir. Vidalar için rehber olacak delikler inşa aşamasından önce robotik üretim makineleri ile delinmiştir. Böylece inşa esnasında kolaylık sağlanmıştır.	



Tablo 22'nin devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Örtü Kullanımı:	Izgara Üzerinde - Kontrplak Panel
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Çentik Detayı + Vida Bağlantısı
		Çentik detayına takılan paneller kirişlere vidalanarak sabitlenmiştir.
		
		
	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Cıvata Bağlantısı
	  	
	CLT kirişler zemine monte edilen çelik ara elemanlara cıvata ile sabitlenmiştir.	

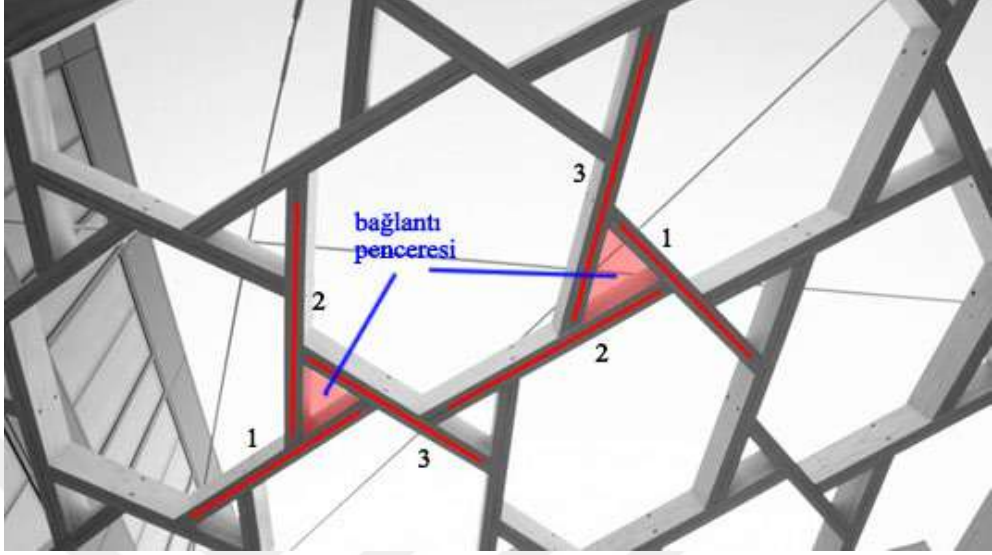
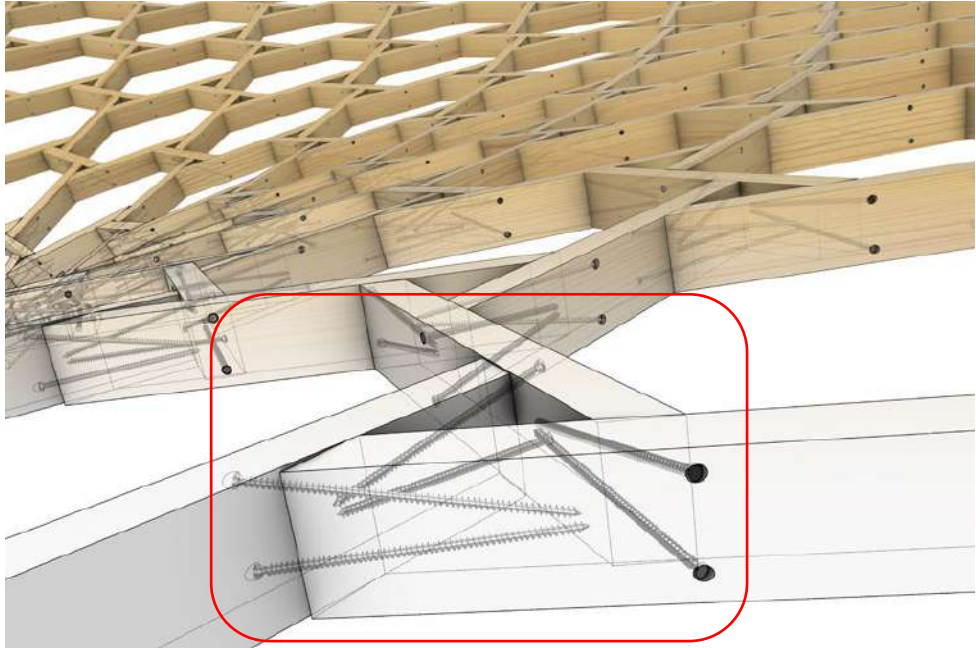


Tablo 23. Gelecek Ağacı (URL-26, 27)

ÖRNEK NO: 7		YAPI ADI: GELECEK AĞACI		
Yapım Yeri	Yapım Yılı	Mimari Tasarım	Yapı Alanı	Yapı Malzemesi
Zürih, İsviçre	2019	Gramazio Kohler Research, ETH Zurich	107 m ²	Ahşap -
Açıklama	En yeni tasarım teknikleri, malzeme bilimi ve robotik üretim esaslı proje bir robot tarafından inşa edilen huni şeklinde bir strüktürdür. Birbirinden farklı geometrideki elemanlar dijital modelden alınan verilere göre robot tarafından konumlandırılmıştır. Örtü bal peteği desenindedir. Merkezdeki modüllerin bağlantı uzunluğu daha azken dışarı doğru gidildikçe modüllerin bağlantı uzunluğu artmaktadır.			

