

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ,
GÜNÜMÜZDEKİ YERİ VE ANALİZ
YÖNTEMLERİ**

Hüseyin Kürşat ÇELİK

Ekim, 2022

İZMİR

AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ, GÜNÜMÜZDEKİ YERİ VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Hüseyin Kürşat ÇELİK

Ekim, 2022

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

HÜSEYİN KÜRŞAT ÇELİK, tarafından **DOÇ. DR. GÖKHAN ŞAKAR** yönetiminde hazırlanan “**AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ, GÜNÜMÜZDEKİ YERİ VE ANALİZ YÖNTEMLERİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Gökhan ŞAKAR

Yönetici

Doç. Dr. Serdar AYDIN

Doç. Dr. Mutlu Seçer

Jüri Üyesi

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Lisans bitirme projemden yüksek lisans tezimi sunduğum güne kadar bana çok önemli katkılarda bulunmuş, beni ahşap yapılara yönlendirmekle kalmayıp inşaat mühendisliği ve yapı mühendisliğinin tüm alanlarında ufkumu açmış; kendisinden daha iyi bir danışman hayal bile edemeyeceğim Sayın Doç. Dr. Gökhan ŞAKAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam kapsamında aktif rol oynamamasına rağmen meslek hayatımda ve akademik ilgi alanlarımı oluşturmada önemli katkıları olan, tez sürecimin tüm zorluklarını ve heveslerimi paylaştığım Sayın Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER’e teşekkürü borç bilirim.

Tez sürecimin her aşamasında ahşaba olan ilgimi paylaşmış, her zor anımda beni desteklemiş değerleri arkadaşlarım Murat SERİN, Efekan ÇINAR, Koray CANŞE, Kerem KARADAŞ ve Birkan SEKİN’e teşekkürü borç bilirim.

Mühendislik eğitimi almamış olmamalarına rağmen inşaat mühendisliği ve ahşap üzerine öğrendiğim her bilgiyi benimle aynı heyecan ve istekle paylaşan, maddi ve manevi olarak varlıklarını eksik etmeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin Kürşat ÇELİK

AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ, GÜNÜMÜZDEKİ YERİ VE ANALİZ YÖNTEMLERİ

ÖZ

Ahşap doğal bir yapı malzemesi olarak tarihin ilk anlarından günümüze kadar inşa etmek amacıyla çeşitli şekillerde kullanılmıştır. Ahşabı inşaat tarihçesinde ayrı bir yere koyan gerekçeler ahşabın doğasında barınmaktadır. Yoğunluğuna oranla taşıma gücünün fazla olması, kolaylıkla temin edilebilmesi ve kolay işlenerek yapı elemanları oluşturulabilmesi onu alternatiflerinden farklı bir yere koymaktadır. Endüstri devrimine kadar sıklıkla tercih edilen ahşap betonarme ve çelik inşaat yöntemlerinin geliştirilmesi ile popülerliğini yitirse de günümüzün tasarım gereksinimlerinden olan sürdürülebilirlik, çevreye duyarlılık gibi ihtiyaçlar sebebiyle yeniden tercih edilmeye başlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında ahşap ve ahşap yapıların tarihsel gelişimi irdelenerek günümüzdeki yeri vurgulanmıştır. Ahşap yapıların çeşitliliği ve tasarım gereksinimleri üzerinde durularak güncel yönetmelik ve standartlardaki yeri incelenmiştir. Ahşap yapıların modelleme ve analiz yöntemleri açıklanarak yöntemler için beş yeni kategori önerilmiştir. Önerilen modellerin yeterliliği ve kullanılabilirliğini incelemek üzere literatürde mevcut olan bir deneysel çalışma referans alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları ile deney sonuçları kıyaslanarak ahşabın analiz ve modelleme yöntemleri üzerine irdelemeler yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Ahşap yapılar, inşaat tarihçesi, sonlu elemanlar, doğrusal olmayan analiz, anizotropik malzeme

HISTORICAL DEVELOPMENT OF TIMBER STRUCTURES, IT'S PRESENT AND THE ANALYSIS METHODS

ABSTRACT

As a natural building material, timber has been used in various ways to build from the first moments of history to the present days. The reasons that put timber in a special place in the construction history are in the nature of the timber. The fact that it has a higher bearing capacity compared to its density, that it can be easily supplied and that it can be easily processed to create building elements puts it in a different place from its alternatives. Although it lost its popularity with the development of reinforced concrete and steel construction methods; timber, which were frequently preferred until the industrial revolution, has started to be preferred again due to needs such as sustainability and environmental awareness, which are today's design requirements.

Within the scope of the thesis, the historical development of timber and timber structures was examined and their place in today was emphasized. By emphasizing the diversity and design requirements of timber structures, their place in current regulations and standards was examined. Modeling and analysis methods of timber structures were explained and five new categories were proposed for the methods. In order to examine the adequacy and usability of the proposed models, analyzes were carried out with reference to an experimental study available in the literature. By comparing the analysis results with the experimental results, the analysis and modeling methods of timber were examined.

Keywords: Timber structures, construction history, finite element, nonlinear analysis, anisotropic materials

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi

BÖLÜM BİR – AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ 1

1.1 Ahşabın Tarih Boyunca Kullanımı	2
1.1.1 Ortaçağ Öncesi	3
1.1.2 Ortaçağ-18.yüzyıl	6
1.1.3 19.yüzyıl-20.yüzyıl	7
1.1.4 20.yüzyıl	8
1.1.5 Modern Ahşap Yapılar	9

BÖLÜM İKİ – AHŞAP MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ 15

2.1 Endüstriyel Ahşap Ürünleri	16
2.1.1 Masif Ahşap	16
2.1.2 Yapıştırma Lamine Ahşap	16
2.1.3 Çapraz Lamine Ahşap	17
2.1.4 Plywood	18
2.1.5 Diğer Malzemeler	19
2.2 Ahşabın Mekanik Özellikleri	19
2.2.1 Liflere Paralel Çekme ve Basınç	20
2.2.2 Liflere Dik Çekme ve Basınç	21
2.2.3 Ahşabın Dayanımı Etkileyen Parametreler	22
2.3 Ahşap Yapı Birleşimleri	26
2.3.1 Geleneksel Birleşimler	27

2.3.2 Dübel Birleşimler	28
2.3.3 Yapıştırma Birleşimler	29
2.3.4 Mekanik Birleşimler	30
BÖLÜM ÜÇ – YÖNETMELİK TABANLI AHŞAP YAPI TASARIMI	32
3.1 Eurocode 5: Ahşap Yapıların Tasarımı	33
3.2 Amerika Ahşap Yönetmeliği	34
3.3 Yönetmeliklerin Kıyaslanması	35
BÖLÜM DÖRT – AHŞAP YAPILARIN İLERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ	38
4.1 Ahşabın Yük Şekil Değiştirme İlişkisi	39
4.2 Ahşap Malzeme Modelleri	41
4.2.1 Basit Modeller	41
4.2.1.1 Doğrusal Elastik Modeller	41
4.2.1.2 Elastoplastik Modeller	42
4.2.2 Karmaşık Modeller	42
4.2.2.1 Deneysel Modeller	42
4.2.2.2 Elastisite Temelli Modeller	43
4.2.2.3 Plastisite Temelli Modeller	44
4.2.2.4 Sürekli Ortam Hasar Mekaniği	45
4.2.2.5 Kırılma Mekaniği	45
4.2.2.6 Karma Modeller	46
4.3 Ahşabın Sonlu Elemanlarla Modellenmesi	47
4.4 Sönüm	52
4.5 Birleşimlerin Modellenmesi	53
BÖLÜM BEŞ – MATERYAL VE METOT	55
5.1 Önerilen Modeller	56
5.1.1 Model 1	56

5.1.2 Model 2	56
5.1.3 Model 3	57
5.1.4 Model 4.....	57
5.1.5 Model 5.....	57
5.2 Referans Çalışmanın Tanıtılması	58
5.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi	62
5.3.1 SAP2000 Yapısal Analiz Programı	63
5.3.2 ABAQUS Sonlu Elemanlar Programı	64
5.4 Modelleme	65
5.4.1 SAP2000	65
5.4.2 ABAQUS	69
5.5 Analiz Sonuçları	72
5.5.1 Model 1	72
5.5.2 Model 2	72
5.5.3 Model 3	74
5.5.4 Model 4	75
5.5.5 Model 5	77
5.6 Sonuçların Kıyaslanması	77
5.7 Modellerin Değerlendirilmesi	80
5.7.1 Model 1 ve 2	80
5.7.2 Model 3, 4 ve 5	82
BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR	87

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Hongqiao köprüsü taşıyıcı sistemi	5
Şekil 1.2 Pagoda taşıyıcı sistem örneği.....	5
Şekil 1.3 The Wilton Carpet Factory hiperbolik parabol çatısı.....	9
Şekil 1.4 Kanada-Mistissini köprüsü	11
Şekil 1.5 Mjostårnet taşıyıcı sistemi	12
Şekil 1.6 Modern ahşap yapı taşıyıcı sistem örnekleri	13
Şekil 1.7 Ahşap birleşim örnekleri	14
Şekil 2.1 Ahşabın temsili lif-reçine matrisi	15
Şekil 2.2 Yapıştırma lamine ahşap üretim süreci	17
Şekil 2.3 Üç tabakalı çapraz lamine ahşap	18
Şekil 2.4 Ahşabın ortotropik yapısı	20
Şekil 2.5 Ahşap numunenin liflere dik basınç yükleme öncesi ve sonrası	21
Şekil 2.6 Ahşabın liflere dik gerilme şekil değişimi ilişkisi ve yoğunlaşması	22
Şekil 2.7 Ahşabın nem içeriği ile maksimum basınç dayanımı arası ilişki	23
Şekil 2.8 Maksimum eğilme dayanımı ile yük süresinin ilişkisi	24
Şekil 2.9 Ahşabın eğilme dayanımının nem içeriği ve sıcaklık ile ilişkisi	24
Şekil 2.10 Glulam numunelerin boyut ve dayanım arasında ilişkisi	25
Şekil 2.11 Ahşabın çeşitli dayanımları ile yük açısı arası ilişki	26
Şekil 2.12 Geleneksel birleşim örnekleri	27
Şekil 2.13 Dübel birleşim örnekleri	28
Şekil 2.14 Dübel tipi birleşimlerin temsili yük şekil değişimi ilişkisi	29
Şekil 2.15 Yapıştırma birleşim örnekleri	30
Şekil 2.16 Ahşap mekanik birleşim örnekleri	30
Şekil 2.17 Ahşap kolon kiriş birleşim detayı	31
Şekil 4.1 Ahşap modellerin karşılaştırılması	40
Şekil 4.2 Ahşap malzeme modellerinin sınıflandırılması	41
Şekil 4.3 Basitleştirilmiş çok parçalı sürekli zarf eğrisi ve eşdeğer tek eksenli gerilme şekil değişimi ilişkisi	44
Şekil 4.4 Rijit, yarı rijit ve mafsallı birleşimlerin temsili moment dönme eğrileri ...	53
Şekil 5.1 Kafes geometrisi ve yükleme durumu	59

Şekil 5.2 Ahşap dübel birleşimlerin yük yer değişimi sonuçları	60
Şekil 5.3 Ahşap kafesin yük yer değişimi sonucu	61
Şekil 5.4 Ahşap kafesin göçme modu	61
Şekil 5.5 ABAQUS eleman ailesi	64
Şekil 5.6 Sistem geometrisinin tanıtılması	65
Şekil 5.7 Ahşap malzeme özelliklerinin tanıtılması	65
Şekil 5.8 Kesit tanımlaması ve özellikleri	67
Şekil 5.9 Malzeme tanımlaması	72
Şekil 5.10 Model 1 sonucu kafesin yük altında deforme hali	73
Şekil 5.11 Doğrusal elastik sınır altında idealleştirilmiş yük şekil değişimi ilişkisi	74
Şekil 5.12 Doğrusal olmayan idealleştirilmiş yük şekil değişimi ilişkisi	75
Şekil 5.13 Kabuk sonlu eleman modeli	76
Şekil 5.14 Kafes gerilme dağılımı	76
Şekil 5.15 Kafes şekil değiştirmiş hali	77
Şekil 5.16 Elastik sınıra karşılık gelen kafes yük ve yer değiştirme değeri	80
Şekil 5.17 Elastik sınıra karşılık gelen birleşim yük ve yer değiştirme değeri	80
Şekil 5.5 ABAQUS eleman ailesi	82
Şekil 5.19 Kafes göçme modu deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	83

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.2 TBDY-18’de bulunan yerinde dökme betonarme, çelik ve ahşap yapılar	36
Tablo 5.1 Ahşap numunelerin mukavemet özellikleri	59
Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan birim sistemi	70
Tablo 5.3 Modellerin mekanik özetleri	78
Tablo 5.4 Modellerin kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği	79
Tablo 5.5 Analiz sonuçları ile deney sonuçlarının kıyaslanması	79



BÖLÜM 1

AHŞAP YAPILARIN TARİHSEL GELİŞİMİ

Ahşap doğal bir yapı malzemesidir. Tarihin başlangıcından itibaren insanoğlunun çeşitli amaçlarına hizmet etmiştir. Ahşap tarih boyunca araç gereçten askeri amaçlara kadar geniş bir yelpazede kullanılmış olup, inşaat sektöründeki yeri ve önemi büyüktür. Öyle ki insanoğlu ahşabı ve diğer ağaç ürünlerini inşa etmekte kullanmasaydı günümüz mühendisliğinden söz edilemezdi. Ağırlığına oranla taşıma gücünün yüksek oluşu, doğadan kolaylıkla temin edilebilmesi, herhangi bir özel işlem gerektirmeden bile kullanılabilmesi gibi avantajları ahşabı alternatiflerinden farklı kılmaktadır. Ancak ahşap ilk kullanıldığı zamanlarda endüstriyel bir malzeme değildir. Bu nedenle betonarme ve çelik gibi endüstri destekli inşaat yöntemlerine karşı dezavantajlı bir durumda kalıp popülerliğini kaybetmiştir. Bu durum, yüksek mukavemet ihtiyaçlarına karşılık verilememesi, büyük kesit elde edilememesi, alternatiflerine oranla dayanıklı ve uzun ömürlü olmaması gibi sebeplerden kaynaklıdır. Buna rağmen yapıştırma lamine ahşap ve diğer ahşap kökenli endüstriyel malzemeler olan mühendislik ahşabının üretilmesi ile ahşap yeniden iyi bir alternatif haline gelmiştir. Ahşap kökenli malzemeler günümüz inşaat sektöründe çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. Kullanımı tali amaçlarla ya da birincil elemanları inşa etmek amaçlı olabilir. Yerinde dökme betonarme yapılarda kalıp malzemesi, çok katlı veya geniş açıklıklı yapılarda tali kiriş, duvar veya çatı malzemesi gibi yaygın kullanım alanları bulunmaktadır. Birincil taşıyıcı sistemi ahşap ile oluşturma fikri ise gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Bu konuda yaya ve karayolu köprüleri, konutlar ve ticari yapılar başı çekmekle beraber, opera binası, sinema salonu, yüzme havuzu gibi katma değeri büyük yapılar da önemli bir yer tutmaktadır.

Günümüz endüstri imkanları ile ahşabın özellikleri geliştirilebilmiştir ve bu durum ahşap ile artık daha zorlayıcı yapılar inşa etme fikrini öne çıkarmıştır. Bu kaygının birkaç önemli kaynağı olup bunlardan en temeli olarak küresel ısınma gösterilebilir. Çevreye duyarlı ve sürdürülebilir inşaatlar gerçekleştirmek artık ekonomi, güvenlik gibi kaygılardan ayrılamaz noktaya gelmiştir. Betonarme, çelik gibi alternatifler yüksek karbon ayak izi ve olumsuz çevre etki değerlerine sahip

olduğundan ahşap iyi bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde ahşap, çok katlı yüksek binalar ve kilometrelere varan uzunluklara sahip karayolu köprülerinde kullanılmak üzere değerlendirilir hale gelmiştir. Ancak, bu tarz yapıların analiz ve tasarımları için gerekli bilgi birikiminde çeşitli boşluklar bulunmaktadır. Günümüzde pratik tasarımlar açısından büyük öneme sahip olan yapı tasarım yönetmelikleri, standartları ve el kitapları mevcuttur. Bu tür yayınlar, meslek örgütü, bakanlık, kurum, enstitü gibi çeşitli otoriterler tarafından üretilmekte olup, betonarme ve çelik gibi popüler inşaat yöntemlerinde geniş bilgi birikimi ulaşılabilir kılınmaktadır. Ancak ahşap inşaatları konusunda bu tür dokümanlar yeterince kapsayıcı değildir. Buna paralel olarak, ahşabın ileri hesap yöntemleri üzerine yapılan araştırmalar da alternatif malzemelere kıyasla sınırlıdır. Tüm bu durumlar, ahşabı pratik bir alternatif olmaktan uzaklaştırmaktadır.

Ahşap doğası gereği alternatif yapı malzemelerinden çok daha farklı şekilde irdelenmektedir. Doğal bir malzeme olması nedeniyle karakteristik özelliklerinin standartlaştırılması zordur, değişkenliği yüksektir. Heterojen ve anizotrop bir yapıya sahiptir. Üç boyut altında davranışı farklıdır. Ayrıca endüstriyel ahşap ürünlerinin davranış ve kullanım şekilleri de birbirlerine benzememektedir. Net sınırlar yoktur. Tüm ahşap kökenli malzemeler geniş yelpazede kullanılabilir. Ancak bunları değerlendirmeden önce, ahşabın tarihini daha iyi anlamak gerekmektedir. Ahşabın tarihinin bilinmesi ile ahşabın hem günümüzdeki yeri daha iyi anlaşılabilir hem de davranışının anlaşılmasına önemli bir katkı sağlanabilir. Dolayısıyla ahşap kökenli malzemelerin tarihsel gelişimi, bu tez kapsamında kısaca özetlenmiştir.

1.1 Ahşabın Tarih Boyunca Kullanımı

Ahşaba ve inşaat tarihine genel bir bakış yapıldığında tarihi şekillendiren birkaç önemli nokta dikkati çekmektedir. Bunlar; büyük açıklık geçme ihtiyacı, yangın, uzun ömürlü yapı inşa etme ihtiyacı ve birleşimin yük taşıma kapasitesidir. Büyük açıklık geçme ihtiyacı 19.yüzyıl öncesinde gerek askeri gerekse bayındırlık hizmetleri amacıyla köprülerde öne çıkmaktadır. Bu durum ahşap yapıların gelişiminin köprüler üzerinden takip edilebilir olmasına olanak sağlamaktadır.

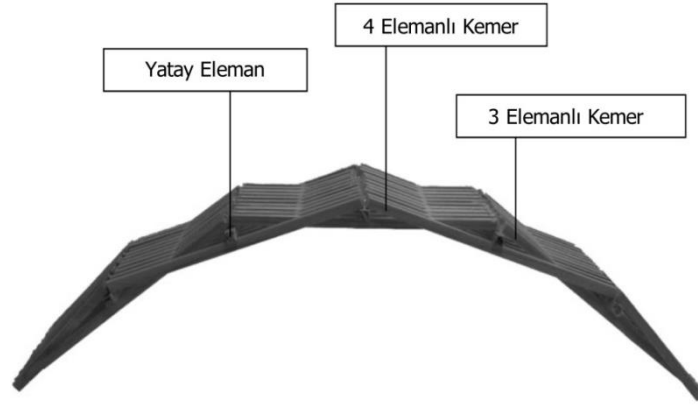
Endüstri devrimi ve sanayileşme süreci öncesi, tarihte büyük şehir yangınlarının ahşabın bir bina malzemesi olarak gelişmesine engel olduğu söylenebilir. Yangın tehlikesi nedeniyle dönemin önemli ve zorlayıcı tasarımlarına sahip binaları salt ahşap kullanılarak yapılmamıştır. Çeşitli örnekler bulunsa da, yaygın olduğu söylenemez. Ahşap endüstri devrimi öncesi dönemin diğer yapı malzemeleri olan taş, kerpiç gibi malzemeler ile birlikte halkın kullandığı bir malzeme olarak, konut türü yapılarda yaygın olarak görülmektedir. Yani yangın tehlikesi nedeniyle ahşap, bina inşaatlarında büyük yol katedememiştir (Smith ve Snow, 2008). Tarihteki bir diğer önemli etken olan uzun ömürlü yapı inşa etme ihtiyacı endüstriyel malzemeler olan betonarme ve çeliğin yaygınlaşması nedeniyle ahşabın popülerliğini kaybetmesine sebep olmuştur. Son olarak tarihteki en büyük etkiye sahip bir diğer özellik olan birleşimler ise ahşabın gelişmesini bir noktada sınırlamış, bir noktada arttırmıştır. Ahşap inşaatlarının erken dönemlerine bakıldığında birleşimler yapı elemanının taşıma kapasitesini aktarabilecek nitelikte olmadığı söylenebilir. Bu durum tasarımcıları moment birleşimler gibi detaylardan uzaklaştırıp yapıları mafsallı birleşimler ile inşa etmeye götürmüştür. Ancak çelik birleşimlerin ahşap yapılarda kullanılması ile bu sorun ortadan kalkarak ahşabın önünü açmıştır.

Ahşabın inşaat mühendisliğindeki yeri 5 ana döneme ayrılabilir. Bunlar sırasıyla; Ortaçağ öncesi, Ortaçağ- 18.yüzyıl arası, 18-19.yüzyıl arası, 20.yüzyıl ve günümüz olarak isimlendirilebilir. Bu ayrım ahşap yapıların tasarım ve uygulama yaklaşımları ile insanlık tarihinde önemli kültürel ve endüstriyel gelişmelere paralel olarak yapılmıştır. Bu sınıflandırma, Ritter (1990)'daki öneriler esas alınarak yapılmıştır.

1.1.1 Ortaçağ Öncesi

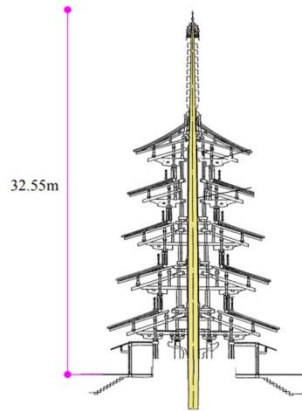
Birinci dönemin başlarında insanlık yapı oluşturmaya yeni başlamıştır. İlkel sığınak ve köprü örneklerine rastlanılabilir. İlk ahşap köprünün bir nehrin üzerine devrilen ağaçtan ibaret olduğu tahmin edilmektedir. İnsanlığın aletleri etkili bir şekilde kullanmasıyla, özellikle Asya'nın tropikal bölgelerinde ağaçların dal, kök, yaprak gibi farklı bölümlerinin de kullanılması ile ilkel asma köprüler inşa edilmiştir. Milattan önceki dönemlerde Persler, Babiller, Romalılar, Antik Yunan ve Çinliler

tarafından birçok ahşap köprünün inşa edildiğine dair çeşitli dökümanlar belgelendirilmiş olsa da literatür bilgisi kısıtlıdır. Bu köprülerden en eskisi, ayrıca kayıtlara geçmiş en eski köprülerden birisi, Babiller tarafından Fırat(*Euphrates*) Nehri üzerine, 10 m genişliğinde ve 180 m uzunluğunda inşa edilmiştir. Bunu takiben M.Ö. 422’de Antik Yunan döneminde yapılan, toplam açıklığı 275 m olacak şekilde meşe kazıklara oturan *Amphipolis* Köprüsü örnek olarak gösterilebilir. İlerleyen tarihlerde, doğrudan Julius Caesar tarafından 10 günde yapıldığı ifade edilen *Caesar* Köprüsü bir kilometre taşı olarak gösterilebilir. Roma ordusunu Almanya’ya taşımak amacıyla inşa edilen köprü, gerektiği halde sökülebilmesi amacıyla ahşap kirişler ve payandaların kamayla birleştirilmesi ile yapılmıştır (Partov vd., 2016; Ritter, 1990). Aynı dönemde M.S.960-1127 tarihleri arası Çin’de yapılan önemli bir ahşap köprüye rastlanmaktadır. *Hongqiao* olarak bilinen Gökkuşağı Köprüsü Sarı Nehri üzerinde yapılmıştır. Köprü ile ilgili en dikkat çekici kayıt *Qimning Shange Tu* isimli parşömen resmidir. Resim ve dönemle ilgili çeşitli kayıtlar dikkate alınarak köprünün 500 kişi, 20 besi hayvanı, çeşitli market ve pazar dükkanını taşıyabilecek kapasitede tasarlandığı düşünülmektedir. Ayrıca nehir üzerindeki tekne hareketliliklerinin de dikkate alındığı düşünülmektedir. Köprü genişliğinin 9 m, açıklığının 16 m ve su seviyesinden yüksekliğinin 4,9 m olduğu düşünülmektedir. Taşıyıcı sistemin yaklaşık 40 cm kalınlığında 21 ahşap kemer tipi çerçeveden oluştuğu düşünülmektedir. Köprü kemerleri 2 farklı tipte geliştirilmiştir. Kemer görüntüsü 3 veya 4 doğrusal elemandan oluşan çerçevelerden elde edilmektedir. Bir kemer eleman diğer iki kemer elemanın birleşimini ortalayacak şekilde konumlandırılmıştır. Ayrıca yatay yükleri karşılamak üzere kemerlerin birleşimlerinin arasına tali kirişler yerleştirilmiş, birleşimler kama ve kama yerlerinden çivilerle desteklenerek yapılmıştır. Köprünün taşıyıcı sistemi Şekil 1.1’de verilmiştir (Chen, 2008). Dönemin ilerleyen yıllarında da benzer şekilde ahşap kafes ve kemerlerin kamayla birleştirilmesi şeklinde inşaat yöntemi kullanılmıştır (Ritter, 1990).



Şekil 1.1 Hongqiao Köprüsü taşıyıcı sistemi (Chen, 2008)

Dönemin sonuna doğru Budizm etkisi altındaki bölgelerde önemli bir gelişme yaşanmıştır. Pagoda olarak bilinen ve Çin etkisi ile başlayıp dönemin yakın toplumlarına da geçen inşaat yöntemi ahşabın insanlığa sunduğu imkanlar için iyi bir örnektir. Birçok kez şiddetli yer ivmelerine maruz kalmış olmasına rağmen çok sayıda Pagoda günümüzde hala hizmet vermeye devam edebilmektedir. Örneğin Japonya’da 32,55 m yapı yüksekliği ve 5,45 m² oturum alanına sahip bir pagoda bin yılı aşkın süredir ayakta. Yapının tüm bu yıkıcı etkilere rağmen ayakta kalabilmesinin nedeni ise inşaat yönteminde saklıdır. Yapının katları arası birleşim bulunmamakta olup, yapı merkezdeki bir dikme elemanın yere kazık gibi ankrajlanması ile mesnetlenmektedir. Herhangi bir yatay hareket altında katlara yük aktarılmayıp, merkezdeki dikme eleman sayesinde yapı bütünlüğü korunmaktadır. Şekil 1.2’de bu pagodanın taşıyıcı sistemi verilmiştir (Nakahara, Hisatoku, Nagase ve Takahashi, 2000).



Şekil 1.2 Pagoda taşıyıcı sistem örneği (Nakahara vd., 2000)

Bu bilgiler ışığında, inşaat mühendisliği mesleğinin profesyonelleşmemiş olduğu dönemlerde bile ahşabın zorlayıcı tasarımlarda kullanıldığı görülmektedir. Ahşap, kültürel değeri yüksek yapılar için değerlendirilmiş, çeşitli sosyal ve askeri amaçlar için planlı bir şekilde kullanılmış ve bu tür durumlar için iyi bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

1.1.2 Ortaçağ-18.yüzyıl

Ortaçağ'ın kapanması ve 18.yüzyıla yaklaşıldığı bu dönemde özellikle Avrupa'da önemli gelişmeler yaşanmıştır. İnşaat mühendisliği bu dönem içerisinde profesyonellik kazanmıştır. Özellikle Fransa'da önemli gelişmelere rastlanmaktadır. 20-45 m arası değişken açıklıklara sahip birçok ahşap köprü inşa edilmiştir. Bu köprülerin taşıyıcı sistemi çoğunlukla kemerlerin geçme şeklinde birleştirilmesi ile yapılmıştır. Bu dönemde yapılmış önemli köprülere örnek olarak Ren Nehri üzerinde konumlanan *Schaffhausen* Köprüsü gösterilebilir. Köprü 1758'de yapılmış olup yaklaşık 52 ve 58 m uzunluğunda iki açıklıktan oluşmaktadır. Dönemin önemli köprülerine örnek gösterilebilecek bir başka köprü ise Almanya Wittingen'de yapılmış olup, tek açıklığa sahip olmak üzere yaklaşık 120 m geçmektedir (Partov vd., 2016; Ritter, 1990).

İkinci dönemin ilerleyen zamanlarındaki gelişmelere özellikle Amerika'da rastlanmaktadır. 18.yüzyıl öncesi Amerika'da daha ziyade kısa açıklıklara oturtulmuş ahşap köprülere rastlansa da 1750 ve sonrasında çok daha büyük açıklıklar geçen ve iyi mühendislik planlamalarına sahip ahşap köprüler görülmektedir. Bu köprülere örnek olarak York Nehri üzerine 1761'de inşa edilen, yaklaşık 7 m genişliğinde ve 80 m uzunluğa sahip bir ahşap köprü gösterilebilir. Köprü aralarında yaklaşık 5 m olacak şekilde teşkil edilen dörtlü ahşap dikmeler üzerine oturmaktadır. Köprü açıklıkları nehir üzerindeki bot hareketlilikleri gözetilerek tasarlanmıştır. Dönemin sonlarına doğru önemli başka bir köprüye rastlanmaktadır. *Piscataqua* Köprüsü yaklaşık 720 m uzunluğa ve 12 m genişliğe sahiptir. Taşıyıcı sistem, 3 ahşap kemerin kafes şeklinde örülmesiyle oluşturulmaktadır. Köprünün en önemli özelliği ise, iklimsel etkilerin köprüye zarar vermemesi amacıyla, köprünün yüzeyi ve yanlarının

çatı ile korunmuş olmasıdır. İnşaat Mühendisi *Timothy Palmer* tarafından yapılan köprü, döneminde büyük ilgi görmüştür ve *the Great Arch* olarak anılmıştır (Partov vd., 2016; Richard, 2019; Ritter, 1990).

1.1.3 19.yüzyıl-20.yüzyıl

19.yüzyılın başlaması ile karayolu ve demiryolu ağlarının artışı, köprü ihtiyacında patlama yaratmıştır. Amerika’da kafes ve kemer sistemleri ahşap köprülerin baskın yapı sistemidir. Çatı ile korunmuş ahşap köprü tipi daha önceki dönemde geliştirilmiş ve uygulanmış olsa da, 19.yüzyıla kadar bu sistem büyük ölçüde kullanılmamıştır. 19.yüzyılın başlarında köprü inşaatlarında yalnızca tasarım gereksinimlerini karşılamak üzere değil, mühendisler tarafından daha cesur ve önceki sistemlerden daha üstün yapı sistemleri denenmeye başlanmıştır. Bu nedenle dönem içerisinde birçok patent alınmıştır. Dönemin ilerlemesiyle korunmuş ahşap köprülerin sayısında da ciddi bir artış görülmektedir. *Howe, Pratt, Burr, Warren Dörtgeni(Lattice), Long* gibi çeşitli kafes tipleri de bu dönemde geliştirilmiştir (Partov vd., 2016; Ritter, 1990). Buna paralel olarak, Britanya ve İrlanda’da da ahşap için yaygın köprü malzemesi denebilir. Öyleki, 1830-1870’li yıllar arası demiryolu ağında işletilmek üzere çok sayıda ahşap köprü inşa edilmiştir. İnşaat teknolojisi Amerika’dan biraz daha farklı gelişmiştir. Bu dönemde yaklaşık 2500 ahşap köprü inşa edildiği düşünülmekle birlikte, bunların 900’ü köprüyoldur. Köprüler genellikle yığma altyapıya oturtulmaktadır. Ayrıca, 1840’ların sonlarına doğru ahşap kazıklardan yapılmış altyapılara da rastlanmaktadır. Kazıklar, genellikle tek sıra veya çift sıra şeklinde ve çaprazlarla güçlendirilerek yapılmıştır. Ayrıca, kısa yığma duvarlara oturtululan ve kafes örgü elemanları ile yapılan ahşap kulelere de rastlanabilmektedir. Kullanılan ağaç çeşitliliği çok olup, yüksek kalite ahşap malzemeler kullanılmaya çalışılmıştır. Dönemin yaygın tasarım felsefesi; nitelikli ahşap kullanmanın korunmuş düşük maliyetli ahşap kullanmaktan daha ekonomik olduğudur. Köprülerin yapı sistemi ahşap kemerler, lattice kafesleri, kafes, fan ve iskeledir. Ayrıca kiriş ve poligon kemer gibi basit yapı sistemleriyle de karşılaşılmaktadır. Kraliçe ve kral kafes türleri sıklıkla korunmuş ahşap köprü olarak

kullanılmıştır. Köprü açıklıkları çeşitli olup 60 m açıklığa ulaşan köprüler kayıtlara geçmiştir (Bill, 2016).

1.1.4 20.yüzyıl

Dördüncü dönemin başlaması ile çelik endüstrisinde çok hızlı şekilde önemli gelişmeler yaşanmıştır. 20.yüzyılın başlarına kadar ahşabın inşaat başlangıç maliyeti çelikten çok daha ekonomik iken, fiyatının düşmesiyle çelik daha dikkat çekici bir köprü malzemesi haline gelmiştir. Yine bu dönemde betonarmenin popülerlik kazanmasıyla, özellikle köprü tabliyelerinde tercih edilen bir malzeme türü olmuştur. Dönemde diğer malzemelerde önemli gelişmeler gerçekleşmesine rağmen, ahşap üzerine çalışmalar hız kaybetmiştir. Koruma ve birleşim türlerinin uygulanabilirliği alternatif malzemelerin gerisinde kalmaktadır. Ancak 1940’larda *glulam* olarak da anılan yapıştırma lamine ahşabın yaygınlaşması, köprüler başta olmak üzere ahşap yapıları yeniden gündeme getirmiştir ve ahşap üzerine yapılan araştırmalar ivme kazanmaya başlamıştır (Crocetti, 2014; Partov vd, 2016; Ritter, 1990).

Glulam, ahşap inşaatlarında büyük yer tutmaktadır. İleride özellikleri daha detaylı açıklanacak olan yapıştırma lamine ahşap, çeşitli ahşap parçalarının istenilen boyutta bir kesit elde edilecek şekilde tutkal görevi gören bir yapıştırıcı ile bağlanması olarak özetlenebilir. Malzeme, Alman Otto Karl Friedrich Hetzer tarafından üretilmiş ve 1901 yılında patenti alınmıştır. Başta *Hetzer* sistemi ya da inşaatı olarak anılmakla beraber, endüstrileşmiş Avrupa ülkelerinde hızla yaygınlaşmıştır. Bilinen ilk uygulaması 1890 yılında *Berlin Reichstag* binasında 10 m uzunluğundaki kirişlerdir. Ardından Stockholm *The Central Railway Station* gibi önemli yapılarda da kullanım örnekleri görülmektedir. Ancak, 1.Dünya Savaşı sırasında malzemede kullanılan yapıştırıcının süttten elde edilmesi ve savaş durumunda süt kıtlığı yaşanması ile popülerleşmesi durmuştur. 1920’li yıllarda teknoloji Amerika’ya da sıçramış olup 1940 itibari ile başta Amerika olmak üzere tüm endüstrileşmiş ülkelerde yaygınlaşmıştır. Buna 2.Dünya Savaşı sırasında çelik kullanımının kısıtlanması da büyük katkı sağlamıştır (Rhude, 1996, 1998; Seraphin, 2003).

Gelişmeleri birçok endüstrileşmiş dünya ülkeleri takip etmektedir. Lamine ahşap ile İngiltere’de köprü, çatı, hatta kabuk yapılar inşa edilmiştir. *The Wilton Carpet Factory* hiperbolik parabol kabuk çatısı dönemin ilginç örneklerindendir. Şekil 1.3’te *The Wilton Carpet Factory*’nin hiperbolik parabol kabuk çatısı gösterilmiştir (Sutherland, 2010).



Şekil 1.3 *The Wilton Carpet Factory* hiperbolik parabol çatısı (Sutherland, 2010)

Yine bu dönemde, özellikle köprülerde dış etkiler nedeniyle ciddi derecede bozunmalar yaşanmaya başlamıştır. Bu durum, mühendislerin dikkatini yeniden ahşaba çekmiştir. Ahşap sadece yeni köprülerin imalatında değil, mevcut köprülerin iyileştirilmesinde de değerlendirilmeye başlanmıştır. Gelişen malzeme kalitesi ve koruma yöntemleri ile ahşap köprüler uzun servis ömürlerine ulaşmış ve ömürleri içerisinde iyi performans göstermiştir. Ahşabın başlangıç maliyetleri ve yaşam döngüsü analizleri sonuçlarına göre ahşap ile alternatiflerinden daha ekonomik çözümler üretilebilmiştir. Tüm bu gelişmelere ve avantajlarına rağmen inşaat sektöründe ahşap yeterince büyük bir yer alamamıştır. Bu durumun nedeni, ahşaba yönelik bilgi birikiminin çelik ve betonarme inşaatları ile ilgili bilgi birikiminin çok gerisinde kalması olarak değerlendirilmektedir (Crocetti, 2014; Partov vd., 2016; Ritter, 1990).

1.1.5 Modern ahşap yapılar

Ahşap, günümüzde sıklıkla kullanılan betonarme ve çelik inşaat yöntemlerine güçlü bir alternatif haline gelmiştir. Bu günlerde ahşabın önemli uygulama alanları

köprüler ve binalardır. Bunun haricinde, ahşap-çelik, ahşap-beton/betonarme, ahşap-lifli polimer gibi kompozit sistemler de dikkat çekmeye başlamıştır (Fragiacomo, Gregori, Xue, Demartion ve Toso, 2018; Plevris ve Triantafillou, 1992; Winter, Tavoussi, Pixner ve Parada, 2012).

Endüstriyel ahşap ürünlerinin ortaya çıkışı ile ahşabın pek çok dezavantajı yok sayılır hale gelmiştir. Laminasyon teknolojisi ile artık arzu edilen kesitler malzeme sarfiyatını en aza indirerek temin edilebilmektedir. Bunun yanında ahşap, budak gibi kusurlarından arındırılabilir hale gelmiştir. Ahşaptaki bu devrim, yapıştırma lamine ahşap ile sınırlı kalmamıştır. Ahşap artıkları ile yonga levha gibi yapı malzemeleri üretilebilmekte ve yapı sistemlerinde kullanılabilir. Bu tür malzemeler ile yapma I kesitlerden, perde ve döşeme gibi panel elemanlara kadar geniş yelpazede eleman türleri kolaylıkla üretilebilmektedir. Bunun yanı sıra, ahşabın doğal anizotrop yapısına bağımlılık, çapraz lamine ahşap teknolojisi ile nispeten ortadan kalkmıştır denilebilir.

1940’larda ahşap inşaat teknolojisinde malzeme kalitesi, birleşim tipleri gibi temel konulardaki gelişmeler ile ahşap köprüler yeniden gündeme gelmiş olup Dünya’nın çeşitli bölgelerinde ahşap yapılar modern yöntemlerle uygulanmaya başlanmıştır. Modern ahşap köprülerin kullanım alanları ve uygulama çeşitliliğini temsilen; Norveç-Tynset Köprüsü, İsveç-Skellefteå Köprüsü, Amerika-Overpeck Park Köprüsü, Kanada-Mistissini Köprüsü ve Hırvatistan-Trogir Köprüsü verilebilir. Bu köprüler işletmede olup sırasıyla 70 m, 130 m, 60 m, 160 m ve 25 m açıklığa sahiptir. Köprülerin çoğunluğu karayolu köprüsü olup geneli yapıştırma lamine ahşapla inşa edilmiştir. Taşıyıcı sistemleri kemer, kablolu, kiriş gibi çeşitli sistemler veya bu sistemlerin bir arada kullanımı ile oluşturulmuştur. Dahası, günümüzde 1 km toplam açıklığa sahip olacak köprülerin tasarımları ve değerlendirilmesi yapılır hale gelmiştir (Crocetti, 2014; Gilham, 2015; Lefebvre ve Richard, 2014; O’Born, 2018). Şekil 1.4’te Kanada-Mistissini Köprüsü verilmiştir.



Şekil 1.4 Kanada-Mistissini Köprüsü (Lefebvre vd., 2014)

Ahşap yalnızca orta ve büyük açıklığa sahip köprülerde değerlendirilmemektedir. Yüzey perdahı ya da başka bir işlem yapılmaksızın, doğrudan ahşap kütükler aracılığıyla köy yolu gibi düşük trafik hacimleri karşılanabilir. Amerika’da ve Kanada’da sıklıkla kullanılan bu sistem, genellikle 5-20 metre net açıklıklara uygulanmaktadır. Sistem, yapıştırma lamine ahşap ya da ahşap panellerle doğrudan köprü tabliyesine yük taşınmak suretiyle de yapılabilmektedir (Ritter, 1990).

Ahşap köprü uygulamalarında net sınırları belirlemek güçtür. Tasarım gereksinimlerine karşılık malzeme, taşıyıcı sistem, tali eleman veya örgü eleman kullanımı, öngerme ve ard germe sistemleri kullanılabilir.

Modern zamanlarda ahşap yapı uygulamalarının bir önemli alanı olan binalarda da çeşitli sistemler bulunmaktadır. Ahşap bina denildiğinde genelde büyük yapı oturma alanına sahip olmayan, az katlı konut türü yapılar akla gelmektedir. Günümüzde bu tür sistemler, betonarme sürekli ya da radye temellere oturtulan, kereste ve plywood, OSB(oriented strand board) gibi panel elemanla teşkil edilen taşıyıcı duvarlar ile yapılmaktadır. Ancak, özellikle 2000 yılı sonrası ahşap binalarda çok çeşitli uygulamalar görülmektedir. Moment çerçeve, çaprazlı çerçeve, CLT(çapraz lamine ahşap) panellerden teşkil perde duvar gibi sistemler görülebilmektedir.

Günümüzde ahşap çok katlı yapılar yaygın olmamakla beraber uygulanmaya başlamıştır. Guinness rekorlarına göre dünyanın en yüksek ahşap binası Norveç

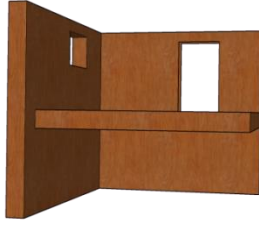
Brummunddal’da bulunmakta olup 18 katlı ve 85,4 m yüksekliğindeki *Mjøstårnet*’tir (Şekil 1.5). Yapı, yapıştırma lamine ahşap kolon, kiriş ve kafeslerden oluşmaktadır. Ayrıca, CLT paneller ikincil taşıyıcı eleman olarak da kullanılmıştır (Abrahamsen, 2017).



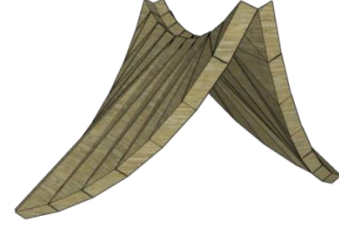
Şekil 1.5 *Mjøstårnet* taşıyıcı sistemi-Norveç (Abrahamsen, 2017)

Ahşabın çok katlı yapı uygulamalarına başka örnekler olarak Kanada Britanya Kolumbiyası Üniversitesi’nde bulunan 18 katlı öğrenci yurdu olan *Brock Commons Tallwood House* verilebilir. Yapının taşıyıcı sistemi; temel, yürüme platformu, merdiven ve asansör perdelerinin yerinde dökme betonarme kullanılması ve ahşap döşeme panelleri ve kolonlarından oluşmakta olup hibrittir. Yapı oturma alanı 840 m² olup 54 m yüksekliğindedir (Staub-French vd., 2021). Bir başka ilgi çekici uygulama ise Romanya’da bulunan *Sapanta-Peri* Kilisesi’dir. Kilise 78 m yüksekliğinde olup, 400 m³ ahşap kullanılarak yapılmıştır (Langenbach, 2010).

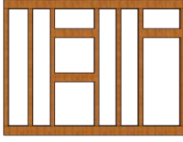
Verilen ahşap yapı örneklerinden de anlaşılaacağı üzere, ahşap ile modern zamanlarda çok çeşitli uygulamalar yapabilmek mümkündür. Basit, aile tipi konuttan büyük açıklığa sahip karayolu köprüleri ve çok katlı yapı örneklerine kadar uygulama alanına sahiptir. Şekil 1.6’da, günümüzde sıklıkla kullanılan ahşap yapı sistemi örnekleri verilmiştir.



Şekil 1.6.1 Panel sistemler



Şekil 1.6.2 Karmaşık sistemler



Hafif çerçeve



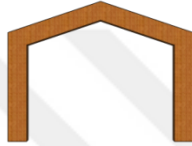
Modüler sistemler



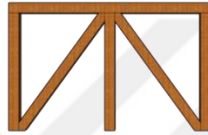
Dolu gövde



Kemer



Portal çerçeve



Çaprazlı çerçeve



Kafes



Kafes kemer

Şekil 1.6.3 Çerçeve sistemler

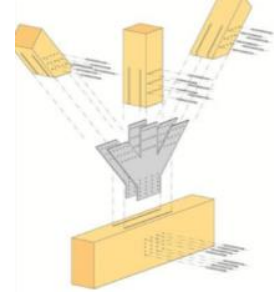
Şekil 1.6.4 Kiriş sistemler

Şekil 1.6 Modern ahşap yapı taşıyıcı sistem örnekleri

Ahşabın modern devrinin bir önemli bileşeni ise birleşimlerdir. Ahşap yapı sistemlerinde birleşimler tutkal, çelik, ahşap gibi elemanlar ile oluşturulabilmektedir. Birleşim türü seçiminde yükleme durumu, yapı ömrü gibi çeşitli tasarım kriterleri etkin rol oynamaktadır. Ahşap yapı birleşimlerinin alternatiflerinden farklı yanı çeşitliliğidir. Tek katlı konut tipi yapılarda 5x10 kereste ile plywood gibi panel elemanlardan teşkil duvarlarda çivi kullanılabilirken, CLT gibi panel elemanlar ya da moment çerçevelerde çelik yapılarda da sıklıkla kullanılan guseli birleşimler, korniyerli birleşimler gibi detaylar uygulanabilir. Şekil 1.7’de modern ahşap yapılarda kullanılan birleşim örnekleri verilmiştir.



Mjostarnet kolon-çapraz-temel birleşimi
(Abrahamsen, 2017)



Ahşap kafes düğüm detayı
(Crocetti, 2014)

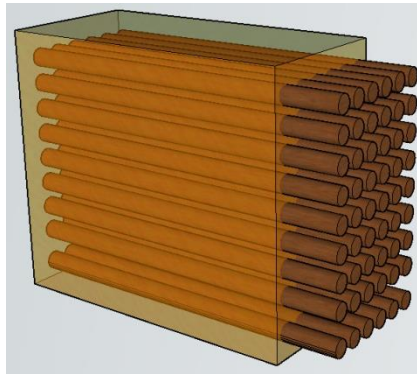
Şekil 1.7 Ahşap birleşim örnekleri

BÖLÜM 2

AHŞAP MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ

Bir yapıyı doğru şekilde inceleyebilmek için malzeme özelliklerinin anlaşılması ön koşuldur. Bu durum ahşap yapıların incelenmesini daha zahmetli hale getirmektedir. Çünkü ahşap esaslı malzeme çeşitliliği çok geniş olup, genel yapısal özellikleri haricinde benzerlik göstermemektedir.

Ahşap kabaca bir reçine matrisi içerisinde yerleştirilmiş liflerden oluşan doğal malzeme olarak tanımlanabilir. Doğası gereği özellikleri, temin edildiği ağacın türünden, ağacın bölgesinden, mevsimden, coğrafyadan ve ağacın yapısına etki edebilecek çeşitli dış faktörlerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu durum ahşabı heterojen ve anizotrop bir malzeme yapmaktadır. Anizotrop yapısı ihmal edilemeyecek kadar önemlidir. Bir ahşap malzeme 3 yönde farklı davranış göstermektedir. 3 boyut altında 6 farklı deformasyon parametresinden ve bunlara karşılık gelen 6 farklı gerilmeden söz edilebilir. Bunlar; aksel kuvvet, kesme kuvvetleri, eğilme momentleri ve burulmadır. Ancak ahşap göz önüne alındığında bu parametreler daha da artmaktadır. Çünkü ahşabın basınç ve çekme mukavemetleri genellikle benzerlik göstermemekte olup, eğilme dayanımı da bu değerler üzerinden elde edilmemektedir (Borgström, 2016). Şekil 2.1’de ahşabın kompozit yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Ahşabın temsili lif-reçine matrisi

Buraya kadar anlatılanlar, ahşap kökenli malzemelerin genel anlamda ortak özellikleri olarak gösterilebilir. Ancak buradan sonrasında malzemeler ayrı başlıklar

altında incelenecektir. Çünkü her malzeme farklı bir yapıya sahip olup, farklı amaçlarla üretilmektedir. Bu durum, malzemelerin yük altındaki davranışlarını büyük ölçüde etkilemektedir.