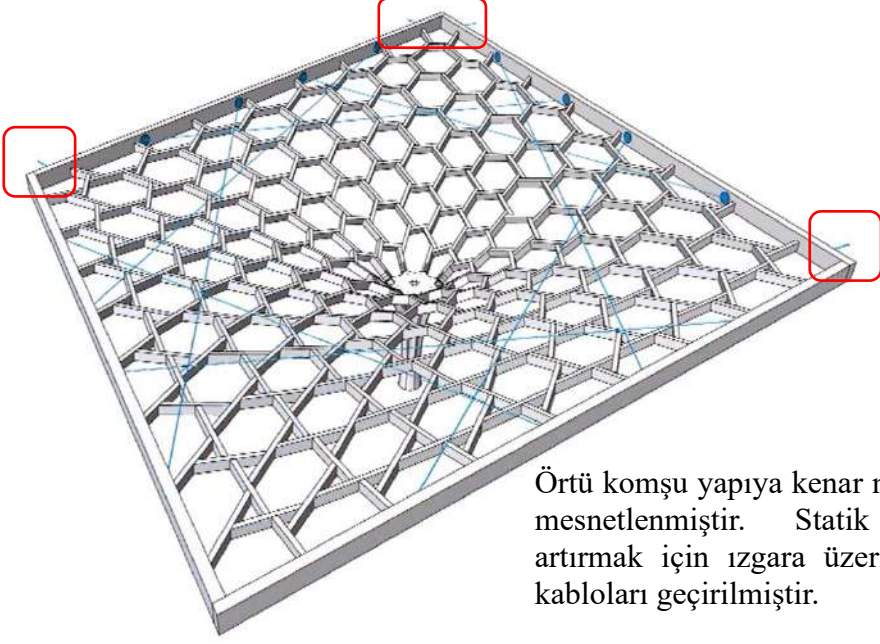
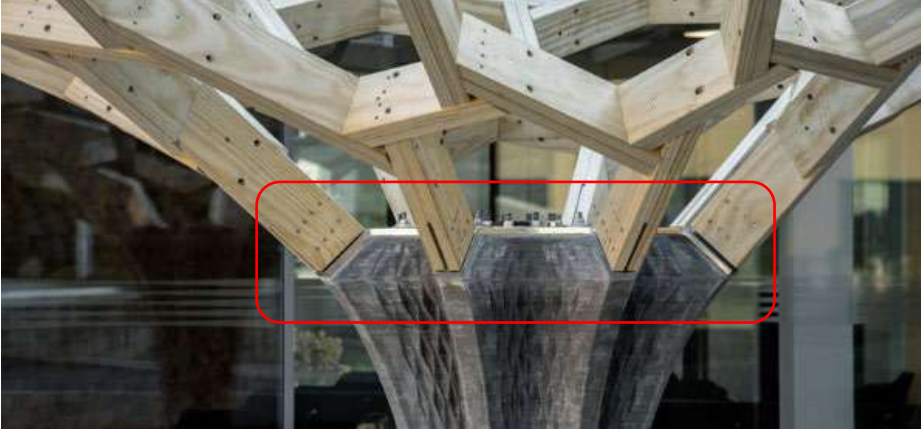


Tablo 23'ün devamı

IZGARA DÜZENİ	Modül Eleman Sayısı / Geometrisi:	3 Elemanlı Modül / Üçgen
		
	Modül Eleman Türü:	Panel Eleman
	Modül Tabaka Sayısı:	Tek Tabakalı
	Izgara Formu:	Çift Eğrilikli
BAĞLANTI NOKTASI	Izgara Düğüm Detayı:	Vida Bağlantısı
		
380 tane su emmeye karşı dayanım sağlayan asetilenme işleminden geçirilen ahşap eleman birbirlerine vidalar ile sabitlenmiştir.		



Tablo 23'ün devamı

BAĞLANTI NOKTASI	Örtü Kullanımı:	Yok
	Izgara ve Örtü Elemanı Bağlantı Detayı:	Yok
	Strüktür-Çevre İlişkisi / Bağlantı Detayı:	Çelik Plaka Kullanımı + Vida Bağlantısı + Cıvata Bağlantısı
	 Örtü komşu yapıya kenar noktalarından mesnetlenmiştir. Statik bütünlüğü artırmak için ızgara üzerinden germe kabloları geçirilmiştir.	
	 	
	 Ultra ince 3D baskılı kalıba beton dökülerek bir kolon oluşturulmuştur. Kolon üzerine çelik plaka yerleştirilmiş ve bu plaka kolonun ortasında cıvata ile sabitlenmiştir. Ahşap paneller ise çelik plakalara vidalar ile sabitlenmiştir.	



3. BULGULAR VE İRDELEMELER

Yapılan çalışmalar bölümünde incelenen ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin özellikleri, bağlantı detay türleri ve incelenen örnekler ile ilgili bulgulara ulaşılmış ve irdelenmiştir. Bulgular ve irdemeler ile ilişkin başlıklar;

- Örneklere ait genel bilgiler ile ilgili bulgular ve irdemeler,
- Strüktür ızgara düzenleri ile ilgili bulgular ve irdemeler,
- Strüktür bağlantı detay türleri ile ilgili bulgular ve irdemeler,

şeklindedir.

3.1. Örneklere Ait Genel Bilgiler ile İlgili Bulgular ve İrdemeler

2012-2019 yılları arasında yer alan 7 karşılıklı çerçeve strüktür pavyon yapı ile ilgili elde edilen genel bulgular tablo 24’te gösterilmiştir. Bu strüktürler yapı alanlarından anlaşılacağı üzere küçük ve orta ölçekli pavyon yapılarıdır. 7 yapının 3’ünde kontrplak malzeme kullanılmıştır. Yapılarda çoğunlukla modül eleman türü olarak panel elemanlar tercih edilmiştir. Örneklerde örtünün olduğu ve olmadığı iki farklı kullanım şekli görülmüştür. Örnek yapıların üretim aşamalarında robotik-insan gücü ile üretim, sadece insan gücü ile üretim şeklinde iki çeşit üretim görülmüştür. Bu üretim biçimlerinde çoğunlukla robotik üretimin elemanların şekillendirilmesinde ve bir araya getirilmesinde kullanıldığı görülmüştür. Strüktürlerin zemin ile olan ilişkilerinde ahşabın zemin altındaki bağlantısı çoğunlukla çelik ara elemanlarla sağlanmıştır. Yapıların formları eğriliklerine göre tek, çift ve serbest şeklinde üç çeşittir. Örneklerin 2 tanesi tek eğrilikli, 1 tanesi serbest eğrilikli ve 4 tanesi çift eğrilikli olarak değerlendirilmiştir.



Tablo 24. Örneklere ait genel bilgiler ile ilgili bulgular

Örnek No	Yapım Yılı	Yapı Alanı (m ²)	Ahşap Malzeme	Izgara Formu
1	2012	60	Masif Sarıçam	Çift Eğrilik
2	2018	23	-	Tek Eğrilik
3	2014	20	Kontrplak	Tek Eğrilik
4	2018	-	Kontrplak	Serbest Eğrilik
5	2012	16	Kontrplak	Çift Eğrilik
6	2017	50	CLT	Çift Eğrilik
7	2019	107	-	Çift Eğrilik

- 1) “ – ” işareti ulaşılamayan/tespit edilemeyen bilgileri ifade etmektedir.
2) “Yok” ifadesi yapıda bahsedilen özelliğin bulunmadığını ifade etmektedir.