2.1 Endüstriyel Ahşap Ürünleri

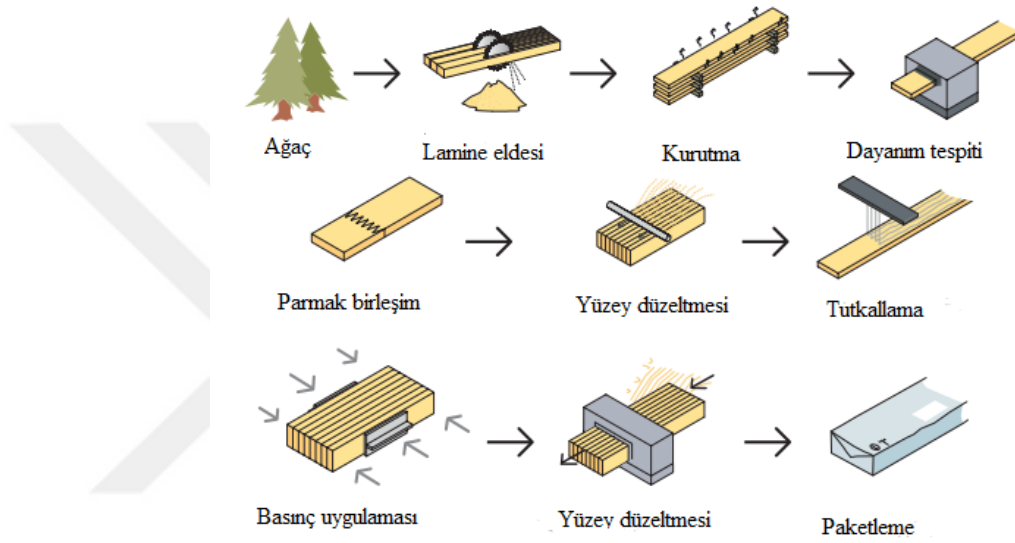
2.1.1 Masif Ahşap

Masif ahşap veya ahşap, günümüz modern inşaat yönteminin ve geleneksel ahşap inşaatlarının en temel örneğidir. Masif ahşap; ağaç gövdelerinin kabuktan ayrılıp, çeşitli mekanik ve kimyasal işlemlerden geçerek arzu edilen boyutlarda ve standart boyutlarda üretilen, dolu gövdeli elemanlardır. Genellikle 5*10 veya 10*10 boyutlarında kolaylıkla temin edilebilir. Genel anlamda çatı, yığma yapıların duvar dikmeleri ve diğer bölme elemanlarında dikme veya kiriş olarak, betonarme inşaatlarda kalıp olarak yoğunlukla kullanılmaktadır. Malzemenin en büyük dezavantajı olarak yüksek kesit elde edilmesindeki zorluk gösterilebilir. Masif ahşap, kabuktan ayrılmış ağaç gövdelerinden oluşturulduğundan, çıkarılabilecek en büyük boyutu ağaç gövdesinin yaklaşık çapını aşamayacaktır. Bu durumda büyük kesit çıkarmak hem ahşap zayıflığına sebebiyet verir, hem de hacimce büyük kütleden doğrudan büyük kesit çıkarılması, ahşabın kusurlarının eliminasyonunda çeşitli pürüzler çıkarmaktadır (Borgström, 2016).

2.1.2 Yapıştırma Lamine Ahşap

Yapıştırma lamine ahşap, endüstriyel ahşap ürünlerinin ya da mühendislik ahşabı olarak anılan ahşap kökenli yapı malzemeleri arasında ilk geliştirileni olup, tarih içerisinde çok önemli bir yer kaplamaktadır. Benzer şekilde, günümüzde de en popüler ahşap ürünlerinden birisidir. Yapıştırma lamine ahşap veya kısaca lamine ahşap, masif ahşaba benzer şekilde ağaç gövdesinden belirli yöntemlerle alınan ahşap katların çeşitli yapıştırıcılarla katlama halinde arzu edilen kesitin elde edilmesi ile oluşan üründür. İşlem Şekil 2.2’de verilmiştir. Bu yönüyle yapıştırma lamine ahşabın çok önemli avantajları vardır. İstenilen kesit, pahalı olan ahşap malzeme zayıflığı

verilmeden üretilmekte, bu sayede ağaç gövdesi çok daha verimli şekilde kullanılabilir. Ayrıca elde edilebilecek kesit boyutları neredeyse sınırsızdır, ağaç gövdesinin doğal sınırları bir engel teşkil etmemektedir. Buna paralel olarak, çok daha küçük boyutlardaki ahşap plakların laminasyonu ile elde edildiği için, kusurdan ciddi oranda arındırılmış bir malzeme elde edilmektedir. Yapıştırma lamine ahşabın kullanım örnekleri Bölüm 1’de detaylıca verildiği için burada verilmeyecektir. Bunun haricinde ürünün mekanik ve kimyasal özellikleri masif ahşapla benzerlik gösterdiği söylenebilir (Borgström, 2016).

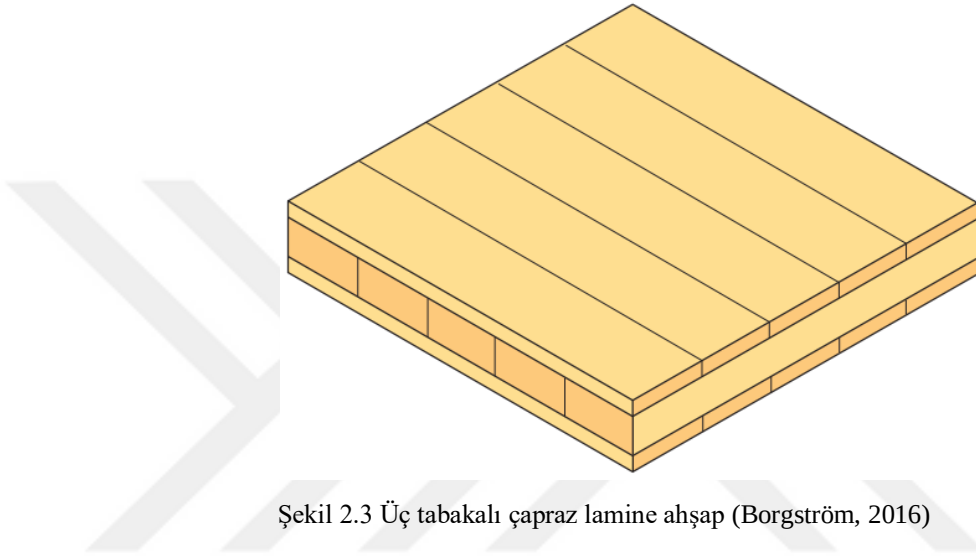


Şekil 2.2 Yapıştırma lamine ahşap üretim süreci (Borgström, 2016)

2.1.3 Çapraz Lamine Ahşap

Çapraz lamine ahşap, yeni milenyumun başlangıcı itibariyle gittikçe popülerleşmekte ve umut vadeden bir malzeme haline gelmektedir. Çapraz lamine ahşap, lamine ahşaba benzer olarak üretilmekte olup farkı, plak eleman elde edilmesi ve kat düzenlemesidir. Lamine ahşapta genelde katlar lif yönü dikkate alınarak düzenlenir, bütün lifler aynı yöne bakmaktadır. Bu düzenlemede amaç bir çubuk eleman elde etmektir. Çapraz lamine ahşapta ise kesit yüksekliği lamine ahşap kadar yüksek olmayıp amaç plak eleman elde etmektir. En az 3 kat ile elde edilen çapraz lamine ahşap ya da kısaca CLT, farklı katlara da sahip olmakta olup 60 mm ile 500 mm kalınlık gibi çeşitlilik gösterebilir. Katlar, her bir katın lifleri farklı yöne bakacak şekilde düzenlenir. Bu sayede daha yüksek mukavemete sahip, daha simetrik bir

malzeme elde edilmiş olur. Günümüzde çok katlı ahşap yapılarda neredeyse vazgeçilmez olup; perde duvar veya kat diyaframı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Malzeme ile günümüzde yeni yeni ilk örneklerinin görüldüğü çok katlı ahşap yapılarda önemli bir yeri vardır. Bunun nedeni, malzemenin hafif, yeterince mukavemetli ve prefabrik oluşu ile tüm kat dışarda imal edilip, modül olarak sahada montajının gerçekleştirilebilmesidir. Bu sayede inşaatlar çok hızlı gerçekleşmektedir. Şekil 2.3'te CLT'nin genel yapısı verilmiştir (Borgström, 2016).



Şekil 2.3 Üç tabakalı çapraz lamine ahşap (Borgström, 2016)

2.1.4 Plywood

Plywood, lamine ahşaptan sonra ilk geliştirilen endüstriyel ahşap ürünlerinden birisidir. Plywood, lif doğrultusu birbirine dik olacak şekilde ahşap katların yapıştırılması ile elde edilmektedir. Plywood'u diğer yapıştırma lamine ahşaptan farklı kılan özelliklerinden birisi, çok ince ahşap katları ile elde ediliyor olmasıdır. Kat sayısı her zaman tek olacak şekilde ayarlanmaktadır, böylelikle ilk kat ve son katın lif doğrultusu aynı olmaktadır. Bu doğrultu, genelde panelin uzun tarafı yönündedir. Genellikle standart boylarda üretilmektedir. Günümüzde çok popüler bir şekilde kullanılmaktadır. Plywood, betonarme yapılarda kalıp, yapı bölme ve taşıyıcı duvarların, döşeme veya benzer düzlem elemanlarda ise panel oluşturma amacıyla sıklıkla kullanılmaktadır (Borgström, 2016).

2.1.5.Diğer Malzemeler

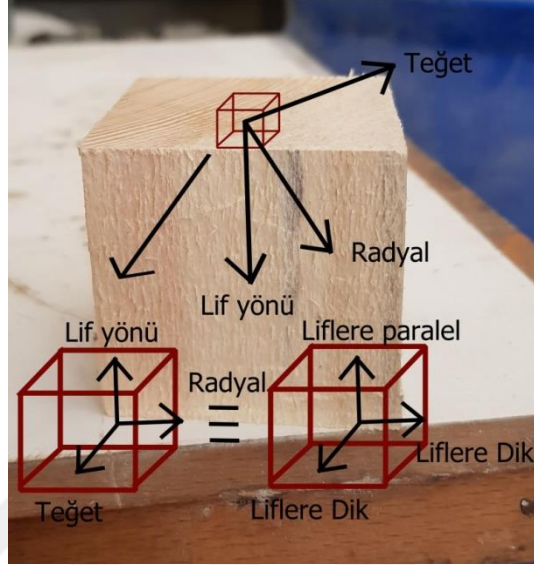
Ahşap ile elde edilebilecek ürün türü neredeyse sınırsızdır. Amaç ve buna bağlı olan ihtiyaçlara bağlı olarak ahşabın göreceği işlem sayısı ve çeşitliliği değiştirilebilir. Ancak temelde ve popüler olarak 3 yöntem bulunmakta olup, bunların en yaygın olanları önceki alt bölümlerde açıklanmıştır. Bunun haricinde LVL(laminated veneer lumber), OSB, gibi çeşitli malzemeler de bulunmakta olup, benzer özelliklere sahip olduğu için ayrı bir başlıkta incelenmemiştir. Literatürde bir ahşap kökenli malzeme ile yapı tasarımında malzeme özellikleri açısından 3 büyük kriter tespit edilmiştir. Bunlar; malzemenin kullanım amacı, üretimi ve yapısal özellikleridir. Bu üç temel kriter doğru şekilde tespit edilebilirse, her çeşit ahşap yapı doğru şekilde incelenebilir. Ahşap inşaatlarında net uygulama sınırları ve zorunlulukları olmadığı için, daha fazla irdeleme yapılmamıştır.

2.2 Ahşabın Mekanik Özellikleri

Ahşap kökenli çeşitli endüstriyel malzemeler geliştirilmiş olsa da, mekanik özellikler bir noktaya kadar geliştirilebilmektedir. Endüstriyel ahşap ürünlerinin kendilerine has özellikleri daha ziyade tasarım kriterlerini ilgilendirmektedir. Bu nedenle her malzemenin mekanik özellikleri ayrı başlıklarda incelenmemiştir.

Ahşap, reçine matris içerisine yerleştirilmiş boru şeklindeki hücrelerden oluşan bir kompozit olarak değerlendirilebilir. Bu özelliği nedeniyle farklı yönlerde farklı mekanik özellikler göstermektedir. Dolayısıyla ahşap, anizotrop olarak değerlendirilmektedir. Ahşabın mekanik özellikleri değerlendirilirken yük yönünün liflere paralel, dik olması ya da lif boyuna, radyal ve teğet olarak özelleştirilebilmektedir (Şekil 2.4). Bu husus çerçevesinde ahşabı değerlendirebilmek için 12 parametreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar 3 yönde elastisite modülü, kayma modülü ve 6 farklı yön için poisson oranlarıdır. Ancak, poisson oranının benzerliği sayesinde bir takım özellikler ihmal edilebilir, bunun sonucu olarak liflere dik ve paralel elastisite modülü, kayma modülü ve poisson oranının bilinmesi yeterli

olabilmektedir. Bu yönlerle ilgili olarak mekanik özellikler ayrı ayrı değerlendirilmelidir (Borgström, 2016).



Şekil 2.4 Ahşabın ortotropik yapısı (Kişisel Arşiv, 2019)

2.2.1 Liflere Paralel Çekme ve Basınç

Ahşabın liflere paralel çekme altında davranışı elastik ve gevrektrir. Malzeme belirli bir sınıra kadar yüklendikten sonra göçme gerçekleşmektedir. Göçme iki farklı mod şeklinde gerçekleşebilir. Bu modlar lifler ile matris arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Ahşabın çekme altında göçmesi; liflerin birbirinden ayrılması şeklinde ya da matris ile beraber liflerde kopma şeklinde gerçekleşebilir.

Ahşabın liflere paralel basınç davranışı ise daha farklıdır. Reçine ve lif matrisi yük altında belirli bir orana kadar elastik kısalma şeklinde gerçekleşmektedir. Yük artışı ile beraber, bazı liflerde burkulma görülmektedir ancak malzeme sürekliliğini kaybetmemektedir. Burkulan lifin taşıdığı yük, diğer liflere aktarılabilir. Bu durum sayesinde basınç altında ahşap plastik davranış gösterebilir. Lif, reçine ve ahşabın karakteristik özelliklerine bağlı olarak plastik davranışta farklılıklar görülebilmekte olup, farklı malzeme modelleri 4.bölümde açıklanmıştır (Borgström, 2016).

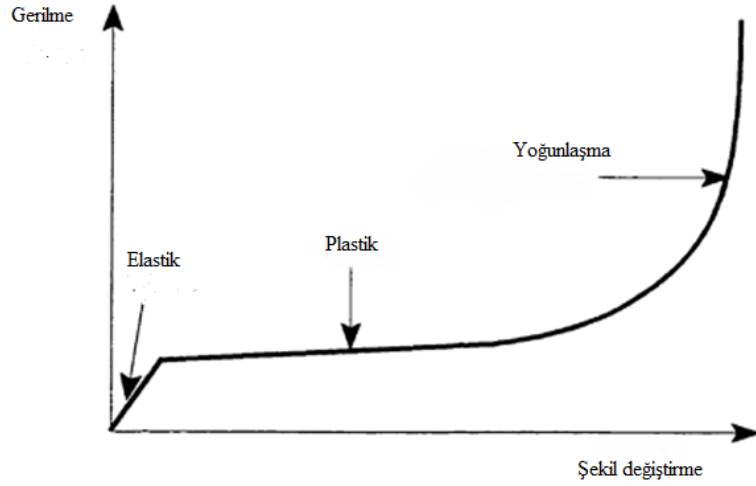
2.2.2 Liflere Dik Çekme ve Basınç

Ahşabın liflere dik çekme altında davranışı paralel çekme altındaki mukavemetine göre çok düşüktür. Elastik şekilde yüklenen malzeme gevrek bir göçme gösterir. Dolayısıyla, ahşabın liflere dik elastisite modülü de paralel yöndeki elastisite modülünden daha düşük olmaktadır (Borgström, 2016).

Ahşabın liflere dik basınç davranışında ise davranış neredeyse tamamen elastik ötesidir. Doğrusal davranış neredeyse hiç görülemeyebilir. Liflere dik basınç mukavemeti liflere paralel mukavemetinden çok daha düşük olmaktadır. Benzer durum elastisite modülü için de geçerlidir. Liflere dik basınç altındaki ahşapta lifler ezilmektedir. Ancak net bir göçmeden söz etmek zordur. Yük taşımaya liflerin katkısı az olsa da malzeme bütünlüğünü korumaktadır. Neredeyse sonsuza kadar sıkıştırılabilir bir malzeme olmaktadır. Bu husus *ahşabın yoğunlaşması* olarak bilinmektedir. Elastik limiti aştıktan sonra rijitliğini tamamen kaybetmiş bir plastik malzeme gibi akma davranışı görülür. Basınç kuvveti bu noktadan daha fazla artırılırsa ahşabın mikro yapısındaki hücreler göçer ve malzeme katı cisim davranışı göstermeye başlar. Ancak, hiçbir yapı bu kadar yer değiştirmeyi karşılayamayacağı göz önüne alınarak, taşıma gücü malzemenin bütünlüğünü kaybettiği nokta ile belirlenmektedir. (Şekil 2.5, Şekil 2.6) (Borgström, 2016; Tabarsa, 1999).



Şekil 2.5 5 cm küp ahşap numunenin liflere dik basınç yüklemesi öncesi ve sonrası (Kişisel Arşiv, 2019)



Şekil 2.6 Ahşabın liflere dik gerilme-şekil değişimi ilişkisi ve yoğunlaşma fenomeni (Tabarsa, 1999)

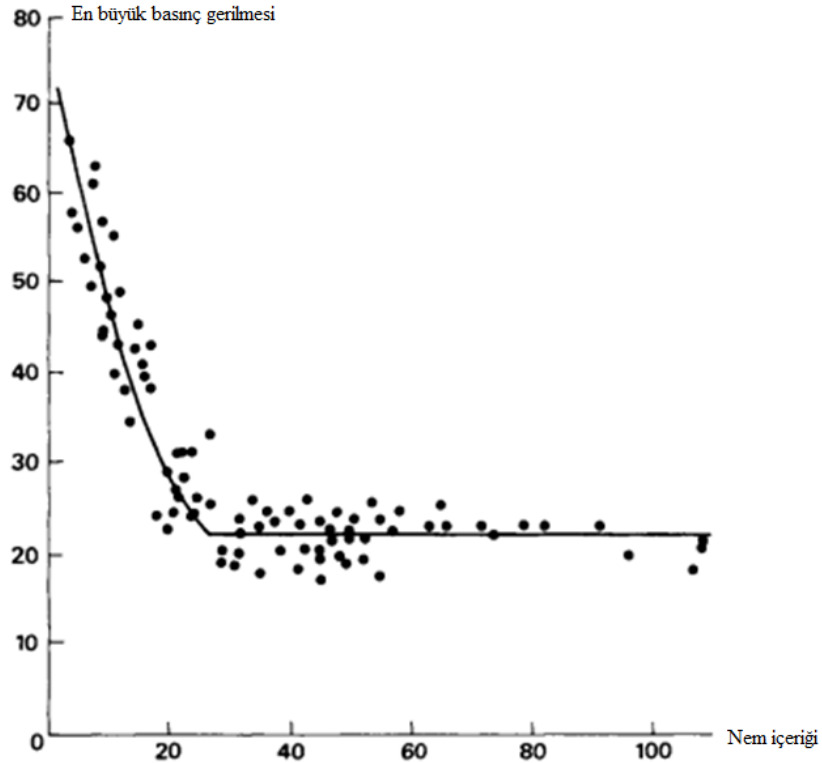
2.2.3 Ahşabın Dayanımını Etkileyen Parametreler

Ahşabın yük altındaki davranışı birçok etken tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Öyleki, yerinde gerçekleşecek durumlar, ahşabın malzeme karakteristiklerinin tasarım aşamasında belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu parametreler; nem, yükleme hızı, sıcaklık, boyut olarak özetlenebilir. Bunların haricinde anizotrop yapı, lif açısı, budak gibi kusurlar, ahşabın kimyasal ve fiziksel yapısı da önemlidir.

Günümüzde her ne kadar endüstriyel ahşap ürünleri olsa da, hiçbir işlem görmemiş ahşap ürünlerini de doğrudan kullanabilmek mümkündür. Her ne kadar ahşabın nem alışverişi çeşitli yöntemlerle izole edilebilse de ahşabın mukavemet özellikleri neme karşı çok hassastır ve bu nedenle yönetmelik tabanlı tasarımlarda önemli yer tutmaktadır (Dinwoodie, 2000).

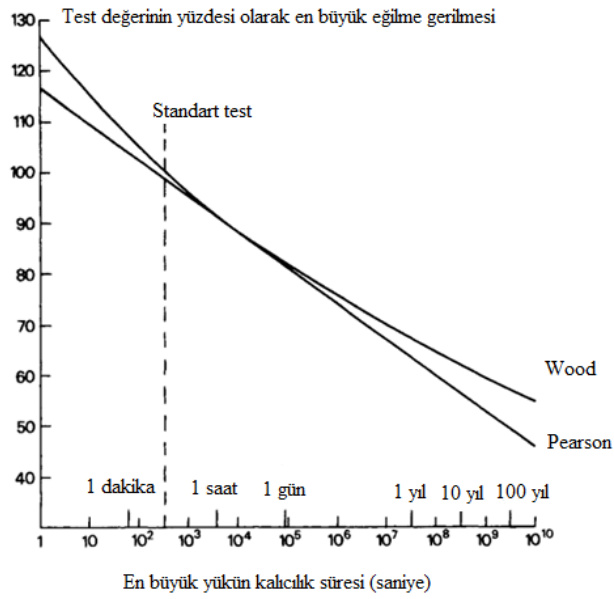
Ahşap, doğal bir nem oranına sahiptir. Ahşabın içerisindeki nem miktarı mühürlenmediği sürece hava ile alışveriş halindedir. Ahşabın nem ilişkisinde önemli bir nokta bulunmaktadır. Bu limite lif doygunluk noktası denir. Lif doygunluk noktası, lifleri oluşturan hücrelerin tam doygunluğa sahip olduğu durumda yapının geri kalan bölümlerinde hiç su bulunmaması durumu olarak açıklanabilir. Genel

anlamda, lif doygunluk oranından daha az nem oranına sahip ahşabın daha mukavemetli olacağı söylenebilir. Lif doygunluk oranından daha fazla neme sahip olan ahşabın mukavemet özelliklerinde ise önemli değişiklikler görülmemektedir. Özetle, nem oranı düştükçe ahşabın mukavemeti artar, yükseldikçe azalır denilebilir (şekil 2.7) (Dinwoodie, 2000).



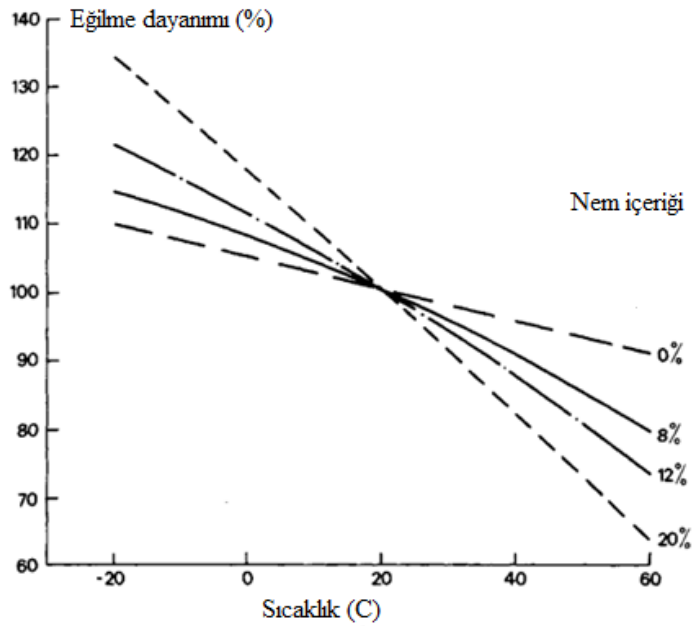
Şekil 2.7 Ahşabın nem içeriği ile maksimum basınç dayanımı arası ilişki (Dinwoodie, 2000)

Birçok yapı malzemesi yükleme hızına duyarlıdır. Ahşabın ise yükleme hızına önemli derece hassas olduğu söylenebilir. Yüklene oranı, yükün kalıcılığı gibi değerler ahşabın dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Kabaca, yükleme hızı arttıkça ahşabın mukavemeti yükselirken, düştükçe azalmaktadır (şekil 2.8) (Dinwoodie, 2000).



Şekil 2.8 Maksimum eğilme dayanımı ile yük süresinin ilişkisi (Dinwoodie, 2000)

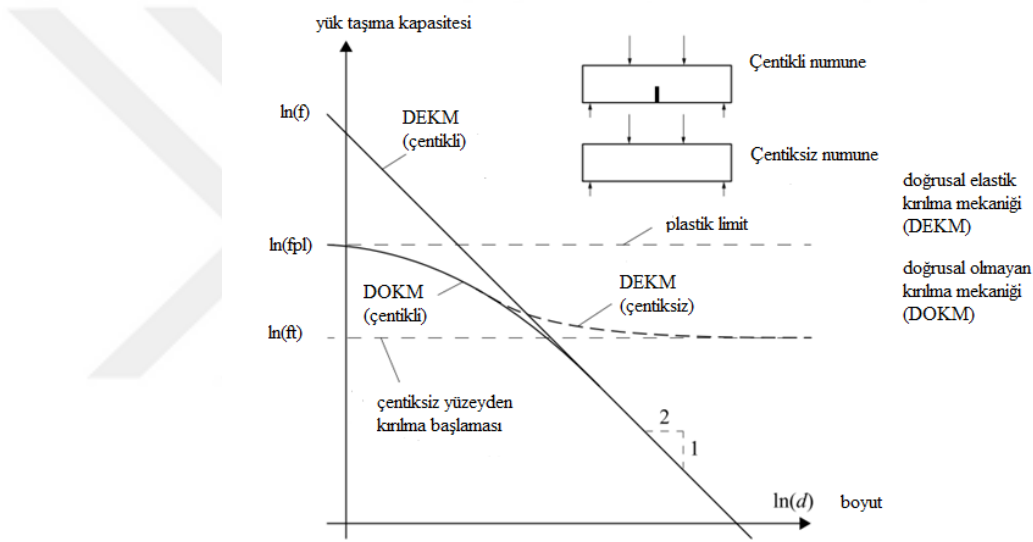
Ahşabın dayanımı ile sıcaklık arasında ilişki bulunmakta olup bu ilişki neredeyse doğrusaldır. Sıcaklık arttıkça dayanımın azaldığı söylenebilir. Ancak asıl etki doğrudan sıcaklık ile değil, sıcaklığın nem içeriği ile ilişkisinden kaynaklanmaktadır (Dinwoodie, 2016) (şekil 2.9).