Elde edilen bulgularla ilgili irdelemeler ise şu şekildedir;

İnşa edilmiş pavyon yapı strüktürlerin yapı alanları göstermektedir ki karşılıklı çerçeve strüktürlerin modern uygulamalarında büyük ölçekli yapılara geçilememiştir. Yapı alanları 16 m² ile 107 m² arasındadır. Küçük ölçekli bu geçici yapılarda yapısal ahşap ürünlere oranla genelde kontrplak malzeme tercih edilmiştir. Bunun sebebi yapısal ahşap ürünlere kıyasla kolay işlenebilir, ucuz ve erişebilir olmasıdır. Modüler sistemlerde yapım ve söküm aşamasında da kontrplak gibi hafif malzemeler kolaylık sağlamaktadır.

3.2. Strüktür Izgara Düzenleri ile İlgili Bulgular ve İrdelemeler

Literatür taramasında ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin ızgara düzenini etkileyen geometrik ve biçimsel parametrelerin olduğu görülmüştür. Geometrik parametreler ünitelerin nicel verileri ile ilgiliyken, biçimsel parametreler nitel verilerle ilgilidir. Geometrik parametreler; kiriş sayısı, dış ve iç yarıçaplar, dış desteklerden kesişim noktasına olan dik yükseklik, eksantriklik, kiriş boyu, bağlantı açıklığı ve bağlantı uzunluğu, ünitelerin yönelişi ve dönüş yönü şeklindedir. Örneklerde bu bilgilere ulaşılamadığından geometrik parametreler kapsam dışında bırakılmıştır. Tez çalışmasında örnek incelemelerinde biçimsel parametreler ele alınmış, bu parametreler modül eleman sayısı ve modülün biçimsel



geometrisi, modül eleman türü ve elemanların biçimi, sistemin tabaka sayısı ve örtü elemanı kullanımı olarak analiz edilmiştir (tablo 25).

İncelenen yapılarda modül eleman sayıları en az 3 ve 6 arasında değişmektedir. Modül eleman sayısı örneklerin 4 tanesinde panel, 1 tanesinde levha, 1 tanesinde çubuk, 1 tanesinde hem panel hem çubuk eleman şeklindedir. Örneklerde halka ve blok eleman kullanımı görülmemiştir. Strüktürlerin tabaka sayıları 7 yapıda da tek tabakalı şeklinde değerlendirilmiştir. Örtü elemanı kullanılan 2 yapının birinde örtü ızgara üzerinde konumlandırılmıştır. Diğerinde ise ızgara altında konumlandırılmıştır. Örtü kullanılan 2 yapıda örtü elemanları kontrplak ve PVC kaplı polyester şeklinde farklı yapı malzemelerinden seçilmiştir. 7 yapının 5'inde örtü elemanı kullanılmamıştır.

Tablo 25. Strüktür ızgara düzenleri ile ilgili bulgular

Örnek No	Modül Eleman Sayısı	Modülün Biçimsel Geometrisi	Modül Eleman Türü	Modül Eleman Biçimi	Tabaka Sayısı	Örtü	Örtünün Konumu
1	3	Düzgün olmayan üçgen	Panel	Düzlemsel	Tek	PVC Kaplı Polyester	Izgara Altında
2	3, 6	Düzgün olmayan çokgen	Panel	Düzlemsel	Tek	Yok	Yok
3	4	Düzgün dörtgen	Panel	Düzlemsel	Tek	Yok	Yok
4	5, 6	Düzgün olmayan çokgen	Çubuk, Panel	Düzlemsel	Tek	Yok	Yok
5	4	-	Levha	Eğrisel	Tek	Yok	Yok
6	4, 6	Düzgün olmayan çokgen	Çubuk	Düzlemsel	Tek	Kontrplak	Izgara Üzerinde
7	3	Düzgün olmayan üçgen	Panel	Düzlemsel	Tek	Yok	Yok

- 1) “-” işareti ulaşılamayan/tespit edilemeyen bilgileri ifade etmektedir.
2) “Yok” ifadesi yapıda bahsedilen özelliğin bulunmadığını ifade etmektedir.

Bu bilgiler göz önünde bulundurularak biçimsel parametrelerle ilgili elde edilen irdelemeler şu şekildedir;

Diğer değişkenler (açıklık, geometrik parametreler, modül eleman türü ve biçimi, modülün biçimsel geometrisi, ızgara formunun tasarımı vb.) sabit ise modül eleman sayısı



arttıkça eksantriklik ve eğim artar, bağlantı uzunluğu azalır. Böylece bağlantı uzunluğu kısalacağı için ya da kenar uzunluğu azalacağı için modüllerin birbirine bağlantısı ve eklenmesinde zorluk artmaktadır.

Panel, çubuk, levha elemanlar tekil parçalar halinde birer kiriş olarak değerlendirilebilmiş. Kapalılık bu elemanların malzemenin en, boy, yükseklik ölçüleri ile sınırlı kalmıştır.

Analizlere ek olarak literatür kısmında elde edilen verilerin ışığında ünitelerde tek değişken bağlantı uzunlukları olduğunda bile farklı ölçeklerde örüntüler oluşabilir. Bağlantı uzunluğu arttıkça ünitenin kapladığı alan artar ve strüktür ölçeği genişler. Bu durumda da elemanların boyutları uzayacağı için rijit detayların eklenmesi gerekir. Ünitelerin aşağı ya da yukarı yönlü oluşu strüktürün eğriliğinde fark yaratabilir. Aşağı yönlü örüntülerde kavis aşağı olurken yukarı yönlü ünitelerde kavis yönü yukarıda olur. Tüm bu parametreler tek başına ızgara düzenini etkilese de birlikte farklı şekilde kullanımları da ızgara düzenini etkilemektedir.