Şekil 2.9 Ahşabın eğilme dayanımının nem içeriği ve sıcaklık ile ilişkisi (Dinwoodie, 2000)

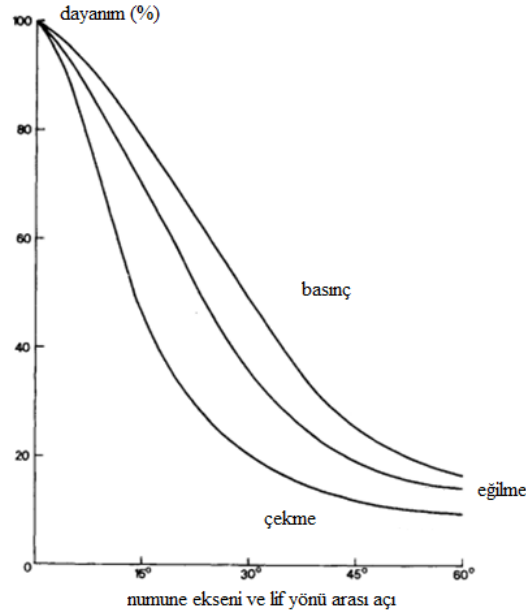
Şekil 2.9'dan görüleceği üzere sıcaklığın dayanıma etkisi nem içeriği ne kadar yüksek ise o kadar fazla olmaktadır.

Ahşap numunelerin dayanım testlerinde boyut etkisi görülmektedir. Öyleki, büyük numunelerin ortalama kırılma yükü küçük boyutlardaki numunelerin ortalamasından düşük çıkmaktadır. Bu durumu açıklamak için *Kısıtlar Kuramı* ve *Weibull Teorisi* gibi teorilerden yararlanılmaktadır (şekil 2.10) (Blank, Fink, Jockwer ve Frangi, 2017; Borgström, 2016; Weibull, 1939). Dolayısıyla boyut etkisinin tasarım sürecine dahil edilmesi gerekmektedir.



Şekil 2.10 Glulam numunelerin temsili boyut ve dayanım arasında ilişkisi (Blank vd., 2017)

Ahşap anizotrop bir yapıdadır. Bu durum sonucu malzeme üç yönde farklı özellik göstermektedir (Şekil 2.10) ve ortotropik bir malzeme olarak değerlendirilebilir. Liflere dik ve paralel yönde farklı davranmaktadır. Buna karşın yükleme dik veya paralel şeklinde ifade edilemeyebilir. Lif yönü ile yük arasında bir açı oluşabilir. Bu durumda davranış bu iki hal arasında olmaktadır (şekil 2.11). Açı ile dayanım arasındaki ilişki için *Hankinson Formülü* (Hankinson, 1921) gibi çeşitli yaklaşımlar literatürde bulunabilmektedir (Cowin, 1979; Dinwoodie, 2000).



Şekil 2.11 Ahşabın çeşitli dayanımları ile yük açısı arası ilişki (Dinwoodie, 2000)

Ahşap doğal malzeme olması nedeniyle yapısında bir takım kusurlar barındırmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden birisi budaklardır. Budak, ağacın dal kalıntısı olarak adlandırılabilir. Budak ahşabın lif doğrultusunda çarpıklıklara neden olmaktadır. Bu durumun mevcut olması dayanımı düşürmektedir. Budaklar boyutuna ve kesit içerisindeki dağılımına bağlı olarak davranışa etki etmektedir. Dolayısıyla budak varlığı yapısal analizlere dahil edilmelidir (Dinwoodie, 2000).

2.3 Ahşap Yapı Birleşimleri

Ahşap yapı birleşimleri alternatif inşaat türlerine oranla biraz daha farklıdır. Ahşap yapılarda tutkal, çelik gibi farklı elemanlar birleşim amaçla kullanılabilir olup, hiçbir eleman kullanmadan da elemanların birleşim bölgeleri konfigüre edilerek de birleşim yapılabilir. Ahşap 5*10'lar üzerine oturan bir kaplama elemanı ile oluşturulan döşemelerde çivi yeterli iken, çok katlı bir yapıda CLT panelleri perde duvarlara oturtmak için çelik yapılarda kullanılan korniyerli birleşim detayları uygulanabilir. Bu elemanların tasarım ve analizlerinde temel kriter; taşınacak yük, kullanılan malzeme ve geometri olarak açıklanabilir. Yük ve geometri çeşitli üzerinden sınıflandırmaya gitmek, sınıf miktarını artıracak ve gerçek uygulamaları

yeterince kapsamayabilir. Bu nedenle, bu tez kapsamında birleşimler malzeme ve birleşim tekniğinin temeli referans alınarak kategorize edilmiştir.

2.3.1 Geleneksel Birleşim

Bu birleşim, birleştirilecek elemanların birleşim bölgelerinde çeşitli işlemler sonucu birbirleri ile mekanik bir birleşim sağlayacak şekilde düzenlenmesi ile yapılmaktadır. Örnek bir birleşim Şekil 2.12’de verilmiştir. Bu tarz birleşimlerde detay, genellikle elle yapılmaktadır. Bu nedenle uygulanması için fazla zaman gerekmektedir ve zahmetli bir uygulama olmaktadır. Ayrıca, bu tarz birleşimin yük taşıma kapasitesi sınırlı olabilmektedir. Geleneksel, tek katlı veya iki katlı yığma yapı türlerinde ya da fazla yük taşınamayacağı çatı makası gibi elemanlarda kullanılabilmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12 Geleneksel birleşim örnekleri

Geleneksel birleşimler üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle tarihi yapılar incelererek gerçekleştirilmiştir. Kang, Yang ve Cha (2011) Çin’de bulunan tarihi yapıların geleneksel birleşimlerinin statik davranışı üzerine bir sonlu elemanlar çalışması gerçekleştirmiştir. Birleşimlerin yük aktarma mekanizması incelenerek kolon-kiriş birleşimlerinin rijitlikleri irdelenmiştir. Birleşim davranışının yarı rijit olduğu saptanarak rijitliğe birleşim konfigürasyonunun etkisi vurgulanmıştır. Benzer bir çalışma Moradei vd. (2018) tarafından raporlanmıştır. Geleneksel moment birleşimlerin modern ahşap yapılarda uygulanabilirliği araştırılmış olup bazı birleşim detaylarında sünek davranış elde edilebilmiştir. Buna karşılık, birleşim konfigürasyonuna bağlı olarak birleşim bölgesindeki boşlukta rijit

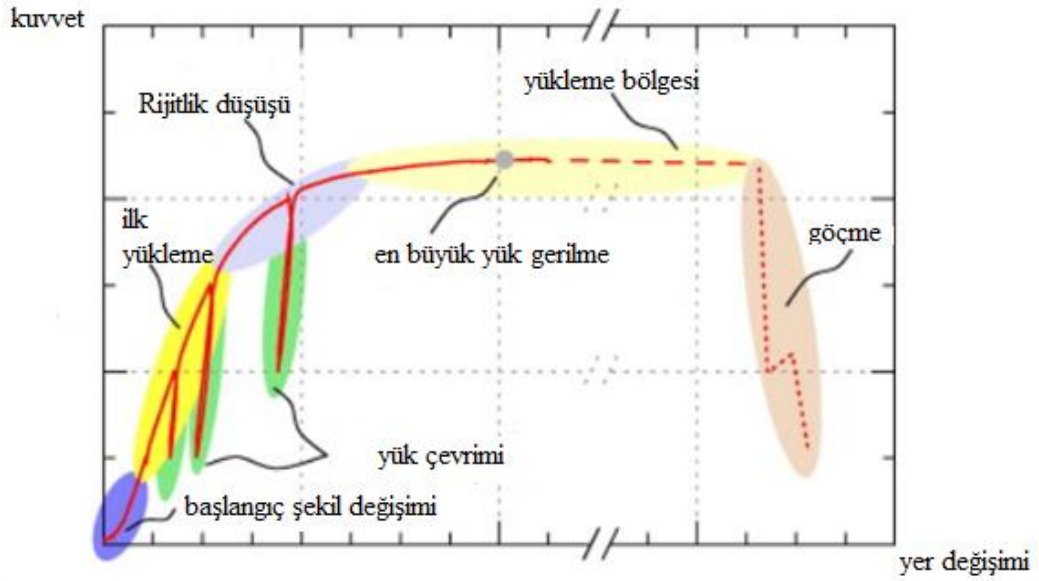
cisim hareketinin görülmesi nedeniyle neredeyse hiç rijitlik elde edilemeyen birleşim detayları da bulunmaktadır (Chang, Hsu ve Komatsu, 2006). Birleşim konfigürasyonunun davranışa etkisi başka çalışmalarda da raporlanmıştır (Pang, Oh, Park ve Lee, 2011). Chang vd. (2009) geleneksel birleşimlerin tek eksenli ve çift eksenli eğilme davranışını birleşimin yapı içerisindeki konumuna bağlı olarak incelemiştir. Çalışma sonucunda en düşük rijitliğin köşe birleşimlerinde elde edildiği görülmüştür. Ayrıca, çift eksenli eğilme altında birleşim rijitliğinin tek eksenli eğilme haline göre önemli düşüşler gösterdiği ifade edilmiştir.

2.3.2 Döbel Birleşimler

Döbel, genellikle iki eleman arasında birleşimin daha mukavemetli olmasını sağlamak için birleşim elemanının geçeceği deliğe plastik ya da farklı malzemelerden yapılmış yuva anlamına gelse de, ahşap yapılarda çok daha geniş bir anlam ifade etmektedir. Bu tarz birleşimde, birleştirilecek iki eleman arasında bir birleşim elemanı kullanılmaktadır. Bu eleman, genellikle yük doğrultusuna 90 açı ile yerleştirilir ve kesme kuvveti altında kalarak yük aktarır. Birleşim için elemanlarda delik açmak zorunluluk değildir. Birleşim elemanı olarak çivi, vida, döbel, dişli levha, civata veya bulon kullanılabilir. Yeterli rijitliğin sağlanamadığı durumlarda çelik, ahşap veya plastik gibi alternatiflerden çeşitli elemanlarla takviye yapılabilir. Bu tarz birleşim detaylarında diğer türlerden farklı olarak sünek davranış elde edilebilir (Borgström, 2016) (Şekil 2.5). Tipik bir döbel birleşimin yük-şekil değişimi Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13 Döbel birleşim örnekleri



Şekil 2.14 Döbel tipi birleşimlerin temsili yük-şekil değişimi ilişkisi (Dorn, de Borst ve Eberhardsteiner, 2013)

Şekil 2.14'e göre döbel tipi bir birleşimin yük-şekil değişimi ilişkisi 5 temel bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede birleşimin en yüksek rijitlik değeri elde edilmez. Bunun nedeni ahşap ile birleşim arasındaki temasın kusursuz olmamasıdır. Yük arttıkça ahşap ile birleşim elemanı arası yüzey teması daha üniform hale gelmektedir. Bu durumun olduğu ikinci bölgede elemanın en yüksek rijitliği elde edilebilir. Yükün daha da artırılması ile rijitlikte önemli mertebede düşüşler elde edilir. Bu durum kullanılan birleşim elemanı ile önemli derecede ilişkilidir. Çelik birleşim olduğu düşünülürse döbelde plastik mafsallaşma nedeniyle rijitlikte düşüş görülebilir. Bunun haricinde ahşap matrisin plastik davranışı da rijitlik düşüşüne sebep olmaktadır. Kullanılan malzemelere göre bir akma platosu görülebilir. Yükün daha da artırılması neticesinde birleşim yük taşıma kapasitesini kaybederek göçme gerçekleşir (Dorn vd., 2013).

2.3.3 Yapıştırma Birleşimler

Yapıştırma, yalnızca yapı birleşimi için değil, yapma enkesit elde edilmek için de kullanılabilir. Belirli bir uygulama sınırı yoktur, yapıştırma amacıyla genelde tutkal yerine geçebilecek birçok malzeme kullanılabilir (Borgström, 2016) (Şekil 2.15).

Yapıştırma teknikleri yalnızca ahşap-ahşap birleşimlerde değil, ahşap-lifli polimer veya ahşap-çelik elemanlar arasında da kullanılabilir (Tlustochowicz, Serrano ve Steiger, 2011; Zhu, Faghani ve Tannert, 2017).



Şekil 2.15 Yapıştırma birleşim örnekleri

2.3.4 Mekanik Birleşimler

Mekanik birleşimler, prefabrik inşaatlarda gördüğümüz birleşim detaylarını kapsamaktadır. Çelik yapılarda rijit, yarı rijit ya da mafsallı birleşim detayları neredeyse birebir olarak iki ahşap çubuk elemana uygulanabilmektedir. Buna ek olarak çivili levha, dişli levha gibi elemanlar, özellikle kafes sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır (Şekil 2.16 ve Şekil 2.17). Bu birleşim detaylarına ahşap-çelik kompozit sistemlerde de rastlanmaktadır (Karagiannis, Malaga-Chuquitaype ve Elghazouli, 2017).



Şekil 2.16 Ahşap mekanik birleşim örnekleri



Şekil 2.17 Ahşap kolon-kiriş birleşim detayı (Fairweather, 1992)

BÖLÜM 3

YÖNETMELİK TABANLI AHŞAP YAPI TASARIMI

Günümüzde çeşitli enstitü, devlet kurumu, meslek örgütü gibi otoriteler tarafından literatürdeki bilgi birikimleri ışığında çeşitli amaçlara yönelik tasarımlar için yönetmelik, standart, el kitabı, kılavuz gibi yayınlar üretilmektedir. Bu yayınlar, genel amaçlı mühendislik tasarımlarında önemli bir yol gösterici olmaktadır. Bunlar çeşitli amaçlarla özelleşmiş halde de yayınlanabilmekte olup, günümüzde önemli bir yer kaplamaktadır. Ahşap için, günümüzde iki popüler yönetmelik bulunmaktadır. Bunlar, Avrupa Komisyonu tarafından yayınlanan Eurocode 5:Design of Timber Structures(EN5) ve Amerika Ahşap Konseyi sorumluluğunda olan Design Specifications of Wood Construction'dur(AWC) (Avrupa Komisyonu [EC], 1995; Amerika Ahşap Konseyi [AWC], 2018). Ülkemizde, Türk Standartları Enstitüsü tarafından 1979 yılında kabul edilmiş TS-647:Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları bulunmaktadır(TS-647) (Türk Standartları Enstitüsü [TSE], 1979). Ancak, 2018'de ülkemizde Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği(TBDY-18) çerçevesinde ahşap yapıların depreme karşı tasarımı için EN5 referans alınmaktadır (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı [ÇŞB], 2018). Yönetmelik ve standartlar çerçevesinde yapı tasarımı literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Her ülke ve bölgede inşaat ve bayındırlık beklentileri farklı olabilmekte, bilgi birikiminde değişiklikler görülebilmektedir. Bu durum, farklı yönetmelikler çerçevesinde tasarlanan yapıların dayanım, ekonomi ve dayanıklılık açısından farklı sonuçlar elde etmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle, yapı tasarımında yönetmeliklerin kıyaslanması önemli bir yer tutmaktadır.

Showalter, Manbeck ve Pollcok (1998), AWC çerçevesinde ahşap yapı tasarımında Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) ve Emniyet Gerilmeleri ile Tasarım (EGT) ilkeleri arasında kıyaslama yapmıştır ve çalışma sonucunda YDKT ile tasarımın EGT ile elde edilen kesitlerden %30 daha küçük kesitler sağladığı görülmüştür.

Wacker ve Groenier (2010), Kanada'nın ahşap yapı tasarım yönetmeliği, EN5 ve AWC çerçevesinde ahşap köprü tasarımlarını incelemiştir. Yük kombinasyonları, malzeme dayanımlarının eldesi ve tasarım kuralları gibi etkenler çerçevesinde tasarım farklılıkları irdelenmiştir. Çalışma sonucunda NDS ve Kanada standartlarının EN5'ten daha ekonomik tasarımlar sağladığı görülmüştür ve bu durumun yük ve malzeme dayanımlarındaki farklılıklardan kaynaklı olduğu vurgulanmıştır. Groenier (2005) ahşap köprüleri YDKT ve EGT çerçevesinde incelemiştir ve YDKT çerçevesinde yapılan tasarımda daha düşük gerilme oranları elde edildiğini vurgulamıştır. Şakar ve Çelik (2020), ahşap ve lamine ahşap köprüleri AWC ve EN5 çerçevesinde değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda EN5'in NDS'den daha genel olması ve AWC'nin yapının yerinde tasarım özelliklerini daha özelleştirmesi nedeniyle daha ekonomik tasarımlara izin verdiğini vurgulamıştır. EN5 üzerine yapılan bir başka eleştiride yönetmeliğin yüksek kalitede olmasına ve iyi bir bilgi birikimine sahip olmasına rağmen pratik uygulamalar için fazla karmaşık, standart dışı uygulamalar için ise fazla yetersiz olduğu vurgulanmıştır (Dietsch ve Winter, 2012). Benzer bir çalışma EN5'in birleşim bölümü üzerine yapılmıştır. Bölümün tasarımcıyı yönlendirmedeki sorunları vurgulanarak çeşitli iyileştirmeler önerilmiştir (Stepinac, Cabrero, Ranasinghe ve Kleiber, 2018).

3.1 Eurocode 5:Ahşap Yapıların Tasarımı

Eurocode 5(EN5), Avrupa Konseyi tarafından düzenlenen ahşap yapı tasarımına yönelik bir standarttır. EN5, köprü ve bina olmak üzere iki kısma ayrılmıştır denilebilir ve diğer avrupa standartları ile birlikte kullanılmaktadır. Yönetmelik çerçevesinde tasarımlar, ahşabın yerinde maruz kalacağı özellikler göz önüne alınarak yapılmaktadır. Yönetmelik çerçevesinde ahşap kökenli malzemeler dikkate alınabilmekte olup bina ve diğer mühendislik yapıları incelenebilmektedir. Yangına karşı tasarım için ek bir bölüm bulunmaktadır.

Yönetmelik çerçevesinde tasarımlar, yük ve dayanım katsayıları ile tasarım ilkeleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu çerçevede elastik birinci mertebe ve elastik ikinci mertebe analizleri dikkate alınmaktadır. Doğrusal olmayan gerilme şekil

değiştirme ilişkisi ise yalnızca basınç altında davranış için elastik plastik olarak dikkate alınabilmektedir. Tasarım adımları EN5 çerçevesinde 2 temel adımda gerçekleştirilmektedir. Bu adımlar kabaca malzeme özelliklerinin düzenlenmesi ve elemanın eğilme, basınç gibi özel mukavemet durumlarına göre tasarlanması olarak açıklanabilir.

Yönetmelik çerçevesinde kullanılabilirlik sınır durumu ve taşıma gücü sınır durumu ayrı ayrı ele alınmaktadır. Bu işlem arasındaki en büyük kriter, malzeme özelliklerinin düzenlenmesidir. Yönetmelikte malzeme mukavemet özellikleri yükleme hızı, çevre koşulları ve boyut etkisine göre düzenlenmektedir. Boyut etkisi, elemana ve kullanım şekline bağlı olarak yönetmeliğin ilgili bölümlerinde verilmektedir. Bu düzenlemeler, yönetmelikte verilen çeşitli tablo ve formüllere göre bir düzeltme katsayısı ile yapılmaktadır. Bu katsayılar, doğrudan malzeme dayanımının eldesinde dayanım katsayısı ile birlikte kullanılmaktadır ([EC], 1995).

3.2 Amerika Ahşap Yönetmeliği

Amerika Ahşap Konseyi tarafından düzenlenen yönetmelik çerçevesinde görsel ya da mekanik olarak derecelendirilmiş ahşap, lamine ahşap, ahşap kazık ve direk, prefabrik I kesitler, kompozitler paneller ve CLT incelenebilmektedir. Yönetmelik, yapı türüne göre başka yönetmeliklerle birlikte kullanılmaktadır.

Yönetmelik çerçevesinde yapılar EGT veya YDKT ile birlikte tasarlanabilmektedir. Tasarımlar, elemanın kullanım amacı, göreceği çeşitli detaylandırma işlemleri, yerinde çevre özellikleri ve malzeme karakteristiklerine bağlı olarak verilen özel denklemler ile yapılmaktadır.

Yönetmelik çerçevesinde ahşap elemanlar kullanılan malzeme türüne ve yükün lif yönüne ve yükleme türüne özel olarak düzenlenmektedir. Düzenlemelerde EGT ve YDKT tasarım ilkelerinin gerektirdiği katsayılar haricinde; nem, ısı, stabilite, boyut, kullanım, çeşitli detaylandırma işlemleri ve etkin alanlar dikkate alınarak düzenlenmektedir. İşlemler her bir mekanik özelliğe ayrı olarak gerçekleştirilmekte

olup, EN5'e göre daha özeldir ve tasarımcının kararlarına bırakılmaktadır ([AWC], 2018).

3.3 Yönetmeliklerin Kıyaslanması

Her iki yönetmeliğin çerçevesinde çeşitli pratik inşaat uygulamaları gerçekleştirilebilmektedir. Popüler her iki yönetmelik de günümüzde yapı marketlerinde kolaylıkla temin edilebilecek ahşap ürünleri ve birleşimlerini dikkate almaktadır. Kabaca, EN5'in AWC'ye oranla daha genel olduğu söylenebilir. EN5'te temelde 3 düzeltme katsayısı verilmekte iken, AWC'de düzenleme katsayısı daha özeldir ve tasarımcı kararına bırakılmıştır.

Ahşap yapıların depreme dayanıklı tasarımında durum daha farklıdır. Depreme karşı tasarım dökümanlarında ahşap yapı çeşitliliği çok daha sınırlıdır. Bu durum, özellikle dayanıma göre tasarım ilkeleri ile birlikte kullanılan yapı davranış katsayılarında görülmektedir. Tablo 3.2'de betonarme, çelik ve ahşap yapıların yapı davranış katsayıları verilmiştir. Tablodaki A, C ve F sembolleri TBDY-18'de ilgili bölümlerin sembolleri olarak verilen tabloda korunmuştur. Ahşap yapıların alternatiflerine oranla kısıtı Tablo 3.2 üzerinden karşılaştırmalı olarak görülebilir. Ülkemizde yürürlükte olan TBDY-18 çerçevesinde ahşap yapıların tasarımı çok sınırlıdır. Dayanıma göre tasarım ilkeleri ile ahşap yapı tasarımında yalnızca iki tür yapı tasarımı mümkün olup; bunlar, süneklik düzeyi yüksek çivili veya vidalı OSB veya kontrplak duvar panelleri ve süneklik düzeyi düşük çivi, vida ve bulon ile tutkallı duvar panelleri veya ahşap çaprazlı yapılardır. Buna karşın Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance'de (Avrupa Komisyonu [EN8], (1998) daha fazla yapı sistemi dikkate alınabilmektedir. Yönetmelik çerçevesinde konsol, kiriş, kemer, kafes, yapıştırma duvar panelleri ve diyaframlar, portal çerçeve gibi sistemler dikkate alınabilmektedir. Amerika'da, ahşap yapıların depreme dayanıklı tasarımına yönelik ayrıca bir yönetmeliği bulunmamakta olup, tasarım ilkeleri ASCE 7-16:Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures'de (Yapı Mühendisliği Enstitüsü [ASCE/SEI], 2016) verilmektedir. Buna göre, ahşap panellerden oluşan perdeler ve ahşap çerçeveler dikkate alınabilmektedir.

Günümüzde uygulanabilecek ahşap yapı sistemi çeşitliliği ile yönetmeliklerde dayanıma göre tasarım ilkeleri çerçevesinde, özellikle deprem etkisindeki tasarımların kısıtlılığı, ahşabın günümüz tasarımlarına karşılık zorlaştırmaktadır. Buna paralel olarak yönetmeliklerde ahşabın plastik davranışı yeterince irdelenmemektedir. Dahası, ahşap yapıların modellenmesi ve analiz ilkelerinde çeşitli boşluklar bulunmaktadır. Tüm bunların sonucu olarak tasarım kriterlerinden ziyade, ahşabın nasıl analiz edileceği ile ilgili çeşitli eksiklikler bulunmaktadır. Dolayısıyla, bu hususların irdelenmesi gerekmektedir.

Tablo 3.2 TBDY-18'e göre yerinde dökme betonarme, çelik ve ahşap yapılar

Betonarme	Çelik	Ahşap
Süneklik düzeyi yüksek sistemler		
A11	C11	F1
A12	C12	
A13	C13	
A14	C14	
A15	C15	
A16	C16	
Süneklik düzeyi karma sistemler		
A21	C21	Bulunmamaktadır
A22		
A23	C22	
A24		
Süneklik düzeyi sınırlı sistemler		
A31	C31	F2
A32	C32	
A33	C33	
TBDY ile değerlendirilebilecek toplam yapı sistemi sayısı		
13	11	2

Ülkemizde 1979 yılında kabul edilen TS-647 hala yürürlüktedir. TS-647 ile güncel yönetmelikler çeşitli çalışmalarda kıyaslanmış olup (Yüncüler, 2019;

Çalışkan, Meriç ve Yüncüler, 2019; Şakar ve Çelik, 2020) güncel olmadığı vurgulanmıştır. Dolayısıyla bu tez kapsamında detaylıca irdelenmemiştir.



BÖLÜM 4

AHŞAP YAPILARIN İLERİ ANALİZ YÖNTEMLERİ

Bir yapı sisteminin analizi, geometrik ve malzeme özelliklerinin derlendiği bir rijitlik matrisi ile düğüm yer değiştirme matrislerinin çarpımının düğüm kuvvetlerine eşit olduğu denklem üzerinden özetlenebilir olup Denklem 4.1’de verilmiştir (Çatal, 2014). Dinamik ya da statik analizler için, bir malzemenin yük deformasyon ilişkisi bilinmelidir. Buna ek olarak, dinamik analizler için sönüm de gerekmektedir. Bu bilgiler elde edildikten sonra yapı sisteminin matematiksel olarak modellenmesi gerekmektedir. Günümüzde birçok yönetmelik sonlu elemanlar yöntemini referans almaktadır. Ancak ahşap yapı elemanlarının analizleri için bu konuda da çeşitli boşluklar bulunmaktadır. Ahşabın malzeme yapısı, çeşitliliği, anizotrop ve heterojen yapısı nedeni ile hem modellenmesi hem de yapısal analizlerin gerçekleştirilmesi zor olmaktadır.

$$K * \delta = F \quad (4.1)$$

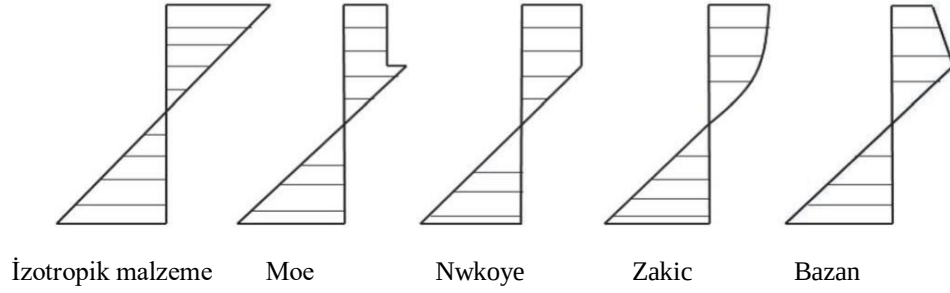
Denklem 4.1’de K, sistem rijitlik matrisi; F, sistem düğümlerine gelen dış kuvvet vektörü ve δ , sistem düğümlerinin yer değiştirme vektörüdür. Burada bilinmeyenler düğüm yer değiştirmeleridir. Dış kuvvetler ilgili mühendislik problemi çerçevesinde değerlendirilebilir. Önemli olan sistem rijitlik matrisinin nasıl elde edileceğidir. Sistem rijitlik matrisinin kurulabilmesi için malzeme ve geometrik özellikler bilinmelidir. Burada ahşaba özgü olan konu malzeme özelliklerinin hesaba nasıl dahil edileceğidir.

Doğrusal analizler için yönetmelikler, ahşap malzeme türü ve oluşturulacak eleman tipini dikkate alarak çeşitli yaklaşımlar önermiştir. Yönetmeliklerde genellikle; çapraz, kolon, kiriş gibi elemanlarda çubuk eleman; panel, döşeme gibi düzlem elemanlarda levha, kabuk gibi sonlu eleman türleri referans alınmaktadır. Yönetmelikler çerçevesinde yapılan tasarımlarda eleman dayanımı ve mukavemet hali, doğrusal olmayan analiz gibi ileri tasarım gereksinimleri ihtiyacı olan karmaşık yapılara göre daha basittir. Bu nedenle, ahşabın karmaşık yapı sistemlerinde

kullanımı veya düzenli geometriye sahip yapıları daha nitelikli tasarlamak amacıyla literatürde çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir.

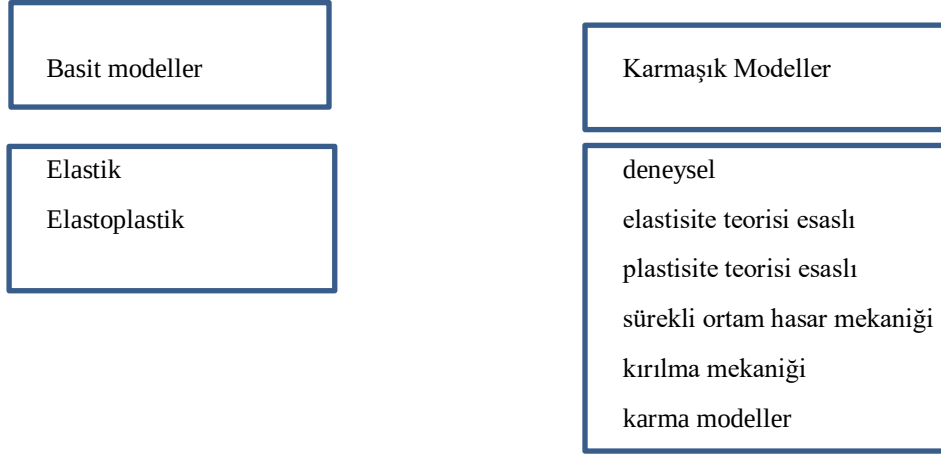
4.1 Ahşabın Yük-Deformasyon İlişkisi

Bugüne kadar ahşabın yük deformasyon ilişkisi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların amacı ahşabın yük altında deformasyon mekanizmasının anlaşılabilmesi ve yapısal analizlere dâhil edilebilmesi üzerinedir. Yapılan çalışmalar yük hali, modelleme tekniği gibi çeşitli başlıklarda sınıflandırılabilir. Yöntemlere geçmeden önce, Bölüm 2’de açıklandığı üzere ahşabın anizotrop yapıya sahip olduğu unutulmamalıdır. Buna göre ahşabın çekme ve basınç altında davranışı farklı olup, benzer şekilde liflere dik ve paralel davranışı da farklıdır. Çekme gerilmeleri altında ahşap neredeyse doğrusal davranarak gevrek bir göçme gerçekleştirir. Dolayısıyla genelde malzeme doğrusal elastik kabul edilmektedir ve bu durum çok fazla irdelenmemektedir. Buna karşın ahşabın basınç altında davranışı plastiktir. Dolayısıyla daha gerçekçi malzeme modelleri geliştirebilmek için bu dikkate alınmalıdır. Bu durumun anlaşılabilmesi için ahşap kirişin taşıma gücüne yönelik önerilen yöntemler iyi bir örnek teşkil etmektedir. Ahşap bir dikdörtgen kiriş göz önüne alınırsa kesitte gerilme dağılımının tarafsız eksen ile sınırlandırılmak suretiyle çekme ve basınç gerilmesi olacağı bilinmektedir. Çekme ve basınç davranışı farklı olduğu için ahşabın eğilme dayanımı için farklı modeller gerekmektedir. Yapılan analitik çalışma örnekleri; Moe (1991), Nwokoye (1972), Zakic (2003) ve Bazan (1980)’nin çalışmalarıdır. Bu öneriler Şekil 4.1’de malzemenin doğrusal elastik ve izotrop olması durumundaki gerilme şekil değişimi diyagramı ile birlikte verilmiştir.



Şekil 4.1 İzotropik ve elastik bir malzemenin eğilme altında kesitteki gerilme dağılımı ile çeşitli ahşap modellerinin karşılaştırılması (Cizmar, Damjanovic, Pavkovic ve Rajcic, 2014)

Ahşabın yapısal analizlerinde kullanılan malzeme modelleri çok çeşitlidir. Modeller genellikle; deneysel, elastisite teorisi esaslı, plastisite teorisi esaslı, sürekli ortam hasar mekaniği, kırılma mekaniği ve bunların birlikte kullanıldığı karma modeller olarak sınıflandırılmaktadır. Buna ek olarak tez kapsamında modeller için basit ve karmaşık olarak bir üst gruplandırma da yapılmıştır. Buna göre bu zamana kadar anlatılan modeller karmaşık modellerdir. Basit modeller ise; doğrusal elastik ve elastoplastiktir. Elastoplastik modeller elastik kusursuz plastik ya da çoklu eğriler şeklinde olabilir. Şekil 4.2’de modellerin sınıflandırılması görülebilir. Modeller ayrıca bazı çalışmalarda gerilme durumuna göre tek eksenli, çift eksenli ve üç eksenli olarak da sınıflandırılmıştır (Khorsandnia, Valipour ve Crews, 2013).



Şekil 4.2 Ahşap malzeme modellerinin sınıflandırılması

4.2 Ahşap malzeme modelleri

4.2.1 Basit modeller

4.2.1.1 Doğrusal elastik modeller

Doğrusal elastik modelde ahşabın hem çekme hem de basınç altında davranışı doğrusal elastik olarak modellenmektedir. Plastik davranış ihmal edilmektedir. Bu model genellikle yapısal analizlerde tercih edilmektedir. Yönetmeliklerde de bu model ağırlıklı referans alınmaktadır. En pratik yöntemdir. Yapı güvenlik tahkiklerinde tercih edilmesinin bir önemli nedeni de yapının doğrusal ötesi davranışta ahşaptan çok birleşime güvenilmesinden kaynaklıdır. Doğrusal elastik model yalnızca plastik davranışın ihmal edilmesi şeklinde kullanılmayabilir. Elastik ötesi sismik talebin birleşimlerle karşılanıp ahşap yapı elemanların elastik sınır altında bırakılması da bir tasarım felsefesi olarak uygulanabilir (Buchanan, Deam, Fragiaco, Pampanin ve Palermo, 2008; Fairhurst, Zhang ve Tannert, 2014). Modelin en büyük dezavantajı ahşabın ve ahşap yapı birleşimlerinin yüklemenin erken anlarında bile doğrusal olmayan davranış göstermesinin ihmal edilmesidir. Ancak bu ihmal analiz beklentileri ve yapı davranışının iyi bir şekilde tahmin edilebildiği durumda kullanışlı olabilmektedir (Reynolds, Casagrande ve Tomasi, 2016).

4.2.1.2 Elastoplastik modeller

Bu türde en yaygın kullanılan örnek elastik kusursuz plastik modeldir. EN5'e göre sistem tamamen basınca çalışıyorsa elastik kusursuz plastik model tasarımlarda kullanılabilir ([AC], 1995). Bunun haricinde elastik ötesi kısım için doğrusal yumuşama, doğrusal olmayan yumuşama, doğrusal pekleşme ve doğrusal olmayan pekleşme gibi modeller de bulunmaktadır (Pluess ve Zwicky, 2011). Bu tür modeller yapı elemanının elastik ötesi davranışının yapı davranışına büyük önem arz ettiği durumlarda tercih edilebilmektedir. Bunun haricinde bölgesel etkilerin önemli olduğu birleşimlerde de sıklıkla kullanılmaktadır. Karmaşık modeller kadar gerçekçi olmasa da basit modeller arası bir geçiş durumu temsil ettiği söylenebilir. Bu modelin kullanım örnekleri olarak; ahşap-çelik birleşimleri (Awaludin, Hirai, Hayashikawa ve Leijten, 2012), ahşap-beton birleşimleri (Dias, Lopes, Van de Kuilen ve Cruz, 2007), ahşap döşeme-çelik birleşimleri (Hassanieh, Valipur, Bradford ve Sandhaas, 2017) veya doğrudan yapısal analizler verilebilir (Jorissen ve Fragiacomio, 2011). Buna ek olarak bu model ayrıca elastik model ile birlikte karmaşık modeller için de bir temel teşkil etmektedir. Karmaşık modellerden basit modelleri ayıran en büyük etken, kırılma kriteri gibi günlük tasarımlar için pratik olmayan yöntemlerin kullanılmamasıdır.

4.2.2 Karmaşık modeller

4.2.2.1 Deneysel modeller

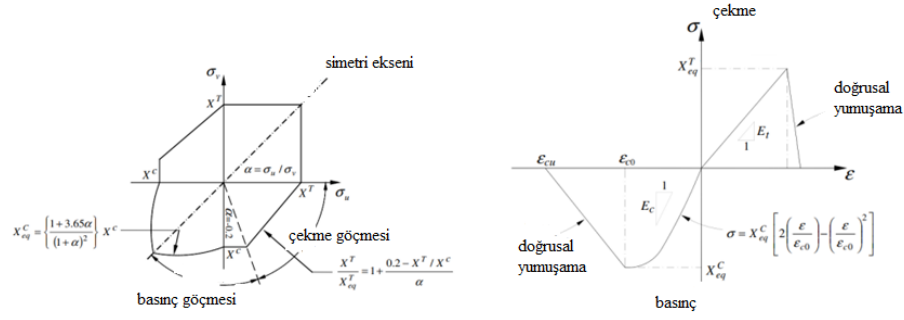
Deneysel modeller, deney sonucu elde edilen verilerin çeşitli matematiksel ifadelerle genelleştirilmesi olarak açıklanabilir. Bu tür modeller birçok amaç için kullanılabilir. Örnek olarak ahşap kirişlerin taşıma gücü modelleri verilebilir (Bazan, 1980). Deneysel modeller birçok mühendislik prensibinde sıklıkla kullanılmaktadır. Zemin mekaniği problemleri (Basheer, 2001) bunun önemli bir örneğidir. Bir diğer yaygın bilinen örnek ise çelik yapı birleşimlerinin moment-dönme ilişkisinin elde edilmesidir (Jones, Kirby ve Nethercort, 1983).

Connors (1989), ahşabın basınç ve çekme mukavemeti için bir model önermiştir. Modelde çekme iki parçalı bir eğriden, basınç ise üç parçalı bir eğriden oluşmaktadır. Gerilme-şekil değişimi ilişkilerinin kurulabilmesi için nem içeriği, elastisite modülü ve özgül ağırlığın bilinmesi yeterlidir. Wei, Tang, Ji, Zhao ve Li (2020), mühendislik bambusunun çevrimsel aksenal basınç altında gerilme şekil değişimi ilişkisi için bir deneysel model önermiştir. Malzemenin davranışı betonarme bir kolonun tek aksenal çevrimsel yüklemesine benzediği için Popovics (1973) ve Wu ve Wei (2014) referans alınarak geliştirilmiştir.

Deneysel modeller, karmaşık modeller arasında en kolay uygulanabilir model olarak gösterilebilir. Ampirik modellerin dezavantajı ise incelenen deney verilerine bağımlılığı olarak gösterilebilir (Diaz, Marti, Victoria ve Querin, 2011).

4.2.2.2 Elastisite temelli modeller

Khorsandnia, Valipour ve Crews (2013), 2B ve ortotropik olarak ahşabı modellemiştir. Hashin (Hashin, 1980) göçme kriterinin referans alındığı çalışmada çok parçalı sürekli bir ortotropik göçme zarfı geliştirmiştir. Geliştirilen model doğrudan kullanılabilmeyle beraber eşdeğer tek aksenal gerilme haline indirgenerek de kullanılabilir. Ahşap kiriş ve beton-ahşap kompozitleri ile kıyaslanan çalışmada modeller ile deney sonuçları arasında iyi korelasyon elde edilmiştir. Eşdeğer tek aksenal gerilme şekil değişimi ve sürekli çok parçalı zarf eğrisi Şekil 4.3'te verilmiştir. Benzer çalışma, ahşabın lif reçine matrisi olarak değerlendirilmesi ile de geliştirilmiştir (Valipour, Khorsandnia, Crews ve Foster, 2014).



Şekil 4.3 Basitleştirilmiş çok parçalı sürekli zarf eğrisi ve eşdeğer tek eksenli gerilme-şekil değişimi ilişkisi (Khorsandnia vd., 2013)

4.2.2.3 Plastisite temelli modeller

Bouchair ve Vergne (1995), ahşabı elastoplastik kabul etmiştir. Tsai-Wu (Tsai ve Wu, 1971) kriterini dikkate alarak ahşap dübel birleşimlerini incelemiştir. Çalışma düzlem elemanlarla gerçekleştirilmiştir. Model; bulon deliğinin davranışa etkisi, birleşim boyutları, ahşabın plastisitesi ve lif-yük açısını incelemekte başarılı olmuştur.

Kharouf, McClure ve Smith (2003), ahşap bulonlu birleşimlerin çift eksenli basınç altında incelenebilmesi için Hill kriterini (Hill, 1998) kullanmıştır. Doğrusal elastik ortotropi ise çekme altında davranış için kabul edilmiştir. Modelde çekme ve kesme altında göçme dikkate alınmamıştır. Ayrıca, yüklemenin başlangıcında ahşap-bulon arası temas kaynaklı doğrusalsızlıklar dikkate alınamamıştır.

Dias vd. (2007), ahşap-beton kompozitlerinde dübel birleşimleri incelemek için bir ahşap malzeme modeli önermiştir. Modelde teğet ve radyal yönler ayrı ayrı ele alınmayıp liflere dik olarak kabul edilmiştir. Hill kriteri dikkate alınmış olup, ahşabın çekme ve basınç altında farklı davranışı dikkate alınmayarak elastik kusursuz plastik olarak dikkate alınmıştır.

Oudjene ve Khelifa (2009), ahşabın liflere dik basınç altında yoğunlaşması sonucu taşıma gücü artışının dikkate alınabileceği bir model önermiştir (Şekil 2.6).

Çalışmada üç farklı göçme modu dikkate alınmış olup bunlar; liflere dik basınç altında yoğunlaşma ile beraber sünek göçme, çekme altında gevrek kırılma ve liflere paralel basınç altında yumuşama ile gerçekleşen göçmedir. Geliştirilen model lif yönü ile yük arasında çeşitli açılara sahip ahşap basınç deneyleri ve tek dübelli ahşap birleşim deneyleri ile iyi korelasyon göstermiştir.

Xu, Taazount, Bouchair ve Rancher (2009), üç farklı model önermiştir. Modellerde ahşap elastoplastik olarak dikkate alınmakla birlikte radyal ve teğet yönde davranış liflere dik olarak dikkate alınmıştır. Önerilen modellerin farkı dikkate alınan göçme kriterleridir. Modellerde dikkate alınan kriterler sırasıyla Hill, Hoffman (Hoffman, 1967) ve son olarak Hoffman ve Hill kriterinin birlikte kullanılmasıdır. Hoffman ve Hill kriteri hasar gelişimi ve plastik göçmeyi kontrol edebilmek için birlikte kullanmıştır. Birleşimin başlangıç rijitliğini tahmin etmekte üç modelde başarılı olmakla beraber, tüm davranışın incelenmesinde Hoffman ve Hill kriterinin birlikte kullanılması daha başarılı olmuştur.

4.2.2.4 Sürekli ortam hasar mekaniği

Sandhaas, Van de Kuilen ve Blass (2012-a), ahşabın monotonik yükleme altında davranışı incelemiştir. Geliştirilen modelde sekiz farklı göçme modu tanımlanmıştır. Plastisite modellenmemiş olsa da, çekme için doğrusal yumuşama ve basınç için kusursuz plastik hasar tanımlamaları yapılmıştır. Model deney sonuçları ile iyi korelasyon gösterse de, yüksek gerilme altında yük boşalması yaşayan elemandan komşu elemanlara yük aktarımı gerçekleştirilememiştir (Sandhaas vd., 2012a; Sandhaas vd., 2012-b; Sandhaas vd., 2013;).

4.2.2.5 Kırılma mekaniği

Ahşabın yapısında bulunan kusurlar veya yapı elemanı olarak kullanılan geometrik boyutları nedeniyle *gerilme veya şekil değişimi tekilliklerine* sebep olabilir. Gerilme tekilliği, teorik olarak gerilmenin bir noktada sonsuz olması olarak açıklanabilir. Bu durumda geleneksel hesap yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bu

özellikle ahşabın doğasında bulunan kusurlar veya işlem görmesi nedeniyle oluşabilecek çatlak gibi yapıların incelenmesinde ortaya çıkmaktadır. Bu tür problemleri incelemek için kırılma mekaniği iyi bir alternatiftir. Serrano E. vd. (2006) kırılma mekaniği çerçevesinde alternatif çözüm yöntemlerini irdelemiştir (Coşkun ve Soyhan, 2011; Serrano ve Gustafsson, 2007). Daudeville, Davenne ve Yasumura (1999), doğrusal elastik kırılma mekaniği çerçevesinde bulonlu birleşimleri incelemiştir. EN5'te verilen *akma teorisi* ile karşılaştırıldığında deneyler ile daha iyi korelasyonlar elde edilmiştir.

4.2.2.6 Karma modeller

Xu B. H. vd. (2014) ahşabı basınç altında elastoplastik bir malzeme olarak modellemiştir. Pekleşmeyi Hill kriteri ile modele dahil etmiştir. Çekme ve kesme altında gevrek davranışı modifiye Hill kriteri ile dikkate alarak, çeşitli ahşap birleşimlerle modelin başarısı kıyaslanmıştır. Ayrıca, hasar başlama ve ilerlemesini göçme kriterlerine uygun olarak gerilmelerin kontrol edilmesi ile sistemden eleman silinmesi şeklinde modellemiştir.

Khelifa, Khennane, El Ganaoui ve Celzard (2016), ahşap dübel birleşimlerini incelemek için bir model önermiştir. Modelde ortotropik elastoplastik davranış, doğrusal olmayan izotropik pekleşme, izotropik sünek hasar, ahşap ve birleşim elemanı arasındaki temas ve sürtünme sırasında oluşan büyük plastik deformasyonlar dikkate alınabilmektedir. Model deneylerle iyi korelasyon gösterse de, çekme ve basınç için aynı dayanım değerlerini alması ve sonlu elemanlar ızgarasına önemli ölçüde bağımlı olması modelin dezavantajı olarak gösterilebilir (Khelifa vd., 2015; Khelifa vd., 2016; Khennane vd., 2014).

Gharib, Hassanieh, Valipour ve Bradford (2017), teğet ve radyal yönü liflere dik olarak dikkate almıştır. Ahşabın tüm gerilme bileşenlerini çoklu doğru model üzerinden ifade ederek Tsai-Wu kriteri ile sürekli hasar mekaniği dikkate alınmıştır. Göçme kriteri tek yüzeylidir

Sirumbal-Zapata, Malaga-Chuqitaype ve Elghazouli (2018), ahşabın çevrimsel yükler altında incelenmesi için 3B bir model önermiştir. Modelde izotropik pekleşme dikkate alınmakta olup ortotropik plastik göçme yüzeyi dikkate alınmıştır. Model ahşap çelik dübel birleşimin monotonik ve çevrim deneyleri ile iyi korelasyon göstermiştir

Eslami, Jayasinghe ve Waldmann (2021), ahşap için 3B anizotropik model önermiştir. Hoffman akma kriteri kullanılarak izotropik pekleşme elastoplastik ilişki kurulmuştur. Modelin karakteristikleri; doğrusal bölgede ortotropik gerilme şekil değişimi ilişkisi, basınç altında plastikleşme için Hoffman kriteri, basınç altında izotropik pekleşme, çekme ve basınç için gerilme tabanlı sürekli hasar formülasyonu ile dört bağımsız göçme kriteri, hasar katsayısı ve kırılma enerjisi ile üç yönde çekme hasarıdır. Geliştirilen model tek eksenli basınç, tek eksenli çekme ve dört noktalı eğilme deneyleri ile kıyaslanmıştır. Deney sonuçları ile model arasında iyi korelasyon görülmüştür.

Akter, Serrano ve Bader (2021), liflere dik basınç ve kesme altında ahşabı incelemek için farklı bir model geliştirmiştir. Modelde plastisite için *küçük şekil değişimi* kabulü yapılmıştır. Hill, Hoffman ve çoklu yüzey göçme kriterleri dikkate alınmıştır. Pekleşme de dahil edilerek malzeme ortotropik olarak modellenmiştir.

Son olarak, ahşabın mikro yapısının dikkate alındığı çeşitli modellere dikkat çekilmelidir (Lukacevic, Lederer ve Füssl, 2017).

4.3 Ahşabın sonlu elemanlarla modellenmesi

Ahşap yapı ve yapı elemanlarının modellenmesinde kullanılan malzeme tipi ve durumu, eleman tipi, yapı tipi ve taşınması gereken yük etkileri dikkate alınarak modellemeler gerçekleştirilmektedir. Genelde elemanın geometrik boyutları dikkate alınarak modelleme gerçekleştirilse de, özel amaçlarla modeller daha detaylı olarak kullanılabilir.

Ahşap elemanlardan perde duvarlar teşkil edilebilir. Bu durumun en iyi örneği, kereste ile plywood, OSB gibi plak elemanlardan elde edilen az veya orta katlı binalarda kullanılan yapı duvarlarıdır. Bu tür perde duvarların statik ve dinamik analizleri için, analitik yöntemler kullanılacağı gibi, sonlu elemanlar modelleri de ilgi görmektedir. Bugüne kadar çeşitli modeller geliştirilmiş ve deney çalışmaları ile test edilmiştir.

Ahşap perde duvarların davranışı genelde ampirik formüller ya da benzer basit yaklaşımlarla değerlendirilmektedir. Ancak bu durum, elemanın doğrusal olmayan davranışının yakalanmasını zorlaştırmaktadır ve yük dağılımı tasarımlara dahil edilememektedir. Itani ve Cheung (1984), ahşap perde duvarlar için model önermiştir. Modelde dikme ve kiriş elemanlar düzlem kiriş sonlu eleman ile, kaplama ise düzlem gerilme elemanlar ile modellenmiştir. Modelde duvarın ızgara elemanları ve kaplama doğrusal kabul edilirken, düğüm elemanlar ile doğrusalsızlık sisteme dahil edilmiştir. Dolan ve Foschi (1991), ahşap perde duvarların doğrusal olmayan sonlu elemanlar statik analizi için başka bir yaklaşım önermiştir. Modelde dikme ve kirişler düzlem kiriş elemanlarla; OSB, plywood gibi malzemelerden teşkil kaplama ise 4 noktalı levha elemanlarla modellenmiştir. Eleman birleşimleri ise doğrusal olmayan yaylar ile modellenmiştir. Modelde birleşimin davranışı yerel ya da yayılı olarak dikkate alınabilmektedir. Panelin diğer panellerle birleşimi ise bi lineer yaylar ile modellenmiştir. Geliştirilen model bir dizi deney programı ile test edilmiştir ve modelin taşıma gücü ve davranışı yakalamada etkin olduğu vurgulanmıştır.