Farklı modül eleman türü kullanımları (çubuk, panel, levha) farklı görünümeler meydana getirmiştir. Modül elemanın biçimi düzlemsel, eğrisel ya da farklı kesitlerde olabilir. Örneklerde tüm yapılar tek tabakalı olarak değerlendirilmiştir. Sistemdeki tabaka sayısı detay çeşidini artırmaktadır. Örtü elemanları kullanımına bağlı olarak ızgara üzerinde, altında ya da ızgarayla bütünleşik şekilde konumlanabilir. Örtünün varlığı da bir tabaka olarak değerlendirilebilir. Izgara üzerinde yer alan örtüler ahşap elemanları çevresel etkenlerden koruyabilirken ızgara altında yer alan örtüler bu işlevi yerine getiremez. Bu sebeple örtü ızgara altında yer alacaksa ya da örtü elemanı kullanılmayacaksa ahşabın dış etkenlere karşı korunması için başka işlemler düşünülmelidir. Geçici yapılar oldukları için bu işlemler bazı örneklerde tercih edilmemiştir. İncelenen örneklerde yapılar üst örtü ya da kabuk şeklinde bütün bir sistem olarak çalışmaktadır.

3.3. Strüktür Bağlantı Detay Türleri ile İlgili Bulgular ve İrdelemeler

Bağlantı detaylarına ilişkin aktarılan bilgiler özetlenecek olursa üst üste koyma, bağlama kolu kullanımı, dübel ve plaka kullanımı, çentik kullanımı şeklinde 4 ana başlıkta



detaylar sınıflandırılmıştır (tablo 26). Detaylar tek başlarına kullanılabildiği gibi birlikte de kullanım örneklerinin olduğu özel detaylar da mevcuttur. İncelenen örneklerin 5’inde dübel ve plaka detayı (cıvata, çivi, vida, dübel, plaka), 3 tanesinde çentik detayı kullanılmıştır. Örneklerin hiçbirinde üst üste koyma ve bağlama kolu detayı kullanılmamıştır. Örneklerin 7 tanesinde kullanılan örtü elemanlarının bağlantı detaylarında vida kullanımı, çelik gergi kullanımı ve çentik detayı vardır.

Tablo 26. Strüktür bağlantı detay türleri ile ilgili bulgular

Örnek No	Modül Bağlantı Türü	Örtü Bağlantı Türü	Strüktür-Zemin Bağlantı Türü
1	Cıvata, Dübel	Çelik Gergi	Cıvata
2	Vida, Dübel	Yok	Bulon/Cıvata
3	Çentik	Yok	Çelik Gergi
4	Pim, Vida, Çentik	Yok	-
5	Çentik	Yok	Yok
6	Vida	Çentik, Vida	Cıvata
7	Vida	Yok	Çelik Plaka, Vida, Cıvata

1) “ – ” işareti ulaşılamayan/tespit edilemeyen bilgileri ifade etmektedir.

2) “Yok” ifadesi yapıda bahsedilen özelliğin bulunmadığını ifade etmektedir.

İncelenen ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin bağlantı detay türleri ve literatürde yer alan özellikleri ile ilgili elde edilen veriler detayın özelliği, detayın üretimi, sağladığı rijitlik, montaj ve demontaj kolaylığı, yeniden kullanım durumu, estetik görünüm şeklindeki avantaj ve dezavantajlar üzerinden irdelenmiştir.

Seçilen örnekler içerisinde üst üste koyma detayı ve bağlama kolu detayına rastlanmamıştır. Dübel ve plaka kullanımında kirişler dübel, çivi, vida, cıvata, plaka gibi ara elemanlar sayesinde birleştirilir. Eksantriklik tasarıma bağlıdır, bağlantı detayı düzlemsel ve eğrisel sistemlerde uygulanabilir. Daha rijit bağlantılar sağlanırken ara elemanların boyutlarının küçük olması estetik açıdan ahşapla uyumludur ve hızlı kurulum sağlanır. Sabitlenen ara elemanların demontajı görece daha zordur. Kirişlere boşluklar açıldığı için deforme olabilir ve yeniden kullanımda sıkıntı yaşanır.



Çentik detayında kirişler birbiri üzerine bindirilirken çentikler açılarak birleşim sağlanır. Çentik derinliğine bağlı olarak eğim değişebilir. Montajı kolaydır ve önceden kirişlerin kesimi yapılabilir. Rijitlik sağlar ve ek elemanların üretimine gerek kalmaz. Estetik açıdan homojen bir görüntü sağlar. Kirişlerin doğru açıda, uzunluk ve mesafede boşluklarının açılması için detaylı tasarım gerektirir. Kullanılan çentik kirişin yük taşıma kapasitesini azaltır. Kirişlerde açılan boşluklar yeniden kullanımda dezavantaj sağlar.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ahşabın yapı malzemesi olarak kullanılması yıllar öncesine dayanmaktadır. Ahşap strüktürlerin gelişiminde teknolojinin gelişmesi büyük rol oynamıştır. Günümüzde farklı biçimsel ve geometrik özelliklere sahip strüktür kurgularından bahsetmek mümkündür. Bunlardan biri de ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerdir. Kullanımı çok eskiye dayanan bu strüktür sistemi yıllar içinde farklı şekillerde isimlendirilmiştir.

Strüktür sistemlerinde taşıyıcı ögeler yük taşıyorken kendisi de başka elemanlar tarafından taşınır. Örneğin kolon kirişi taşıyorken kendisi yükleri temele iletir (Türkçü, 2017). Bu durum karşılıklı çerçeve strüktürlerde ise farklıdır; tüm taşıyıcı ögeler/elemanlar/kirişler bir diğerini taşıırken kendisi de başka bir eş eleman tarafından taşınır.

Karşılıklı çerçeve strüktürler çoğunlukla örtü elemanı olarak kullanılsa da farklı yapı türlerinde de tercih edilmektedir. Farklı yapı malzemelerinin de kullanılabildiği sistemde ağırlıklı olarak kolay elde edilebilen, işlenebilen, ucuz ve sürdürülebilir bir malzeme olan ahşap tercih edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında karşılıklı çerçeve strüktürle ilgili literatür taraması yapılmış, strüktürün çeşitli özelliklerinden bahsedilmiştir. Izgara düzeni ve bağlantı detayı üzerinden bilgiler verilmiş ve 7 ahşap pavyon yapı incelemesi yapılmıştır. Elde edilen veriler bulgular ve irdelemeler kısmında aktarılmıştır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar dört başlık altında sunulmuştur. Bunlar;

- Örneklere ait genel bilgiler ile ilgili sonuçlar ve öneriler,
- Strüktür ızgara düzenleri ile ilgili sonuçlar ve öneriler,
- Strüktür bağlantı detay türleri ile ilgili sonuçlar ve öneriler,
- Genel sonuçlar ve öneriler,

şeklindedir.



4.1. Örneklere Ait Genel Bilgiler ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler

- 2005 öncesine ait ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlere pavyon yapılarında rastlanılmamıştır. İncelenen güncel örneklerin tipolojisi geçmiş uygulamalardan farklılaşmaktadır. Modern ve çağdaş etkin yapı örneği uygulamada eksik kalmıştır. Strüktür sisteminin gelişebilmesi için uygulamalarının artması gerekmektedir.
- Ahşap malzemeye erişimin ucuz ve kolay olduğu coğrafyalarda ahşap strüktürlerin hepsinde olduğu gibi karşılıklı çerçeve strüktürlerde de ilerleme katedilmiştir.
- Ahşap malzemenin farklı türleri strüktürlerde kullanılmıştır. Çoğunlukla kolay şekil alan, işlenebilen ve hafif olan kontrplak tercih edilmiştir. Yapısal ahşap ürünlerin seçiminde strüktürün ağırlığı artmaktadır ve geçici pavyon yapılarda kolay montaj ve demontaj için istenmeyen bir durumdur.
- Büyük ölçekli örneklerin olmama sebebi; bağlantı detay türlerinde bu kapsamda rijit bir çözüm olmaması ve karşılıklı çerçeve strüktürlerin doğası gereği kısa ve süreksiz kirişlerden/elemanlardan oluşmasıdır.
- Geçici strüktürel öğeler oldukları için pavyon yapılarında örtü kullanımı nadirdir.
- Strüktür ve çevre ilişkisinde ahşabın zemin ve çevresel etkilerden korunup ayrılması üzerine detaylar tasarlanmalıdır.

4.2. Strüktür Izgara Düzenleri ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler

- Karşılıklı çerçeve strüktürler özelinde farklı form bulma yöntemleri vardır. Izgara şeklinde referans geometrik örüntülerden yararlanılarak karşılıklı çerçeve örüntüler oluşturulur. Form bulma çalışmaları günümüzde parametrik tasarımla ilişkili dijital yazılım programlarıyla kolayca gerçekleştirilmektedir.
- Üniteyi oluşturan eleman sayısı/geometrisi, elemanın türü, tabaka sayısı, örtü elemanının varlığı ızgara düzenini etkileyen biçimsel parametrelerdir.
- Ünitelerin yönlenişine, sağa-sola dönüşüne göre çeşitleri bulunmaktadır.



- Sistemin geometrik parametrelerinden üniteyi oluşturan elemanlar arasındaki eksantriklik değeri arttıkça eğim artarken, bağlantı uzunlukları arttıkça eğim azalır.
- Ünite iç yarıçapı giriş sayısını etkiler. İç yarıçap ve giriş sayısı arttıkça eğim azalır.
- Geometrik parametreler üniteleri tanımlar ve parametreler değiştikçe strüktür de değişir.
- Günümüzde tasarım, ağırlıklı olarak dijital araçlar, yapım/üretim de robotik araçlar ile sağlanabilmektedir. Tasarım ve üretim süreci yinelemeli ve geri dönüşlerle beslenen bir iş akışını kapsar.
- Yeniden kullanım için sökülüp takılabilir şekilde inşa edilebilirler.
- Üretim biçimi ve imkânları tasarım kararını etkilemektedir. Bahsedilen tüm bu özellikler birbirini takip eden ve geri bildirimler besleyen bir iş akışına sahiptirler.
- Dolayısıyla karşılıklı çerçeve strüktürlerin tasarımında tüm bu değişkenlere hakim olup bütüncül şekilde kararlar alınmalıdır.

4.3. Strüktür Bağlantı Detay Türleri ile İlgili Sonuçlar ve Öneriler

- Detay çözümlerinde ana etkenlerden birinin ızgara düzenindeki modül elemanın türü ve biçimi olduğu değerlendirilmiştir. Bağlantı uzunluğu, tabaka sayısı, örtü elemanı gibi diğer verilerin ise eleman türünün biçiminden etkilenen ikincil veriler olduğu düşünülmektedir. Örneğin çubuk ya da levha türü elemanın kullanımı örtü elemanın varlığını etkilemektedir. Çünkü bu elemanlar yapı için gerekli kapalılığı isteniyorsa sağlayabilmektedirler. Tam kapalılığı sağlamış elemanların üzerine eklenmiş örtü elemanları ise tasarım kararları, ahşap elemanı çevresel etmenlerden korumak gibi gerekçelerdir.
- Bağlantı detaylarının üretim aşamasında kolaylık sağlayan geri sökülebilir ve yeniden kullanabilir özelliklerde olması önemlidir.
- Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerle ilgili bağlantı detayları 4 başlıkta incelenmiştir. Bunlar; üst üste koyma, bağlama kolu kullanımı, dübel ve plaka



kullanımı, çentik kullanımı şeklindedir. Bu detaylar karma şekilde kullanılarak özel detaylar da elde edilmektedir. İncelenen yapılarda üst üste koyma ile dübel ve plaka kullanımı detaylarına rastlanılmamıştır.

- Analiz edilen pavyon yapılarda yeterli rijitliği ve statik bütünlüğü sağlayamayacağı için üst üste koyma detayı kullanılmamıştır.
- Çentik bağlantısı, bazı örneklerde rijitliği sağlamak için ek elemanlarla birlikte kullanılmıştır. Tek başına çentik detayının olduğu yapılarda gömme zıvana detayında olduğu gibi ahşap kamaların sabitleme için kullanıldığı görülmüştür.
- Çağdaş ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin dijital fabrikasyonla birlikte geliştiği tespit edilmiştir.
- Üst üste koyma detayı ve bağlama kolu kullanımına seçilen örnek yapılarda rastlanılmamıştır. Dübel ve plaka kullanımında ahşap dübel ve kamalar, çivi, vida, cıvata ve delikli metal plakalar gibi ara elemanlar yer alır. Bu elemanların her birinin farklı çeşitleri vardır.
- Çentik kullanımında elemanların birleştiği noktalarda boşluk açmak, frezelemek, yarım bindirme ya da gömme-zıvana gibi detaylardan bahsedilebilir. Bu şekilde elemanlarda açılan boşluklarda ahşabın dayanımına etkisi de hesap edilmelidir.