Geliştirilen modeller ile tüm yük şekil değişimi ilişkisi yakalanamamaktadır. Vessby, Kallsner, Olsson ve Girhammar (2014), yük şekil değişimi ilişkisinde ahşabın yumuşama kısmını da dikkate alınabileceği pratik bir model önermiştir. Çerçeve elemanlar kuadratik kiriş elemanlar veya 3B katı elemanlarla modellenerek anizotrop yapı dahil edilmiştir. Kaplama ise kabuk elemanlarla modellenmiştir. Kaplama ile ağırlık merkezi arasındaki eksantrisite ihmal edilmiştir. Birleşimin yük yer değişimi ilişkisi için literatürde bulunan deney verilerinden yararlanılmıştır. Fuentes, Eric, Clermont-ferrand ve Bouchair (2014), ahşap döşemeler için yeni bir yaklaşım kullanmıştır. Modelde, çerçeve elemanlar Euler Bernouilli kirişi ile

doğrusal elastik modellenmiştir ve anizotrop yapı ihmal edilmiştir. Çerçeve eleman birleşimleri mafsallı kabul edilmiştir. Kaplama eleman kabuk elemanlarla doğrusal elastik ve anizotrop olarak modellenmiştir. Modelde birleşim ve diğer elemanlar arasındaki temas dikkate alınmıştır ve birleşim eksantrisitesi de rotasyonel yaylar ile sisteme dahil edilmiştir. Girhammar, Gustafsson ve Kallsner (2017), ahşap panel elemanlardaki plastik davranışın daha iyi modellenebilmesi için sürekli plastisite teorisinden yararlanarak bir model önermiştir. Modelde, çerçeve elemanlar Timoshenko kirişi olarak, kaplama 4 noktalı düzlem gerilme eleman olarak dikkate alınmıştır. Birleşim modellemesinde ise elastik plastik davranışı, göçme kriteri ve pekleşmenin dikkate alabilen bir eleman tipi geliştirerek dahil edilmiştir.

Ahşap panel elemanlar genelde az katlı yapı sistemleri için değerlendirilmektedir. Ancak günümüzde orta ve çok katlı yapılarda da kullanım alanı bulmakta olup, büyük yer değiştirmeleri karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. bu durumda modeller yetersiz kalabilmektedir. Bunun için, Estrella, Guindos, Almazan ve Malek (2020), bir model önermiştir. Modelde 6 serbestlik dereceli düzlem çubuk eleman kullanılırken kaplama için 5 serbestlik dereceli düzlem eleman, birleşimler ise üç serbestlik dereceli bağlantı elemanları ile modellenmiştir. Modelde çiviler, doğrusal olmayan histerik yaylar ile sisteme dahil edilmiştir.

Ahşap perde duvarların dinamik analizleri, statik analizleri kadar incelenmemiştir. Genelde, tek serbestlik dereceli sistem olarak ya da bir sonlu elemanlar modellemesi ile ahşap perde duvarların dinamik davranışı incelenmektedir. Dinehart ve Shenton III (2000), ahşap perde duvarlar için ayırık üç serbestlik dereceli bir model önermiştir. Model ile tepki spektrumu ya da zaman tanımlı analizleri gerçekleştirilebilir olup, birleşim modellemesi ile önceki çalışmalardan farklılaşmaktadır. Folz ve Filiatrault (2001), çevrim yükleri altında ahşap perde duvar davranışı için yeni bir model önermiştir. Modelde, çerçeve elemanlar rijit, panel elemanlar ise doğrusal elastik olarak modellenmiştir. Doğrusalsızlık, çerçeve ve kaplama arası birleşimler üzerinden modele dahil edilmiştir. Bu yöntemle rijitlik kaybı dikkate alınabilmektedir.

Bu zamana kadar önerilen modeller özel yazılımlar aracılığıyla yapıldığı için pratik olmaktan uzaktır. Bunun için, Blasetti, Hoffman ve Dinehart (2008), ticari yazılımlar aracılığıyla pratik olarak uygulanabilecek bir model önermiştir. Modelde birleşimler; yay, sönüm, sürtünme, kayma ve boşluk elemanın kombinasyonu şeklinde modellenmiştir. Bu sayede temas bölgesi davranışa dahil edilebilmektedir.

Andreasson, Yasumura ve Daudeville (2002), ahşap perde duvarların sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri için duyarlılık analizleri gerçekleştirmiştir. Çalışmada, birleşim bölgelerindeki kayma, dönme gibi fenomenler ile paneller arası etkileşimde yapılan basitleştirmelerin davranışa etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda paneldeki açıklıklar ve birleşimler arası etkileşimin rijitliğe etkisi düşük bulunmuştur.

Aleman ve Mosqueda (2020), yığma yapılarda ahşap panellerin dinamik analizi için pratik bir yaklaşım önermiştir. Yöntemde, panel ve çerçeve elemanlar Bernouilli kirişi, birleşimler ise merkezde bir adet rotasyonel yay ile modellenmiştir. Böylelikle serbestlik derecesinde önemli düşüşler elde edilebilmiştir.

Vessby, Kallsner ve Girhammar (2010), ahşap panellerde temas kuvvetlerinin etkisini FEM ile incelemiştir. Modelde, ikinci mertebe kiriş elemanlar çerçeve için, doğrusal düzlem gerilme elemanları ise kaplama için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, temas kuvvetlerinin taşıma gücünün tespitinde çok düşük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Benzer eleman modellemeleri literatürde bulunabilir olup, modellemelerde asıl dikkat edilen ahşap elemanlardan ziyade birleşimlerdir (Boudaud, Humbert, Baroth, Hameury ve Daudeville, 2015; Gattesco ve Boem, 2015; Li, Lam, Foschi, Nakajima ve Nakagawa, 2012; Richard, Daudeville, Prion ve Lam, 2002; Togay vd., 2017; Quayyum, 2020).

Ahşap panel elemanlarda CLT kullanımı gün geçtikçe daha popüler hale gelmektedir. Rinaldin ve Fragiaco (2016), çok katlı CLT ahşap binalarda panel

elemanları doğrusal elastik kabuk elemanlarla, birleşimleri ise doğrusal olmayan yaylar ile modellemiştir. Benzer bir çalışmada Roncari, Gobbi ve Loss (2020), merkezi çaprazlı çelik çerçeve ve çelik CLT kompozit döşemeleri 3 katlı bir binanın sismik analizinde CLT'yi kalın kabuk elemanlar ile modellemiştir. Malzeme ise elastik olarak ele alınmıştır. Demirci, Malaga-Chuquitaype ve Macorini (2017), 6 katlı bir prototip binayı referans alarak çeşitli yapı geometrileri çerçevesinde CLT çok katlı binaların sismik davranışını incelemiştir. Çalışmada CLT panel elemanlar dört noktalı kabuk elemanlarla modellenerek doğrusal olmayan histerik davranış birleşimler üzerinden sisteme dahil edilmiştir.

Benzer modelleme stratejileri çubuk elemanlarda da görülmektedir. Wipf, Klaiber ve Funke (1990), lamine ahşap karayolu köprüleri için bir dizi deney ve sayısal çalışma gerçekleştirmiştir. Tali yönde yerleştirilen lamine ahşap kirişler ve onların üzerinde yerleştirilen lamine ahşap panel elemanlarla oluşturulan köprüde panellerde anizotrop kabuk elemanlar, kirişlerde ise 3B kiriş elemanlar kullanılmıştır. Çalışma sonucunda ahşap panellerin sehimli sonlu elemanlar modeli sonucuna göre daha güvenli tarafta kalmakla beraber davranış başarıyla yakalanmıştır. Lopes, Jorge ve Cruz (2012), ahşap-beton kompozitlerinde ahşap ve beton elemanları 3B kiriş elemanlarla, birleşim bölgesini ise doğrusal olmayan yaylar ile modellemiştir. Sejkot, Ormarsson, Vessby ve Kallsner (2020) büyük açıklıklara sahip ahşap kafesler üzerine yaptığı çalışmada kafes elemanlarını 3B kiriş elemanlar ile modellemiştir, birleşimler ise yay elemanlar ile sisteme dahil edilmiştir.

Yukarıda özetlendiği üzere ahşap elemanlar genelde boyutları ve kullanılan yapısal eleman tipine göre modellenmektedir. Ancak, bu modellerle eleman içerisindeki gerilme dağılımı tam olarak yakalanamamaktadır. Budak gibi kusurlar da ahşabın anizotropik yapısına katkıda bulunmaktadır ve bu durum lokal gerilme dağılımlarının yakalanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, daha gelişmiş modelleme teknikleri çeşitli çalışmalarla önerilmiştir.

Ahşabın davranışının başarılı bir şekilde incelenebilmesi için budak gibi kusurların da modellenmesi gerekir. Bu kapsamda çeşitli yaklaşımlar

önerilmiştir. Bano, Arriaga ve Guaita (2013) ahşap kirişlerin taşıma kapasitesine budak yeri ve boyutunun etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Çalışmada budaklar; kesitte boşluk olarak, budaksız ve budak ile lifler arası etkileşim dikkate alınarak modellenmiştir. Çalışma sonucunda basınç bölgesindeki budaklar için en iyi sonucun etkileşimin dikkate alınması ile çekme bölgesinde ise boşluk olarak alınıp budak varlığının ihmal edilmesi ile alındığı gösterilmiştir. Çalışma ayrıca lif çarpıklığının dikkate alınabileceği şekilde genişletilmiştir (Bano vd., 2011). Benzer bir çalışma gerçekleştiren Jenkel ve Kaliske (2014) budakları hekzahedron ve tetrahedral elemanlarla modellemiştir. Budak etrafında liflerin çarpılmasının da dikkate alındığı çalışma deneylerle iyi korelasyon gösterse de sayısal analizin malzeme özelliklerine bağımlılığı dikkat çekmiştir.

Ahşabın sonlu elemanlar çalışmalarında dikkat çeken bir diğer teknik ise sistemi katı elemanlar ile modellemektir. Bu yöntem özellikle bölgesel etkilerin önemli olduğu durumlarda kullanılmakta olup en dikkat çekici örnekleri birleşimlerdir. Sekiz noktalı hekzahedral elemanlarla ahşabı modelleyen Xu vd. (2009) dübel birleşimleri incelemiştir. Ahşap kiriş-kiriş boy birleşimlerini inceleyen Gecys, Daniunas, Bader, Wagner ve Eberhardsteiner (2015) dört noktalı doğrusal tetrahedral elemanları kullanmıştır.

4.4 Sönüm

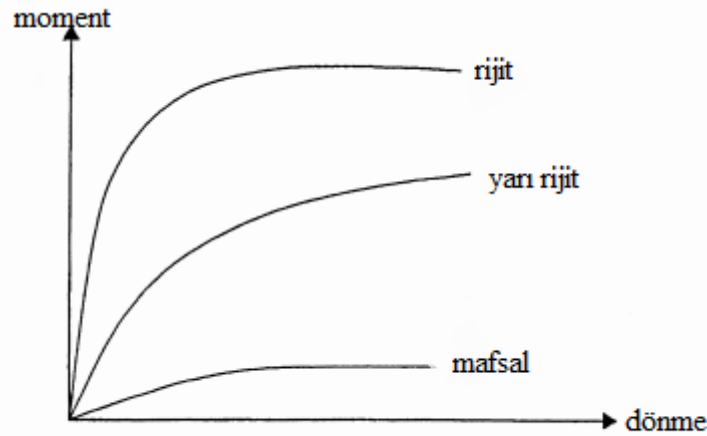
Sönüm bir yapının dinamik davranışında büyük önem tutmaktadır. Sönüm, serbest titreşim genliğinin sürekli azalmasını sağlayan mekanizma olarak tanımlanabilir. Sönüme birçok mekanizma katkıda bulunabilir. Malzemenin tekrarlı şekil değişimi kaynaklı termomekanik etkiler, iç sürtünme, yapı elemanları arasındaki etkileşim bunların bazı örnekleridir. Genelde yapısal analizlerde sönüm, eşdeğer viskoz sönüm olarak dikkate alınmaktadır. Yönetmeliklerde ahşap yapılar için bu değer %5 olarak verilmektedir (Avrupa Komisyonu [AC], 1995, Chopra, 2015, Labonnote, 2012).

Ahşap yapıların sönümü üzerine yapılan çalışmalar günümüzde döşemelerin titreşim problemleri üzerine yoğunlaşmaktadır (Labonnote vd., 2015; Opazo-Vega,

Munoz-Valdebenito ve Oyarzo-Vera, 2019). Bunun haricinde yapısal analizlerde genelde ahşap yapıların sönümü %2-5 arası değer alabilir olup viskoz sönüm olarak modellenmektedir (Porcu, Bosu ve Gavric, 2018).

4.5 Birleşimlerin modellenmesi

Birleşimler yapı davranışında çok önemli bir yer tutmaktadır. Genelde yapı birleşimleri mafsallı veya rijit olarak kabul edilmektedir. Ancak bu durum gerçeği yansıtmamakla birlikte aşırı, gerçek dışı iki durum olarak görülebilir. Bu kavram yarı rijit olarak bilinmektedir (Jones vd., 1983). Kavram çelik yapı birleşimlerinde önemli bir yer tutmaktadır. Ahşap yapı birleşimlerinde çelik elemanların kullanılması ve ahşabın plastik davranışı nedeniyle de birleşimlerin yarı rijit doğası önemli bir yer tutmaktadır. Şekil 4.4'te birleşimlerin temsili moment dönme eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.4 rijit, yarı-rijit ve mafsallı birleşimlerin temsili moment-dönme eğrileri (Ivanyi, Caharalambos ve Baniotopoulos, 2000)

Birleşimlerin moment dönme ilişkisinin belirlenebilmesi yapıların gerçekçi analizleri için önemli bir koşuldur. Literatürde bu hususta çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar; deneysel, analitik, mekanik, sayısaltır. Bunun haricinde birleşimin davranışı için doğrudan test de yapılabilir ve genelde test etmek de bir yöntem olarak görülmektedir (Diaz vd., 2011).

Deneyisel modeller, çeşitli yöntemlerle elde edilen birleşimin moment dönme verilerinin genelleştirilmesi ile elde edilmektedir. Cao, Xiong, Chen ve Huynh (2019) CLT duvar-döşeme birleşimlerini için *Bayesian yöntemi*'ni kullanmıştır. Hassanieh, Valipur ve Bradford (2017) CLT döşeme çelik kiriş kompozit birleşimleri için doğrusal olmayan regresyon analizi ile bir model geliştirmiştir. Awaludin A. vd. (2007) bulonlu ahşap moment birleşimlerinin çeşitli detaylarına yönelik üstel fonksiyon ve bi lineer olarak modellemiştir.

Analitik modeller, uygunluk denklemi ve yük şekil değiştirme ilişkisi gibi yapı mekaniğinin temel teorilerinden yararlanılarak moment dönme ilişkisinin kurulduğu modellerdir. Bu modellere örnek olarak Xu (2012) ve Wanninger ve Frangi (2014) verilebilir. Çalışmalardan ilkinde çelik çubukların tutkalla yapıştırılması şeklinde yapılan ahşap kiriş-kiriş boy birleşimleri incelenirken ikinci çalışmada ardgermeli ahşap birleşimler çalışılmıştır.

Mekanik modeller birleşimin moment dönme ilişkisinin rijit çubuk ve deforme olabilen elemanlar aracılığıyla kurulduğu modeller olarak açıklanabilir. Bu tür yöntemlerden en yaygını Eurocode 3'te verilen *Component method*(bileşen yöntemi) olarak gösterilebilir. Yöntem, tarihi ahşap yapı birleşimlerinden tutkallı çelik çubuk detaylarına ve tutkallı levhalara kadar geniş ölçekte kullanılabilir (Wald, Mares, Sokol ve Drdacky, 2000; Yang, Liu ve Ren, 2016).

Ahşap yapı birleşimlerinin değerlendirilmesinde en yaygın yöntemlerden biri de sayısal yöntemlerdir. Genelde sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı sayısal yöntemler ile yerinde ölçümün zor olduğu bölgesel etkiler incelenebilmektedir. Sayısal yöntemlere örnek olarak kendinden kılavuzlu vidalı birleşimleri inceleyen Bedon ve Fragiaco (2019) ve dübel birleşimleri inceleyen Xu vd. (2009) verilebilir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

Bugüne kadar ahşap yapılar çok çeşitli şekilde değerlendirilmiştir. Başta malzeme modeli olmak üzere birçok seçenek literatürde bulunmakta olup hangi sınırlar altında kullanılabileceği net sınırlar ile belirli değildir. Bunun için tez kapsamında beş temel model önerilmiştir. Tüm modellerde ahşap simetrik ortotropik olarak idealleştirilmiştir. Modeller; yapısal analizlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan malzeme modeli, sonlu elemanlar modeli ve birleşimin nasıl modelleneyeceği üzerinedir. Buna paralel olarak modellerde geometrik doğrusalsızlıkların modellenmesi konusu da vurgulanmıştır.

Modellerin hangi durumda ne kadar başarılı olduğunu test edilmelidir. Bu amaçla çeşitli yöntemler kullanılabilir olup tez kapsamında karşılaştırma için mevcut bir deney çalışması sonucu ile karşılaştırma yoluna gidilmiştir. Tez kapsamında geliştirilen modeller nümerik analizlere yönelik olup yaklaşıktır. Bir mekanik sistemin davranışının incelenmesinde ise en gerçekçi yöntem test etmektir. Bu nedenle önerilen modelin gerçek duruma ne kadar yakınsadığı görülebilmesi için yapılmış deney sonuçları ile kıyaslama yolu seçilmiş olup bunun için, literatürde mevcut olan Vallee, Tannert ve Hehl (2011) tarafından gerçekleştirilen tam ölçekli ahşap kafes deneyi seçilmiştir. Önerilen modeller basitten karmaşığa doğru gitmektedir. Bu modellerde öncelik sırası global yapı davranışından bölgesel etkilere doğru gelişmektedir. Dolayısıyla karşılaştırma amacıyla seçilen çalışma tüm modellerle incelenebilecek bir çalışma olmalıdır. Buna ek olarak geliştirilen modellerde malzeme ve geometrik doğrusalsızlığın dikkate alınması söz konusudur. Kıyaslama amacıyla seçilen deneyde malzeme ve geometrik doğrusalsızlıklar önemli rol oynamalıdır. Tüm bu gereksinimleri karşılayabilecek çalışma sayısı literatürde kısıtlı olup, günümüz ahşap yapılarında da sıklıkla kullanılan bir yapı elemanı olduğu için bu deney yöntemi seçilmiştir.

5.1 Önerilen modeller

Tez kapsamında, ahşap yapıların analizi için literatürde önerilen modeller referans alınarak beş yeni model önerilmiştir. Modeller, literatürde bulunan mevcut sınıflandırmaya uygun olarak basitten karmaşığa doğru geliştirilmiştir. Model 1 ve Model 2 elastik ötesi davranışın ihmal edilebilir olduğu sistemlerde kullanılabilir. Bu modellerden beklenen deneyin global elastik davranışı ile iyi korelasyon göstermesidir. Modeller doğrusal ötesi davranışın güvenlik kaygısı ya da pratik amaçlarla ihmal edilebileceği ihtimaller üzerine geliştirilmiştir. Model 3, Model 4 ve Model 5 ise doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmak istendiği, yerel etkilerin incelendiği veya doğrusal ötesi davranışının önem arz ettiği sistemler için geliştirilmiştir.

5.1.1 Model 1

Modelde malzeme doğrusal elastik olarak kabul edilir. İkinci mertebe etkileri ihmal edilir ve birinci mertebe analizi gerçekleştirilir. Birleşimler rijit ya da mafsallı olarak idealleştirilir. Kullanılacak sonlu elemanlar türü malzeme boyutlarına uygun olarak çubuk veya düzlem eleman olabilir. Sonlu elemanlar ızgarası yoğun değildir.

5.1.2 Model 2

Modelde malzeme doğrusal elastik olarak kabul edilir. İkinci mertebe etkileri dikkate alınır ve birleşimin davranışı sisteme dahil edilir. Malzeme doğrusal elastik sınırlarda kalacağı ön görülse de birleşimler eğer plastik davranıyorsa doğrusal ötesi davranışı dikkate alınabilir veya elastik sınırlarda tutulmak üzere elastik olarak modellenebilir. Kullanılan sonlu elemanlar türü için malzeme boyutlarına uygun bir tür seçmek yeterlidir. Birleşimler özel olarak modellenmez, davranış rotasyonel yaylarla ya da literatürde mevcut olan uygun bir yöntem ile modellenir. Birleşim karakteristikleri analiz modelinde ayrı bir eleman olarak değil taşıyıcı sistem elemanlarında bir sınır koşulu olarak dikkate alınır.

5.1.3 Model 3

Modelde ahşap basınç altında elastik kusursuz plastik olarak dikkate alınır. Bu malzeme türünün seçilmesi yönetmeliklere paralellik sağlanması içindir. Ayrıca çoğu yapısal analiz programlarında pekleşme veya yumuşama gibi etkilerin modellenmesi pratik olmayabilir. Dolayısıyla malzeme elastik kusursuz olarak dikkate alınmıştır. İkinci mertebe etkileri dikkate alınarak birleşimler gerçekçi bir şekilde modellenir. Birleşim davranışı için uygun herhangi bir yöntem kullanılabilir. Birleşimler sisteme ayrı bir eleman olarak değil rotasyonel yaylar ile tanımlanır ya da literatürde mevcut olan uygun bir yöntem tercih edilebilir. Modelde sonlu elemanlar olarak malzeme boyutlarına uygun elemanlar kullanılması yeterlidir.

5.1.4 Model 4

Modelde ahşap basınç altında elastoplastik olarak dikkate alınır. Pekleşme ve yumuşama dikkate alınabilir. Çekme altında malzeme doğrusal olarak modellenir. Kullanılan ahşabın çekme altında doğrusal yumuşadığı görülürse ve basınç altında pekleşme yaşadığı görülürse modele dahil edilebilir. Göçme kriteri dikkate alınır. Birleşimler sisteme eleman olarak tanımlanır. Sonlu elemanlar ağında düzlem elemanlar ya da katı elemanlar kullanılabilir. Birleşimin malzeme modeli de ahşap ile aynı karmaşıklıkta dikkate alınmalıdır. Elemanlar arası temas veya dönme gibi doğrusalsızlıklar ihmal edilir.

5.1.5 Model 5

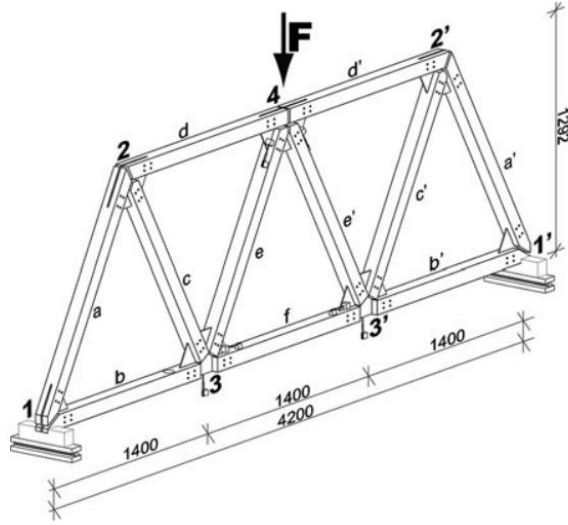
Modelde ahşabın davranışı elastoplastik olarak dikkate alınır. Pekleşme ve yumuşama dikkate alınabilir. İkinci mertebe etkileri dikkate alınır ve birleşimler gerçekçi bir şekilde modellenir. Göçme kriteri tanımlanır ve sürekli hasar mekanizması sisteme dahil edilir. Ayrıca, elemanlar arası temas ve dönme gibi durumlar da dikkate alınır.

5.2 Referans çalışmanın tanıtılması

Çalışma kapsamında önerilen modellerin başarı ile kıyaslanabilmesi için seçilecek deneyin bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bunlar;

- Tam ölçekli olmalı
- Doğrusal ötesi davranış göstermeli
- Hiperstatiklik derecesi yüksek olmalı
- Sünek birleşim detaylarına sahip olmalı

olarak sıralanabilir. Literatürde birçok ahşap deneyi bulunmakta olup çalışmalar yoğunlukla; kolon kiriş gibi çubuk elemanlar, birleşimler, ahşap kompozit birleşimler ve yapı elemanlarıdır. Buna karşın tam ölçekte yapılan deney sayısı sınırlıdır. Tüm bu kriterler ışığında modellerin karşılaştırılabilmesi için Vallee T. vd. (2011) tarafından yapılan ahşap kafes deneyi seçilmiştir. Çalışmada; ahşabın malzeme deneyleri, birleşimlerin bölgesel deneyleri ve tam ölçekli kafes deneyi bulunmaktadır. Buna ek olarak deneyler sonlu elemanlar yöntemi ile de simüle edilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik birleşim elemanları için deney yapılmamış olup standart çelik sınıfı özellikleri referans alınmıştır. Çalışmada 5 mm kalınlığındaki çelik levhaların 8 mm çapındaki dört çelik dübel ile birleştirilen kafesin açıklık ortasından monotonik yükleme gerçekleştirilmiştir. Kafes geometrisi ve yük pozisyonu Şekil 5.1’de verilmiştir olup burada a, a’, b, b’, c, c’, d, d’ ve f eleman numaralarıdır. 1, 1’, 2, 2’, 3, 3’ ve 4 sistem düğümlerini ve birleşimleri temsil ederken F düşey kuvvettir.