4.4. Genel Sonuçlar ve Öneriler

Çalışma kapsamında anlaşılmaktadır ki yapım prensibi çok eskilere dayanan bu sistemin çağdaş ve büyük ölçekli kalıcı yapılarda kullanımı çok azdır. Dünya üzerinde bu konuda çalışma ve üretim yapan araştırmacıların aksine Türkiye’de karşılıklı çerçeve strüktürler üzerine çok az sayıda literatür çalışması yapılmıştır. Bu kapsamda Türkiye’deki mimarlık üzerine eğitim veren kuruluşlarda lisans ve lisansüstü düzeyde bu yapım sisteminin gelişmesi için çalışma alanları açılmalıdır.

Geniş ölçekli yapı örneklerinin olmamasının sebeplerinden birisi yapı sisteminin henüz bu alanda çözüm ve tasarımların geliştirilmemiş olmasıdır. Ahşap karşılıklı çerçeve strüktürlerin gelişmesi ve büyük ölçekli kalıcı yapıların yapılabilmesi için dayanımı yüksek



endüstriyel ahşap ürünler kullanılmalı ve rijit bağlantı detayları geliştirilmelidir. Form bulma süreçlerinde dijital tabanlı etkin yöntemlerin geliştirilmesi ve tasarımcıların bu süreçleri öğrenmesi gerekmektedir. Sayısal tasarım çalışma alanlarında ele alınan konunun karşılıklı çerçeve strüktürler üzerine olmasının büyük bir ilerleme sağlayacağı düşünülmektedir. Sürdürülebilir ve enerji etkin tasarımların günümüzde daha çok değer kazandığı ortadayken ahşabın da bu süreçlere dahil edilmesi oldukça önemlidir.

İncelenen çalışmalarda ve yapılarda karşılıklı çerçeve strüktürler modüllerin çoğalarak bir örüntü oluşturmalarıyla elde edilir. Bu da tasarımcıya istenilen formu bu strüktür sistemine uyarlama olanağı vermektedir. İncelenen pavyon yapıların çoğunda tasarımda ilham olarak doğal unsurlar ele alınmıştır. Bununla ilişkili olarak gelecekte yapılacak çalışmalarda mimarlığın ilgilendiği diğer alanlarla karşılıklı çerçeve strüktürlerin ilişkilendirilebileceği ön görülmektedir. Örnek olarak biyomimikri özelinde ve parametrik tasarım uygulamalarıyla karşılıklı çerçeve strüktürlerin ele alınabileceği düşünülmektedir.



5. KAYNAKLAR

- Asefi, M. ve Bahremandi-Tolou, M., 2019. Design Challenges of Reciprocal Frame Structures In Architecture, Journal of Building Engineering, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100867>
- Başoğlu, E. F., 2021. İslami Geometrik Doku Esaslı Geçmeli Strüktür Önerisi, Yüksek Lisans Tezi, FSMVÜ, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baverel, O.L.S., 2000. Nexorades: A Family Of Interwoven Space Structures, Doktora Tezi, University Of Surrey, Department Of Civil Engineering, Guildford.
- Baverel, O. ve Larsen, O.P., 2011. A Review Of Woven Structures With Focus On Reciprocal Systems – Nexorades, International Journal Of Space Structures, 26, 4, 281-288.
- Baverel, O. ve Nooshin, H., 2007. Nexorades Based on Regular Polyhedra, Nexus Network Journal, 9, 281-298.
- Baverel, O. ve Pugnale, A., 2014. Reciprocal Systems Based on Planar Elements: Morphology and Desing Explorations, Nexus Network Journal, 16, 179-189. <https://doi.org/10.1007/s00004-014-0184-x>
- Bowne, X., Popovic Larsen, O. ve Castriotto, C., 2021. Utilising Waste Wood Through Reciprocal Frame Systems, IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures, Ağustos.
- Carling, O., Gross, H., Lehtonen, V., Holmestad, A. ve Sundström, T., 2001. Nordic Glulam Handbook, Stockholm.
- Castriotto, C., Tavares, F., Celani, G., Popovic Larsen, O. ve Browne X., 2022. Clamp Links: A Novel Type Of Reciprocal Frame Connection, International Journal of Architectural Computing, 20, 2, 378-399. <https://doi.org/10.1177/14780771211054169>
- Demirbaş, B., 2019. Büyük Açıklıklı Yapıların Tarihsel Gelişim Süreci Ve Ahşap Kabuk Sistemlerin Yapısal Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Di Carlo, D., 2008. The Wooden Roofs of Leonardo and New Structural Research, Nexus Network Journal, 10, 27-38.
- Douthe, C., Mesnil, R., Baverel, O., Gobin, T., Tellier X., Ducoulombier, N. ve Montagne N., 2018. Design And Construction Of A Shell-Nexorade Hybrid Timber Structure, IASS Annual Symposium 2018 Creativity in Structural Design, Temmuz. <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01852280>
- Erkoç, E., 2004. Günümüz Teknolojisiyle Üretilen Ahşap Konutların Tasarım-Uygulama-Kullanım Üçgeninde Değerlendirilmesi (İstanbul Örnekleri), Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.