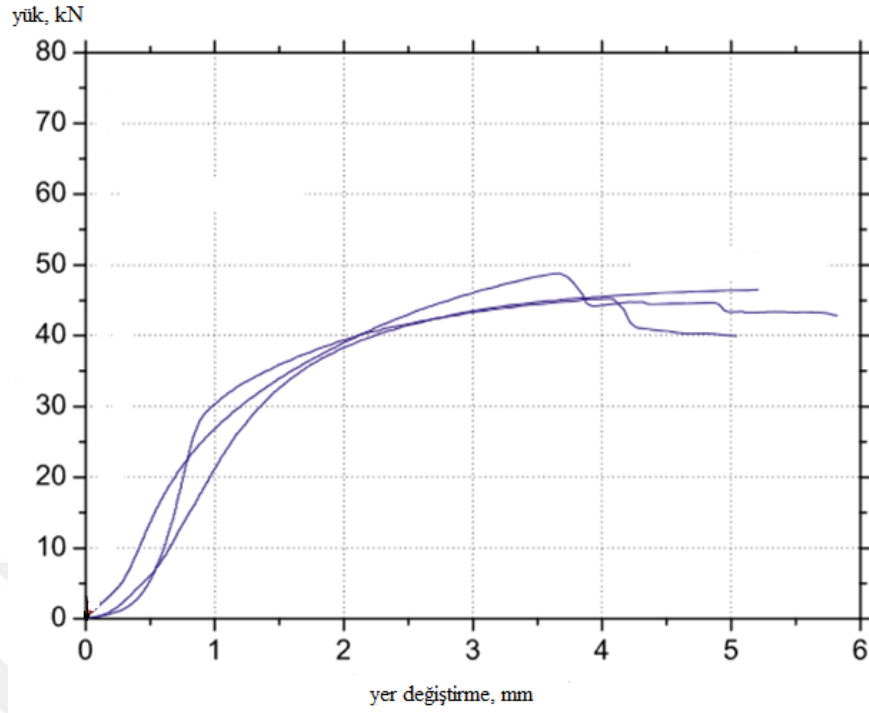
Şekil 5.1 Kafes geometrisi ve yükleme durumu (Vallee T. vd., 2011)

Deneyde kullanılan ahşap *Picea Abies*, ladinden üretilmiştir. Test numunesi eldesinden önce %12 nem içeriğine sahip olan ahşaplar numune üretildikten sonra sabit iklim koşulları altında depolanarak test edilmiştir. Malzeme homojen ve simetrik ortotropik olarak kabul edilerek deneyler bu çerçevede gerçekleştirilmiştir. Ahşabın dayanım özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Burada E, elastisite modülü; V, poisson oranı; F, gerilme değerlerini temsil etmektedir. İfadelerin alt indisleri ise ilgili parametrenin yönünü göstermektedir.

Tablo 5.1 Ahşap numunelerin mukavemet özellikleri(N-mm) (Vallee T. vd., 2011)

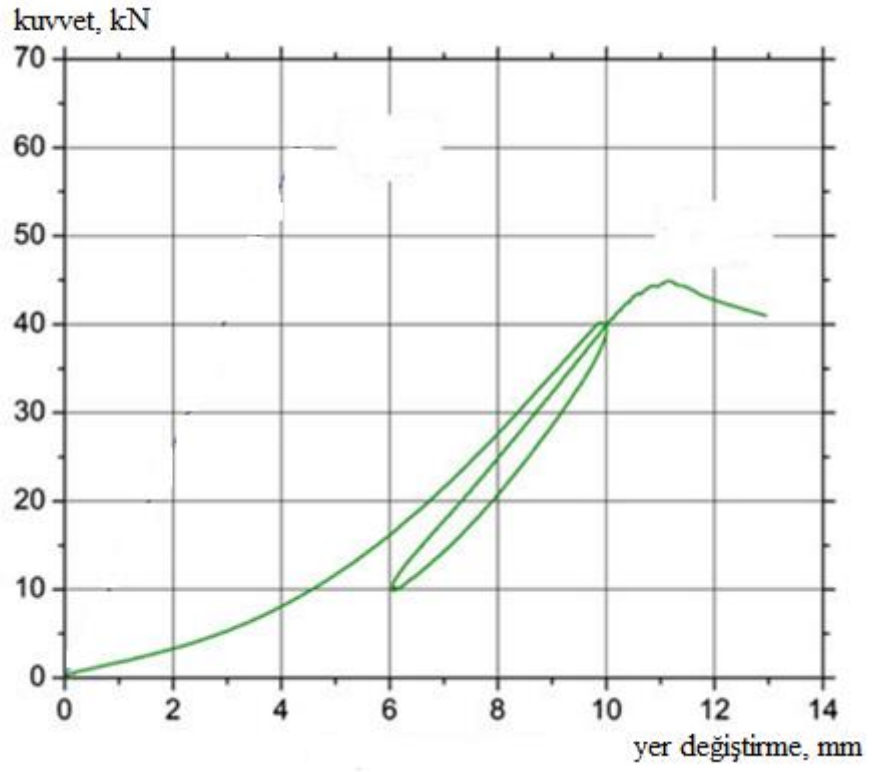
E_x	E_y	V_{xz}	V_{yz}	$F_x=f_o$	$F_y=f_z=f_{90}$	F_{xy}	F_{10}	F_{45}
17900	1100	0,4	0,04	98,2	4,5	16,5	43,7	11,5

Çalışmada tüm ahşap birleşim ve ahşap eleman kesitleri aynıdır. Çalışmada kullanılan ahşap kafes 75x75 mm kesite sahip ahşap elemanların, 5 mm kalınlığında çelik levhaların ahşap elemanların ortalarından kesilip yerleştirilmesi ve 8 mm çapında dört adet dübel elemanlarla birleştirilmesi şeklinde yapılmıştır. Kullanılan çelik levhalar S235 sınıfındadır. Çelik levhaların ahşap elemanlara soket boyu tüm birleşimlerde sabit olup 120 mm’dir. Çalışmada yapılan birleşim deneyleri sonucu dübel birleşimlerin yük yer değişimi ilişkisi Şekil 5.2’de verilmiştir.

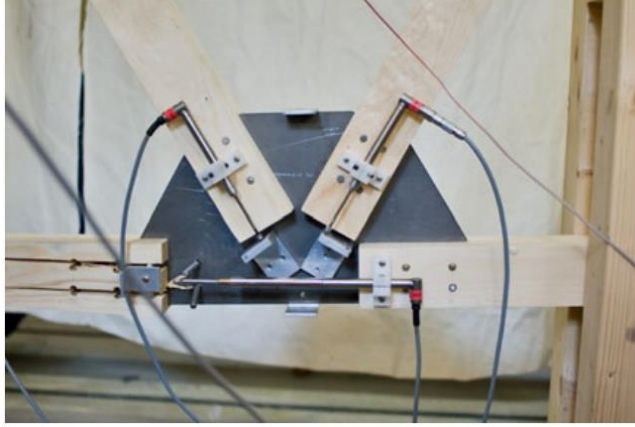


Şekil 5.2 Ahşap dübel birleşimlerin yük yer değişimi sonuçları (Vallee T. vd., 2011)

Çalışmada ahşap kafes kullanılabilirlik sınır durumun temsilen 10-30 kN aralığında çevrilmiş olup daha sonra 3 mm/dakika yükleme hızı ile göçmeye kadar yüklenmiştir. Test sonucunda ahşap kafes büyük mertebelerde şekil değişimi göstermiş olup bu sonuca katkı sağlayan önemli etkenlerden birisi ahşap dübel birleşimlerin büyük deformasyonlar yaptıktan sonra yük aktarmaya başlamasından kaynaklıdır. Benzer sonuç başka ahşap-çelik dübel birleşimlerinde de gözlemlenmiştir. Ahşap kafesin yük yer değişimi ilişkisi şekil 5.3'te verilmiştir. Kafesin göçme modu şekil 5.4'te verilmiştir. Göçme, ahşap elemanların kafes düğüm levhasından sıyrılması şeklinde gerçekleşmiştir.



şekil 5.3 Ahşap kafesin y¼k-yer değişimi sonucu (Vallee T. vd., 2011)



şekil 5.4 Ahşap kafesin g¼çme modu (Vallee T. vd., 2011)

Çalışmada test edilen ahşap kafesler ortalama 44.9 kN y¼k¼nde g¼çm¼ř olup deney sonularınday %14 değişkenlik g¼r¼lm¼řt¼ř (Vallee, 2011).

5.3 Sonlu elemanlar yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi; sonsuz sayıda serbestliğe sahip bir sistemin davranışının sonlu sayıdaki eleman ve düğüm ile yaklaşılması olarak tanımlanabilir. Sayısal bir yöntemdir. Literatürde çeşitli yapı mekaniği problemlerinin incelenmesinde çok geniş bir yer tutmaktadır. 1950'li yıllarda elektronik hesap makinelerinin gelişmesi ile sıçrama yaşayan bilgisayar destekli tasarım yöntemlerinde sonlu elemanlar önemli bir yer tutmaktadır. Genel global sistem analizlerinden birleşim gibi bölgesel gerilme dağılımlarının incelenmesi, elemanlar arasında kayma ve dönme, malzemede yırtılma gibi çeşitli mekanik problemler incelenebilir (Kasımzade, 2004; Onate, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken ilk adım problemin tanımlanması olarak açıklanabilir. Burada husus yapının mekanik davranışına etkileyecek fiziksel fenomenlerin tespiti, yükün doğasının irdelenmesi gibi problemin bilinen ve bilinmeyenleri arasındaki ilişkiyi önemli etkileyen etkenlerin belirlenmesidir. Bir diğer husus analizin ne doğrulukta olacağının belirlenmesidir (Kasımzade, 2004; Onate, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılırken önemli diğer adım hesap modelinin oluşturulmasıdır. Bunun için gerçek problemin idealleştirilmesi, sayısal modelin kurulması, fiziksel parametrelerin ilgili denklemlere tanımlanması olarak özetlenebilir (Kasımzade, 2004; Onate, 2009).

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir mühendislik problemi birçok farklı araç yardımı ile incelenebilir. Günümüzde sonlu elemanlar yöntemini benimsemiş çeşitli ticari yazılımlar bulunmaktadır. Bu tür yazılımlar günlük analizlerden son derece karmaşık modellemelerin pratik bir şekilde gerçekleştirilmesinde tercih edilebilen önemli araçlar olup kullanıcıya sunduğu imkanlar çeşitlidir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen modellerin karşılaştırılması için iki farklı yazılım tercih edilmiş olup bunlar SAP2000 (Computers and Structures Inc. [CSI], 2016) ve ABAQUS'tir (Dassault Systemes [DS], 2011). SAP2000, sektörde yaygın olarak kullanılmakta

olup pratik modellemeye yönelik geliştirilen Model 1 ve Model 2'nin incelenmesi için tercih edilmiştir. Buna karşın daha karmaşık modeller olan Model 3, 4 ve 5 SAP2000 programı ile incelenemeyeceği için ABAQUS programı tercih edilmiştir.

5.3.1 SAP2000 yapısal analiz programı

SAP2000 *Computers and Structures Inc.* tarafından üretilen bir sonlu elemanlar analiz ve tasarım programıdır. Program aracılığıyla statik ve dinamik analizler, doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılabilmektedir. Modellemede çubuk, kabuk ve katı elemanlar kullanılabilir. Analizlerde rijit ya da mafsallı gibi çeşitli mesnet tanımlamaları yapılabilmektedir. Program, genel olarak arayüz aracılığıyla yapının sayısal olarak modellenmesi ve analizin gerçekleştirilmesi şeklinde kullanılmaktadır.

Programda çeşitli yönetmelik ve standartlara uygun olarak malzeme ve kesit tanımlamaları yapılabildiği gibi kullanıcı kendi malzeme ve kesitini de tanımlayabilmektedir. Program izotropik, tek eksenli, ortotropik, anizotropik malzeme tanımlamaları yapma imkanı vermektedir. Programda belirli sınırlar altında doğrusal olmayan malzeme davranışı da tanımlanabilmektedir. Programda birden fazla gerilme şekil değişimi ilişkisi için doğrusal olmayan ilişki tanımlanabilse de bunların etkileşimi dikkate alınamamaktadır. İki boyutlu model yalnızca beton için kabuk elemanlarda kullanılabilir. Doğrusal olmayan ilişki tanımlanması eksenel gerilme şekil değişimi için yapılmakta olup bu tanımlama anizotrop veya ortotropik malzemeler için tüm doğrultularda aynı kabul edilmektedir. Kesme için de gerilme şekil değişimi eğrisi oluşturulabilmekte olup bu ilişki program tarafından 45° açıyla etkiyen çekme ve basınç kuvvetleri varlığı kabulüyle Mohr çemberi ile elde edilmektedir.

Bunun haricinde programda birçok yöntem ile birleşimin moment dönme ilişkisi tanımlanabilir. Benzer durum literatür için de geçerlidir. Literatürde birleşimlerin moment dönme ilişkisi genelde çubuk elemanın rotasyonel yaylara oturtulduğu durum modellenerek yapılıp ve yayın rijitlik katsayısı birleşimin rijitlik değeri olarak

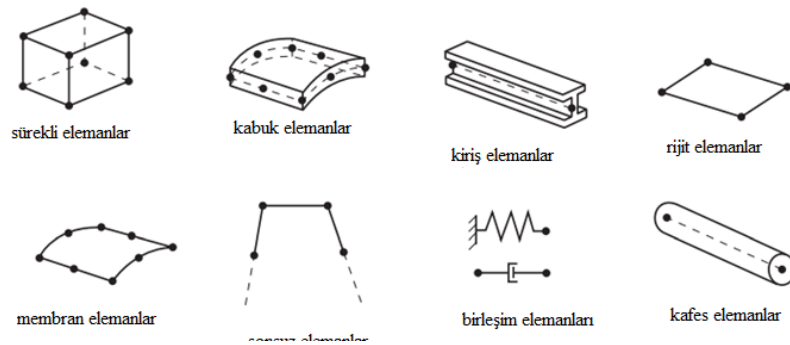
alınır. Buna ek olarak rotasyonel yay modellenemediği durumlar için birleşim karakteristiklerinin bir eş değer çubuk eleman ile modellenebileceği çalışmalar da mevcuttur. Programda ise mafsal tanımlaması veya birleşim panel bölgesinde bağlantı elemanı tanımlanması şeklinde yapılabilmektedir (Computers and Structures Inc. [CSI], 2016; Jones vd., 1983; Li, Choo ve Nethercot, 1995).

5.3.2 ABAQUS sonlu elemanlar programı

ABAQUS mühendislik hizmetinin verildiği çeşitli sektörlerde kullanılmakta olan bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Yazılım aracılığıyla birçok mühendislik problemi incelenebilmekte olup inşaat mühendisliği problemleri de uygulama alanlarındandır.

Program aracılığıyla doğrusal veya doğrusal olmayan analizler gerçekleştirilebilir. Malzeme ve geometrik doğrusalsızlıklar çeşitli yöntemlerle dikkate alınabilir. Malzeme özellikleri için elastik mekanik, inelastik mekanik, sürekli ortam hasar ve kırılma mekaniğine uygun çeşitli tanımlamalar yapılabilmektedir. Buna paralel olarak anizotropik malzemeler de program aracılığıyla incelenebilmektedir.

Analizlerde kullanılabilecek sonlu eleman türü için program geniş bir kütüphane sunmaktadır. Şekil 5.5'te ABAQUS programı aracılığıyla kullanılabilecek eleman ailesi verilmiştir.



Şekil 5.5 ABAQUS eleman ailesi (Dassault Systemes [DS], 2011)

Bunun haricinde programda elemanlar arası temas gibi doğrusalsızlıklar da dikkate alınabilmektedir ([DS], 2011).

5.4 Modelleme

5.4.1 SAP2000

Program aracılığıyla modelleme adımları; sistem geometrisinin tanıtılması, malzeme ve kesit özelliklerinin tanımlanması, yapı sisteminin oluşturulması, yük tanımlaması ve yük ataması olarak özetlenebilir. Sistem geometrisi tanıtılması, programın arayüzü aracılığıyla sistem elemanlarının akslarının tanımlanmasıdır. Şekil 5.6’da sistem geometrisi verilmiştir.

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	1	0.	Primary	Show	Start	
2	2	0.7	Primary	Show	Start	
3	3	1.4	Primary	Show	Start	
4	4	2.1	Primary	Show	Start	
5	5	2.8	Primary	Show	Start	
6	6	3.5	Primary	Show	Start	
7	7	4.2	Primary	Show	Start	
8						

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	A	0.	Primary	Show	Start	
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

	Grid ID	Ordinate	Line Type	Visibility	Bubble Loc.	Grid Color
1	Z1	0.	Primary	Show	Start	
2	Z2	1.292	Primary	Show	Start	
3						
4						
5						
6						
7						
8						

Şekil 5.6 Sistem geometrisinin tanıtılması

Programda mevcut yönetmelik ve standartlara göre malzeme tanımlanabildiği gibi kullanıcı kendi malzemesini de tanımlayabilmektedir. Kullanıcı malzeme tanımlamak istediğinde malzemeyi izotrop, anizotrop, ortotrop ve tek eksenli olarak tanımlayabilmektedir. Çalışmada ahşap simetrik ortotropik olarak dikkate alınıp malzeme özellikleri buna göre belirlendiği için programda ortotropik malzeme özelliği seçilmiştir. Ortotropik malzeme için üç temel eksene karşılık farklı elastisite modülleri, kayma modülleri, farklı poisson oranlarına sahiptir. Simetrik ortotropide

ise ana eksene dik özellikler aynıdır. Dolayısıyla malzeme ortotropik seçeneği ile modellenirse de uygun değer girilmesi ile simetrik ortotropik olarak dikkate alınabilmektedir. Şekil 5.7’de malzeme tanımlaması verilmiştir. Burada E, elastisite modülü; U, poisson oranı ve G, kayma modülüdür. İlgilenilen problemde ısı etkileri dikkate alınmadığı için analize dahil edilmemiştir. Dolayısıyla termal genleşme katsayısı için girilecek değerlerin önemi yoktur. Referans alınan çalışmada kayma modülü ve yoğunluk değerleri verilmemiştir (Valle T. vd., 2011). Ancak analiz için bu değerler gerekli olup önem arz etmektedir. Literatürde bu özelliklerin bulunması için çeşitli ampirik bağıntılar veya tablolar bulunmaktadır. %12 nem içeriğine sahip ladin için özgül ağırlık değeri ağaç türüne de bağlı olarak 0,30-0,55 değerleri arasında değişebilmektedir. Deney sonucu belirlenen malzeme özelliklerinin C24 sınıfı yapısal ahşaba yakın olması ve çeitli ahşap türleri-malzeme özellikleri tablosu göz önüne alınarak özgül ağırlık değeri olarak 0,42 değeri kabul edilmiştir [Borgström, 2016]. Kayma modülü ise 690 MPa olarak alınmıştır.

Şekil 5.7 Ahşap malzeme özelliklerinin tanıtılması

Programda yapı marketlerinde kolaylıkla bulunabilecek kesit türleri bulunmaktadır ve doğrudan bunlar aracılığı ile kesit tanımlaması yapılabilir. Benzer şekilde, betonarme kesit tanımlaması kullanılarak dikdörtgen kesit tanımı yapıp malzeme olarak ahşap seçilebilir. Bunun haricinde kullanıcı kendi kesitini tanımlayabileceği *section designer* bölümü de bulunmaktadır. Çalışmada kesit tanımlaması için bu yol tercih edilmiş olup kesit tanımlaması ve kesitin özellikleri aşağıda Şekil 5.8’de verilmiştir. Özellikler mm cinsinden verilmiştir.

Property Data			
Section Name		75x75	
Properties			
Cross-section (axial) area	5625,	Section modulus about 3 axis	70312,5
Torsional constant	4457702,	Section modulus about 2 axis	70312,5
Moment of Inertia about 3 axis	2636718,8	Plastic modulus about 3 axis	105468,75
Moment of Inertia about 2 axis	2636718,8	Plastic modulus about 2 axis	105468,75
Shear area in 2 direction	4687,5232	Radius of Gyration about 3 axis	21,6506
Shear area in 3 direction	4687,5232	Radius of Gyration about 2 axis	21,6506
OK			

Şekil 5.8 Kesit tanımlaması ve özellikleri(birim mm’dir)

Model 1 ve model 2’de kullanılan sonlu elemanlar tipi çubuk elemandır. Programda bu tür elemanlar *draw frame/cable* aracı ile arayüzde bulunan aks ızgarası ve elemanların uç ve orta noktaları veya dik projeksiyonları gibi noktalara fare imlecinin tutulması şeklinde çizilebilmektedir. Yapı sisteminin oluşturulmasında bir diğer etken de mesnet atamasıdır. Bunun için programda mesnet ataması yapılacak düğüm noktaları seçilmelidir. Programda ilgili serbestliklere karşılık gelecek şekilde çeşitli tanımlamalar yapılabilir. Çalışmada ahşap kafes sabit mesnetlere oturmaktadır. Dolayısıyla buna uygun atama yapılmıştır. Buradan sonraki işlemler model 1 ve model 2 için farklılık göstermektedir. Model 1 ve model 2 arasındaki fark geometrik doğrulsuzlukların ve birleşim davranışının dikkate alınmasıdır.

Model 1’de doğrusalsızlıklar dikkate alınmaz ve birleşimler idealleştirilerek dikkate alınır. Şekil 5.2’de birleşim deney sonuçları verilmiştir. Deney sonuçları göz önüne alındığında ve incelenen yapının kafes olduğu göz önünde alındığında birleşimler mafsallı olarak idealleştirilmiştir. Mafsal ataması program arayüzü aracılığıyla *assign-frame-release/partial fixity* bölümü aracılığı ile eleman uçlarında momentlere karşılık gelen serbestliklerin serbest bırakılması şeklinde yapılmaktadır. Analiz kısmı ise *load case* bölümünden doğrusal elastik-statik seçeneği ayarlanarak yapılmaktadır. Bu yaklaşımda davranışın belirlenmesi kullanıcıya bağlıdır. Kafesin göçme değeri ve buna karşılık gelen deplasmanlar iterasyon şeklinde yapılır. Yük değerleri arttırılarak eleman ve birleşim dayanımları kontrol edilerek yapılır.

Model 2’de ise geometrik doğrusalsızlık dikkate alınır. Bunun için *load case* bölümünden yük için *nonlinear* bölümü aktifleştirilir ve geometrik doğrusalsızlık için *P-delta* bölümü aktifleştirilir, *large displacements* seçeneği uygulanmayarak küçük deplasmanlar teorisi çerçevesinde analizler gerçekleştirilir. Malzeme doğrusalsızlıkları ve plastik mafsal tanımlaması yapılmamaktadır. Birleşimin serbestlik değeri için literatürde birçok yöntem kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında birleşimin moment-dönme ilişkisi için deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Önerilen modelin yaklaşımına uygun olarak tüm eğri dikkate alınmayıp, modelin sadece başlangıç rijitliği dikkate alınmıştır.

Model 1 ve model 2 ile yapılan analizlerde sistemin yük-deplasman ilişkisinin elde edilebilmesi için gerekli bir diğer kriter de eleman dayanımlarıdır. Ahşap dayanımları deneyle belirlendiği için ahşap kesitlerdeki gerilme kontrolleri için ek bir işleme gerek kalmamaktadır. Benzer şekilde deneyde ahşap kafesin göçme türü birleşimden ahşap elemanın kopması şeklinde olduğu için eleman dayanımı kontrollerinde aksenal gerilme haricinde bir tahkik yapılmamıştır. Ancak birleşimler modellenmeyip sistemde düğüm olarak dikkate alındığından birleşimlerin gerilme tahkikleri için başka bir yol izlenmelidir. Bunun için yönetmeliklerde verilen birleşim kapasitesi hesabı ya da literatürde verilen çeşitli analitik yöntemler kullanılabilir. Benzer şekilde göçme yükü deneyle veya sonlu elemanlar yöntemi ile

de belirlenebilir. Çalışmada pratik olması amacıyla birleşimlerin yük taşıma kapasitesi deneyde belirlenen ortalama değer olan 27,8 kN değeri dikkate alınmıştır. Deney sonucu birleşim yükleri %10 sapma gözlenmekte olup referans alınan çalışmada gerçekleştirilen sonlu elemanlar analizinde göçme yükü 27 kN olarak belirlenmiştir. Deneyle belirlenen %10 sapma değeri 30,58 ve 25,02 kN'dir (Vallee T. vd., 2011). Birleşim göçme yükü ayrıca Eurocode 5 ([EC], 1995) ile de hesaplanmış olup deney sonuçları ile yakın sonuçlar elde edilmiştir.

5.4.2 ABAQUS

Program aracılığıyla modelleme adımları; sistem elemanlarının tanımlanması, elemanların malzeme özelliklerinin tanımlanması, eleman kesit ve malzeme yönlerinin tanımlanması, sistem geometrisinin oluşturulması, analiz adımlarının ve özelliklerinin tanımlanması, elemanlar arası etkileşim, temas gibi özelliklerin tanımlanması, yük ve sınır koşulların tanımlanması, sonlu elemanlar ızgarasının oluşturulması ve analizlerin gerçekleştirilmesi şeklinde yapılmaktadır.