- Feldt, P. ve Thelin, A., 2018. Yüksek Lisans Tezi, Glued-in Rods in Timber Structures Finite Element Analyses of Adhesive Failure, Chalmers University of Technology, Gothenburg, İsveç.
- Garavaglia, E., Pizzigoni, A., Sgambi, L. ve Basso, N., 2013. Collapse Behaviour in Reciprocal Frame Structures, Structural Engineering and Mechanics, 46, 4, 533-547. <https://doi.org/10.12989/SEM.2013.46.4.533>
- Garcia Puyol, A., 2015. Mass Customization of Reciprocal Frame Structures, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Ağustos.
- Gelez, S., Aubry, S. ve Vaudeville, B., 2011. Nexorade or Reciprocal Frame System Applied to the Design and Construction of a 850 m2 Archaeological Shelter, International Journal of Space Structures, 26, 4, 303-311.
- Gelez, S. ve Saby, V., 2011. Workshop, Ateliers Design, Nexorades, Facing an Emergency Situation, International Journal of Space Structures, 26, 4, 359-361.
- Gherardini, F. ve Leali, F., 2017. Reciprocal Frames in Temporary Structures: An Aesthetical and Parametric Investigation, Nexus Network Journal, 19, 741-762. <https://doi.org/10.1007/s00004-017-0352-x>
- Godthelp, T.S., 2019. Timber Reciprocal Frame Structures, Yüksek Lisans Tezi, Eindhoven University Of Technology, Eindhoven.
- Gustafsson, J., 2016. Connections In Timber Reciprocal Frames, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University Of Technology, Gothenburg.
- Hasol, D., 2014. Ansiklopedik Mimarlık Sözlüğü. Yem Yayın, İstanbul.
- Karakoç, Z., 2017. Yapı Örtüsü Olarak Mütakabil Elemanların İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, FSMVÜ, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kayaoğlu, D.G., 2019. Gördes Düşümü'nün Mimarlıkta Sayısal Potansiyellerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılıç, Ö. Ve Orhon, A. V., (2019). Introduction of a Load Bearing System: RF Systems, International Design and Engineering Symposium, 10-12 Ekim, İzmir.
- Koç, S., 2020. Ahşap Izgara Kabuk Strüktürlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, MSGSÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koç, S. ve Gür. V., 2021. Mimaride Etkin Strüktürler Olarak Ahşap Izgara Kabuklar, Mimarlık ve Yaşam Dergisi, 6, 2, 349-369.
- Kohlhammer, T. ve Kotnik, T., 2011. Systemic Behaviour Of Plane Reciprocal Frame Structures. Structural Engineering International, 21, 1, 80-86. <https://doi.org/10.2749/101686611X12910257102596>
- Larsen O. P., 2008. Reciprocal Frame Architecture. Architectural Press, Oxford.
- Mesnil, R., Douthe, C., Baverel, O. ve Gobin, T., 2018a. Form Finding Of Nexorades Using The Translations Method, Automation in Construction, 95, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.010>



- Mesnil. R., Douthe. C., Gobin, T. Ve Baverel, O., 2018b. Form Finding and Design of a Timber Shell-Nexorade Hybrid, *Advances in Architectural Geometry*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Eylül.
- Miodragovic Vella, I., 2019, A Stereotomic Approach to Regional Digital Architecture, Doktora Tezi, Malta Üniversitesi, Yapılı Çevre Fakültesi, Msida. <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/7630>
- Miodragovic Vella, I. ve Kotnik, T., 2017. Stereotomy, an Early Example of a Material System, 35'inci eCAADe Konferansı, 2. Baskı, Roma Sapienza Üniversitesi, İtalya, 20-22 Eylül, 251-258. <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2017.2.251>
- Naicu, D., 2012. Geometry and Performance of Timber Gridshells, Yüksek Lisans Tezi, The University of Bath, Bath.
- Popovic Larsen, O., 2014. Reciprocal Frame (RF) Structures: Real and Exploratory, *Nexus Network Journal*, 16, 119-134. <http://dx.doi.org/10.1007/s00004-014-0181-0>
- Popovic, O., 1996. Reciprocal Frame Structures, Doktora Tezi, University of Nottingham, Nottingham.
- Pugnale, A., Parigi, D., Kirkegaard, P.H. ve Sassone, M., 2011. The Principle of Structural Reciprocity: History, Properties and Design Issues. IABSE-IASS Symposium: Taller, Longer, Lighter, London.
- Pugnale, A. ve Sassone, M., 2014. Structural Reciprocity: Critical Overview and Promising Research/Design Issues, *Nexus Network Journal*, 16, 9-15. <https://doi.org/10.1007/s00004-014-0174-z>
- O'Loinsigh, C., Oudjene, M., Shotton, E., Pizzi, A. ve Fanning, P., 2012. Mechanical Behaviour And 3D Stress Analysis Of Multi-Layered Wooden Beams Made With Welded-Through Wood Dowels, *Composite Structures*, 94, 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.08.029>
- Özen, G., 2022. Design and Analysis of Deployable Reciprocal Frames, Doktora Tezi, İYTE, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İzmir.
- Özen, G., Kiper, G. Ve Korkmaz, G., 2022. Design of Demountable Reciprocal Frames with New Geometric Properties, *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 63, 3-213, 203-212(10). <https://doi.org/10.20898/j.iass.2022.013>
- Rizzuto, J. P. ve Larsen. O. P., 2010. Connection Systems In Reciprocal Frames And Mutually Supported Elements Space Structure Networks, *International Journal of Space Structures*, 25, 4, 243-256. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.25.4.243>
- Ruan, G., Filz, G.H. ve Fink, G., 2022. Planar Rectangular, Slide-in Reciprocal Frame Structures Using Salvaged Timber and Wooden Nails, IASS 2022 Symposium Affiliated With APCS 2022 Conference, Eylül.
- Song, P., Fu, C.W., Goswami, P., Zheng, J., Mitra, N.J. ve Cohen-Or, D., 2013. Reciprocal Frame Structures Made Easy, *ACM Transactions on Graphics*, 32, 4, 1-13. <https://doi.org/10.1145/2461912.2461915>



- Stitic, A. ve Weinand, Y., 2015. Timber Folded Plate Structures – Topological and Structural Considerations, *International Journal of Space Structures*, 30, 2, 169-177.
- Swedish Wood, 2022. Design Of Timber Structures Volume 1 Structural Aspects Of Timber Construction, Edition 3, Stockholm.
- Swedish Wood, 2020. Joinery Handbook - For Softwood Furniture Production, Stockholm.
- Thönnissen, U., 2014. A Form-Finding Instrument for Reciprocal Structures, *Nexus Network Journal*, 16, 89-107. <https://doi.org/10.1007/s00004-014-0172-1>
- Türkçü, H. Ç., 2017. Çağdaş Taşıyıcı Sistemler, Genişletilmiş 3. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Veenendaal, D. ve Block, P., 2012. An Overview And Comparison Of Structural Form Finding Method For General Networks, *International Journal of Solids and Structures*, 49, 3741-3753. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.008>
- Vural, N., 2004. Uzay Kafes Sistemlerinde Örtü Malzemesi Seçimi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- Qi, L., Li, Z., Li, L., Pan, H., Xie, Z. Ve Huang, X., 2021. Study On Adjustable Connector Of Reciprocal Frame, *The Civil Engineering Journal*, 30, 2, 378-392. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2021.02.0028>
- Weinand, Y. ve Hudert, M., 2010. Timberfabric: Applying Textile Principles on a Building Scale. *Architectural Design*, 80, 102-107.
- URL-1, <https://www.archdaily.com/949152/portalen-pavilion-map13-barcelona-plus-summum-engineering-plus-edyta-augustynowicz> (erişim tarihi: 28.03.2023)
- URL-2, http://www.shigerubanarchitects.com/works/2010_centre-pompidou-metz/ 28.03.2023
- URL-3, https://www.archdaily.com/256946/coca-cola-beatbox-pavyon-pernilla-asif?ad_medium=office_landing&ad_name=article 28.03.2023
- URL-4, <http://www.achimmenges.net/?p=20987> 05.04.2023
- URL-5, <https://strongtie.com.au/products/sde-split-joist-hanger> 28.03.2023
- URL-6, <https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/fasteners/> 28.03.2023
- URL-7, <https://www.archdaily.com/275460/kroed-chun-ying-li-of-pavyon-architecture> 28.03.2023
- URL-8, <https://www.archilovers.com/projects/130087/kreod-pavyon-london.html> 16.04.2023
- URL-9, <https://archello.com/project/kreod-the-new-architectural-landmark-for-london> 16.04.2023
- URL-10, <https://www.tensilefabric.co.uk/fabric-structures/tensile-fabric-portfolio/project.aspx?type=exterior&ref=1845> 16.04.2023
- URL-11, https://evolute.at/download/130129_designing_KREOD_web.pdf 16.04.2023



- URL-12, <https://www.arkiv.com.tr/proje/geometrik-desenlerden-tasiyici-kaburgalara/10464?lang=tr>, 17.04.2023
- URL-13, <https://www.youtube.com/watch?v=HZkR2JcixUQ> 17.04.2023
- URL-14, <https://www.arkitera.com/proje/geometrik-desenlerden-tasiyici-kaburgalara/> 17.04.2023
- URL-15, <https://mtf.deu.fsm.edu.tr/haber/Mimarlik-Yuksek-Lisans-mezunlarimizdan-Zehra-KARAKOCun-calismasi-Yeditepe-Bienalinde2018-04-10-11-26-42am> 17.04.2023
- URL-16, <https://design-milk.com/plate-pavyon-malta-design-week/> 18.04.2023
- URL-17, <https://parametrichouse.com/plate-pavyon/> 18.04.2023
- URL-18, <https://parametrichouse.com/bubble-pavyon/> 30.04.2023
- URL-19, <https://www.garnica.one/en-uk/blog/bubble-pavyon-an-interesting-example-of-new.html> 30.04.2023
- URL-20, <http://bubblepavyon.blogspot.com/> 30.04.2023
- URL-21, <http://caife.com.ar/2019/09/11/bubble-pavyon/> 30.04.2023
- URL-22, <https://www.archdaily.com/215249/dragon-skin-pavyon-emmi-keskisarja-pekka-tynkkynen-lead> 11.05.2023
- URL-23, <https://www.arch2o.com/dragon-skin-pavyon-students-of-tampere-university-of-technology/> 11.05.2023
- URL-24, <https://parametrichouse.com/dragon-skin-pavyon/> 11.05.2023
- URL-25, <https://arquitecturaviva.com/works/dragon-skin-pavyon-kowloon-park-1> 11.05.2023
- URL-26, <https://parametric-architecture.com/future-tree-3d-printed-stacked-canopy-by-eth-zurich/> 12.05.2023
- URL-27, <https://dfab.ch/news/future-tree-robotic-timber-meets-digital-concrete#> 12.05.2023



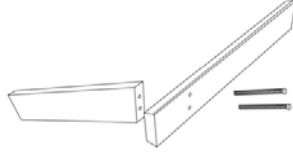
6. EKLER

Ek Tablo 1. Örneklem grubunun karşılaştırması

ÖRNEK NO	YAPIM YILI	YAPI ALANI (m ²)	AHŞAP MALZEME	M.E. SAYISI	M.E. TÜRÜ	M.E. TABAKA SAYISI	IZGARA FORMU	MODÜL BAĞLANTI TÜRÜ		ÖRTÜ	ÖRTÜNÜN KONUSU	ÖRTÜ BAĞLANTI TÜRÜ	ÇEVRE İLİŞKİSİ – BAĞLANTI TÜRÜ
1	2012	60	Masif Sarıçam	3	Panel	Tek	Çift Eğrilik		Cıvata, Dübel	PVC Kaplı Polyester	Izgara Altında	Çelik Gergi	Cıvata
2	2018	23	-	3, 6	Panel	Tek	Tek Eğrilik		Vida, Dübel	Yok	Yok	Yok	Bulon/Cıvata
3	2014	20	Kontrplak	4	Panel	Tek	Tek Eğrilik		Çentik	Yok	Yok	Yok	Çelik Gergi



Ek tablo 1'in devamı

4	2018	-	Kontrplak	5, 6	Çubuk, Panel	Tek	Serbest Eğrilik		Pim, Vida, Çentik	Yok	Yok	Yok	-
5	2012	16	Kontrplak	4	Levha	Tek	Çift Eğrilik		Çentik	Yok	Yok	Yok	Yok
6	2017	50	CLT	4, 6	Çubuk	Tek	Çift Eğrilik		Vida	Kontrplak	Izgara Üzerinde	Çentik, Vida	Cıvata
7	2019	107	-	3	Panel	Tek	Çift Eğrilik		Vida	Yok	Yok	Yok	Çelik Plaka, Vida, Cıvata

1) “ - ” işareti ulaşılamayan bilgileri ifade etmektedir.

2) “Yok” ifadesi yapıda bahsedilen özelliğin bulunmadığını ifade etmektedir.



ÖZGEÇMİŞ

Zeynep GÜLER, ilk, orta ve lise öğretimini Tokat'ta tamamladı. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümünden mezun oldu. 2020 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2021 yılında özel bir mimarlık ofisinde çalıştı. 2022 yılından itibaren Bursa Teknik Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi Mimarlık Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.