Program malzeme tanımlaması için geniş imkanlar sunmaktadır. Elastisite ve plastisite özellikleri tanımlanabildiği gibi kırılma ve hasar özellikleri de tanımlanabilmektedir. Benzer şekilde malzeme anizotropik şekilde de tanımlanabilmektedir. Programın sunduğu geniş modelleme imkanı temas özellikleri için de geçerlidir. Eksenel, teğet gibi temaslar tanımlanabilmekte olup bunun yanı sıra kırılma ve hasar da tanımlanabilmektedir.

Programda dikkat edilmesi gereken hususlardan en önemlilerinden birisi girilen birimlerin bir modül aracılığıyla değiştirilemiyor olmasıdır. Dolayısıyla doğru sonuca ulaşabilmek için analizin başından sonuna kadar birimler tutarlı olmalıdır. Analizlerde kullanılan birim sistemi Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2 Analizlerde kullanılan birim sistemi

Uzunluk	mm
Kuvvet	N
Yoğunluk	Kg/mm ³
Gerilme	MPa

Programın kullanıcı arayüzünde bulunan model ağacı ile modellemeler pratik olarak yapılabilir. Programın *Part* modülü ile sistem geometrisi programa aktarılabilir ya da kullanıcı tarafından arayüz yardımı ile tanımlanabilir. *Property* modülü aracılığıyla malzeme ve kesit tanımlamaları yapılabilir. Şekil 5.9’da model 4’ün malzeme tanımlamaları gösterilmiştir. Burada malzemenin elastik ve elastik ötesi davranışları tanımlanabilmektedir. Ortotropik özelliklerin tanımlaması *engineering constants* seçeneği yardımıyla tanımlanabilmektedir. Buna ek olarak *plastic* seçeneğinin alt seçeneği olan *potential* bölümü ile göçme kriteri tanımlanabilmektedir. Programda birçok farklı göçme kriteri tanımlanabilir olup, Hill potansiyel fonksiyonu Denklem 5.1’de verilmiştir ([DS], 2011). Burada σ_{ij} , uygulanan gerilme değerlerini; $\bar{\sigma}_{ij}$ ölçülen akma gerilmelerini göstermektedir.

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (5.1)$$

Burada F, G H, L, M ve N malzemenin farklı yönlerine karşılık deneyler sonucunda elde edilen sabitleridir ve Denklem 5.2-7 ([DS], 2011) aracılığıyla hesaplanabilir.

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} \right) \quad (5.2)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} \right) \quad (5.3)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left(\frac{1}{\bar{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\bar{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\bar{\sigma}_{33}^2} \right) \quad (5.4)$$

$$L = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{23}} \right)^2 \quad (5.5)$$

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{13}} \right)^2 \quad (5.6)$$

$$N = \frac{3}{2} \left(\frac{\tau^0}{\bar{\sigma}_{12}} \right)^2 \quad (5.7)$$

Programda Hill kriteri tanımlanabilmesi için 6 farklı anizotropik akma gerilmesi oranı tanımlanması yeterli olup bu parametreler aşağıda Denklem 5.8-13'te verilmiştir ([DS], 2011).

$$R_{11} = \frac{\bar{\sigma}_{11}}{\sigma^0} \quad (5.8)$$

$$R_{22} = \frac{\bar{\sigma}_{22}}{\sigma^0} \quad (5.9)$$

$$R_{33} = \frac{\bar{\sigma}_{33}}{\sigma^0} \quad (5.10)$$

$$R_{12} = \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}} \quad (5.11)$$

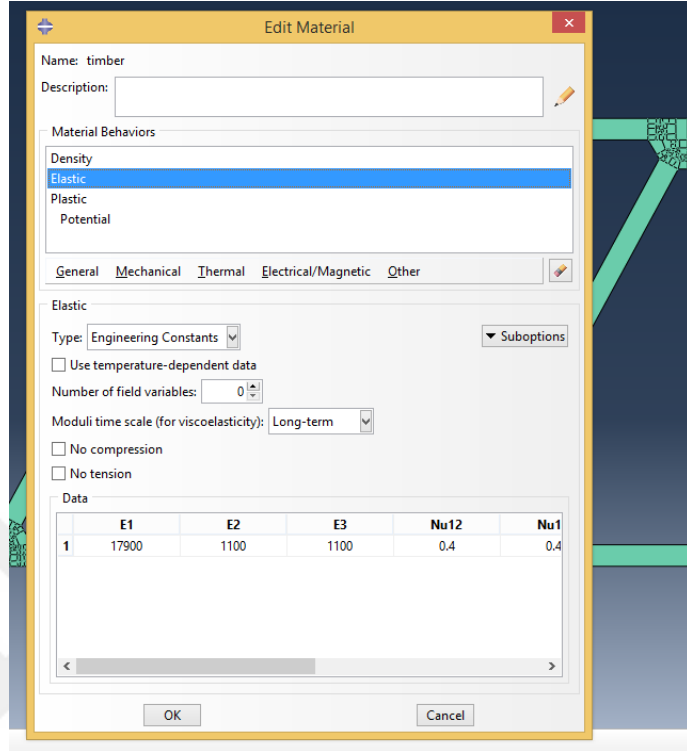
$$R_{13} = \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}} \quad (5.12)$$

$$R_{23} = \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\tau^0 = \sigma^0 / \sqrt{3}} \quad (5.13)$$

Yukarıda verilen denklemler aracılığıyla hesaplanan parametrelerin *potential* alt bölümü ile tanımlanması ile Hill kriteri modele dahil edilmiş olmaktadır.

Programda bir sonraki adım sistem geometrisinin parçalarının birleştirilerek hesaba esas geometrinin oluşturulmasıdır. Bu işlemden sonra programın *interaction* ve *mesh* modülü aracılığıyla istenilen temas ilişkisi ve sonlu elemanlar ızgarası

oluşturulabilir. Programın *load* aracılığıyla modelin sınır şartları ve yükleme durumu tanımlanarak analize hazır hale getirilebilir.



Şekil 5.9 Malzeme tanımlanması

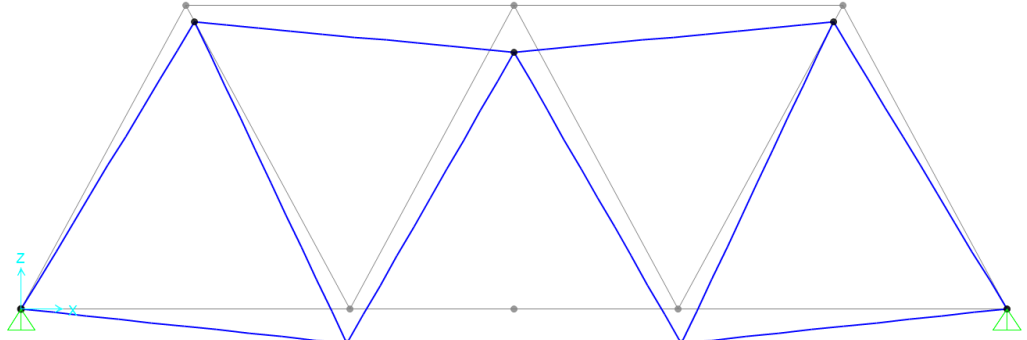
Tez kapsamında ABAQUS ile yapılan modellemelerde düzlem elemanlar için S4R dört düğüm noktalı kuadrilateral büyük şekil değiştirme elemanlar kullanılmıştır. Global analizlerde ise 3DFRAME elemanlar kullanılmıştır. Lokal modellemelerde tüm sistem uygun model yaklaşımı dikkate alınarak yapılmış olup, global analizlerde birleşim bölgeleri için gerekli sonuçlar ayrıca girilmiştir.

5.5 Analiz sonuçları

5.5.1 Model 1

Çalışma sonucu yapılan iterasyonda 3 nolu birleşimin göçmesi şeklinde gerçekleşmiştir ve göçme yükü değeri 22,5 kN olarak saptanmıştır. Kafes açıklığındaki düşey yer değiştirme değeri 0,6 mm olarak belirlenmiştir. Kafesin yük-deformasyon görüntüsü aşağıda Şekil 5.10'da verilmiştir. Elemanlarda gerilme

değeri çok düşük olup 1-2 MPa arası değişmektedir. Göçme yükü değeri olarak üst ve alt sonucu olan 30,58 ve 25,02 kN değerleri dikkate alındığında ise kafes göçme yükü 20 ve 25 kN olmaktadır.



Şekil 5.10 Model 1 sonucu kafesin yük altında deforme hali (27,8 kN için)

5.5.2 Model 2

Çalışma üç aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada yapısal elemanlar ve birleşimler elastik kabul edilip birleşimlerin mafsallı davrandığı varsayılmıştır. Yalnızca ikinci mertebe etkileri dikkate alınmıştır. Bu analizin sonucunda model 1 ile önemli derecede farklar gözlemlenmemiştir. Kafes düğümlerinde yer değiştirmeler artmıştır. Ancak değişim binde bir mertebesinde. Benzer şekilde gerilme ve çubuk kuvvetlerinde önemli değişiklikler görülmemiştir.

Daha sonra ikinci mertebe etkilerine ek olarak birleşimin serbestlik değerleri gerçekçi bir şekilde dikkate alınmıştır. Bunun için birleşim deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Çalışma doğrusal elastik sınır altında yapıldığı için birleşimin yük şekil değişimi ilişkisinde de aynı kabul referans alınmış olup ilişki tek bir rijitlik değeri ile idealleştirilmiştir. İdealleştirilen değer global analizlere dahil edilmiştir. Birleşimin eksenel rijitliğini SAP2000 çerçevesinde yapılan global analizlere dahil edilebilmesi programda *release/partial fixity* sekmesi aracılığıyla doğrusal olarak bir yay katsayısı değeri atanması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm aracılığıyla, hesaplanan rijitlik değeri eleman uçlarına atanmıştır ve doğrusal elastik ikinci mertebe analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda sistem düğüm yer

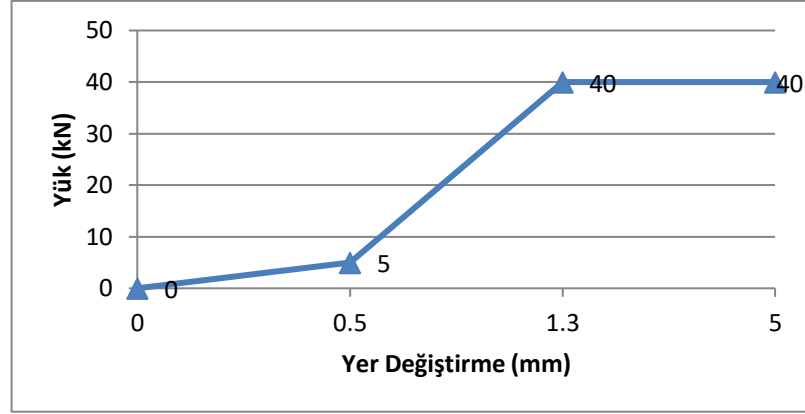
değiştirmelerinde yaklaşık %3 artış görölmüştür. Ancak eleman uç kuvvetleri ve gerilmelerinde önemli değişiklikler görölmemiştir. Aşağıda birleşimin doğrusal sınırlar altında idealleştirilmiş yük-şekil değişimi ilişkisi şekil 5.11’de verilmiştir.



şekil 5.11 Doğrusal elastik sınır altında idealleştirilmiş yük-şekil değişimi ilişkisi

5.5.3 Model 3

Çalışmada elemanlar çubuk olarak modellenerek malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Doğrusal olmayan davranış dikkate alınırken yönetmelikler referans alınmış olup buna göre basınç altında elastik kusursuz plastik kabulü yapılmış olup çekme altında doğrusal elastik olarak kabul edilmiştir. Bunun yanı sıra birleşimlerin doğrusal olmayan yük şekil değişimi ilişkisi bu modelde alternatif bir yöntem olan *birleşim elemanı yöntemi* (Li vd., 1995) kullanılarak dahil edilmiştir. Bu yöntemde birleşim karakteristikleri çubuk gibi şekil değiştirebilen bir eleman şeklinde idealize edilerek analizlere dahil edilmektedir. Birleşimin doğrusal olmayan davranışı için deney sonuçları referans alınmıştır. Birleşim deney sonuçlarına göre tamamen doğrusal olmayan bir davranış göstermiş olsa da hesap kolaylığı ağıısından iki doğru şeklinde idealize edilmiştir. Bu yöntem çelik yapı birleşimlerinin davranışını idealize edilmesinde de tercih edilmektedir (Mofid, Asl ve McCabe, 2001; Shi, Shi ve Wang, 2007). Buna göre, deney sonucu ve iki doğru ile idealize edilmiş birleşim davranışı aşağıda şekil 5.12’de verilmiştir.

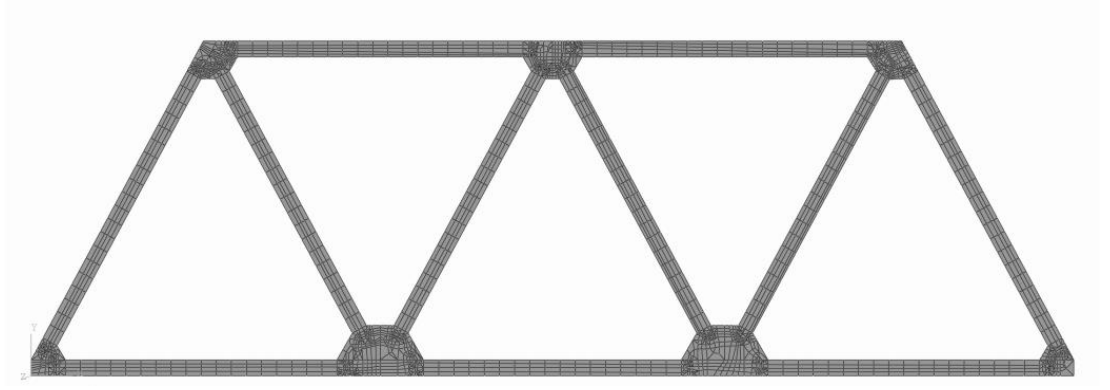


Şekil 5.12 Doğrusal olmayan idealleştirilmiş yük-şekil değişimi ilişkisi

Bu model ile yapılan analizler çerçevesinde kafesin göçme yükü 32,42 kN olarak tespit edilmiştir. Model 1 ve model 2'ye benzer olarak göçme birleşimlerde gerçekleşmiştir. Göçme yüküne karşılık gelen kafes en büyük yer değiştirme değeri ise 14 mm olarak tespit edilmiştir.

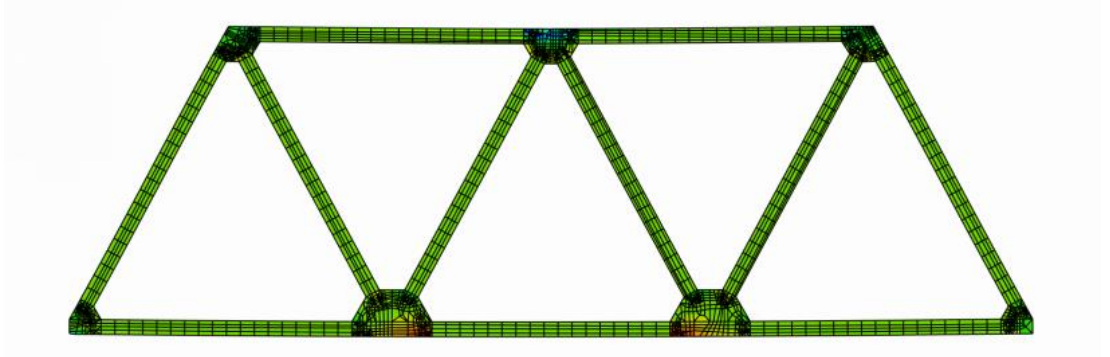
5.5.4 Model 4

Model 4 kapsamında yapılan analizlerde kabuk sonlu elemanlar kullanılmıştır. Ahşabın anizotrop malzeme özellikleri dikkate alınmakla beraber birleşim modellemesinde farklı bir yaklaşım kullanılmıştır. Çalışma 2B olarak gerçekleştirilmiş olup birleşim bölgeleri gerçek boyutları ile modellenmiştir. Buna karşılık model çerçevesinde ahşap ile birleşimler arasında kusursuz yük aktarımı olacağı kabul edilmiştir. Modelin sonlu elemanlar ızgarası oluşturulmuş 3B görüntüsü aşağıda Şekil 13'te verilmiştir. Modelde ahşap elemanlarda kırılma kriteri olarak Hill kriteri referans alınmıştır. Çelik elemanlar için bir kırılma kriteri tanımlanmamıştır.

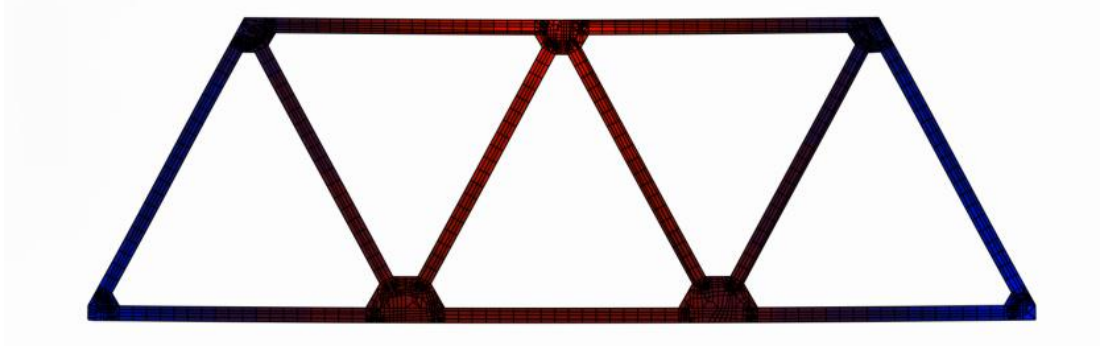


Şekil 5.13 Kabuk sonlu eleman modeli

Çalışma sonucunda kafesin göçme yükü 39,5 kN olarak tespit edilmiştir. Kafesin göçme modu birleşim bölgelerinde yırtılma olarak tespit edilmiştir. Göçme yüküne karşılık gelen yer değiştirme değeri ise 16 mm olarak tespit edilmiştir. Aşağıda Şekil 14'te kafesin aksenal gerilme dağılımı verilmiştir. Şekilde gerilme dağılımı renk spektrumu şeklinde verilmiş olup maviden kırmızıya doğru gerilme artmaktadır. Şekil 15'te kafesin yük altında yer değiştirmiş hali verilmiştir.



Şekil 5.14 Kafes gerilme dağılımı



Şekil 5.15 Kafes şekil değiştirmiş hali

5.5.5 Model 5

Atıf yapılan çalışma kapsamında model 5'i temsil edebilecek bir sonlu elemanlar çalışması yapıldığı için tez çalışması kapsamında ayrıca bir analiz yapılmamıştır. Çalışmada Norris kriteri (Norris, 1962) dikkate alınmış olup ahşap ortotropik izotropik olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada 20 düğümlü katı elemanlar kullanılmış olup sık sonlu elemanlar ızgarası oluşturulmuştur. Çalışmada ahşabın plastik davranışı dikkate alınsa da dübeller elastik olarak modellenmiştir. Ahşap ve dübel birleşim arası temasın dikkate alındığı çalışmada deney sonuçları ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Buna göre deney sonuçları ile model 5 sonucu değişiklik +/- %5 olarak tespit edilmiştir.

5.6 Sonuçların kıyaslanması

Farklı modelleme yaklaşımları ile deney sonuçları kıyaslandığında en doğru sonucun model 5 ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Model 5 en karmaşık model olup deney koşullarını en iyi temsil eden modeldir. Model 5 ile göçme yükü, yer değiştirme ve göçme modu etkin bir şekilde tespit edilebilmektedir.

Model 1 elastik sınır altında davranışın tespitine yönelik olup pratik bir yöntem olarak geliştirilmiştir. Ancak deney sonuçları ile kıyaslandığında göçme yükü doğru tespit edilse bile kafes yer değiştirmesinde önemli mertebede sapma gözlemlenmiştir. Benzer durum model 2 sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Model 3 çerçevesinde

yapılan sonuçlarda kafes yer değiştirmeleri ve göçme yükü deney sonuçlarına model 1 ve 2'den daha yakındır. Ancak göçme modu ve göçme yükü deney sonuçlarından uzaktır.

Model 4 ile yapılan analizlerde göçme modu ve göçme yükü gerçekçi bir şekilde tespit edilmiştir. Buna karşılık sayısal modelin kafes yer değiştirmesi ile deney sonuçları arasında önemli sapmalar bulunmaktadır.

Farklı modeller çerçevesinde yapılan analizlerde farklı sonuçlar elde edilmesi kabul edilebilirdir. Bu durumun nedeni modellerin farklı beklentileri karşılayabilecek şekilde geliştirilmesinden kaynaklı olup farklı mekanik davranışlar incelenebilmektedir. Modeller arasındaki en büyük fark birleşimin başlangıç yer değiştirmesinin yalnızca model 5 ile yapılan analizlerle tespit edilebilmiş olmasıdır. Başlangıç yer değiştirmesi tamamlanana kadar sistemin yük aktarmadığı söylenebilir olup Bölüm 2'de bu durum açıklanmıştır. Dolayısıyla yük aktarım mekanizmasının kusursuz bir şekilde gerçekleşmediği bu durumun modellenmesi zordur. Modellerde göçme yükü değeri ve göçme modları tespiti yeterli olsa da yer değiştirme değerinin elde edilmemesi nedeni bu durum gösterilebilir. Aşağıda Tablo 5.3'te dikkate aldığı farklı mekanik ilişkiler özetlenmiştir. Tablo 5.4'te ise modellerin çalışma sınırları ve göçme modları, uygulama kolaylıkları ile birlikte verilmiştir. Tablo 5.5'te analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.3 Modellerin mekanik özetleri

Modeller	Malzeme	Geometrik	Göçme	Temas	Kırılma	Hasar	Birleşim
Model 1	Doğrusal elastik	Birinci mertebe	X	X	X	X	Mafsallı/rijit
Model 2	Doğrusal elastik	İkinci mertebe	X	X	X	X	Yarı-rijit/elastik
Model 3	Elastik-kusursuz plastik	İkinci mertebe	X	X	X	X	Doğrusal olmayan yay/birleşim elemanı
Model 4	Elastik-kusursuz plastik	İkinci mertebe	Hill	X	X	X	Gerçek geometri
Model 5	Doğrusal olmayan	İkinci mertebe	Hill	Var	Var	Var	Gerçek geometri

Tablo 5.4 Modellerin kullanılabilirliği ve uygulanabilirliği

Modeller	Uygulanabilirlik	Kullanılabilirlik
Model 1	Global analiz	Kolay
Model 2	Global analiz	Kolay
Model 3	Global analiz	Kolay-orta
Model 4	Lokal/Global Analiz	Orta-zor
Model 5	Lokal/Global Analiz	Zor

Tablo 5.5 Analiz sonuçları ile deney sonuçlarının kıyaslanması

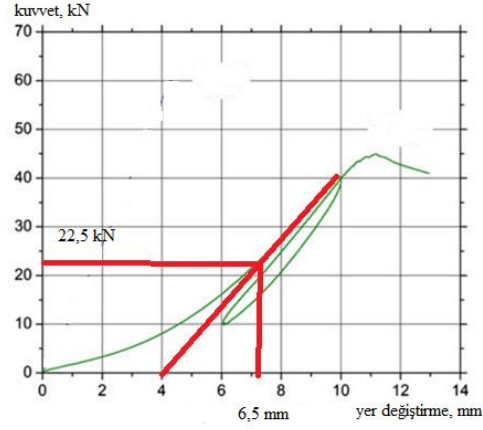
Modeller	Göçme yükü	Deney/Model Oranı (göçme yükü)	Yer değiştirme	Deney/Model Oranı (yer değiştirme)	Göçme modu
Model 1	22.5 kN	%50	0.6 mm	%5	Birleşim taşıma gücü
Model 2	22.5 kN	%50	0.62 mm	%6	Birleşim taşıma gücü
Model 3	32.42 kN	%72	14 mm	%127	Birleşim taşıma gücü
Model 4	39.5 kN	%88	16 mm	%145	Ahşabın sıyrılması
Model 5	41.5 kN	%92	10.45 mm	%95	Ahşabın sıyrılması
Deney	44.9 kN	%100	11 mm	%100	Ahşabın sıyrılması

Tablo 5.5 incelendiğinde malzeme doğrusalsızlıklığı ve birleşim davranışının modellenmesi deney koşullarına yakınlışıkça analiz sonuçlarının daha çok yakınsadığı görülmektedir. Model 3'ün model 1 ve 2'den en önemli farkı birleşimin başlangıç yer değiştirmesinin dikkate alınabilmesidir. Birleşimin dikkate alınabilmesi ikinci mertebe etkilerinin dikkate alınmasından sonuçlara daha fazla etkimiştir. Buna karşılık göçme modu bu modelle doğru şekilde tespit edilememektedir. Model 4 ise bu konuda daha başarılı olsa da yer değiştirmelerin tespitinde Model 3'ten daha başarısız sonuç vermiştir. Bu durumun model 4'te birleşim bölgesinde yapılan kusursuz yük aktarımı kabulünden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

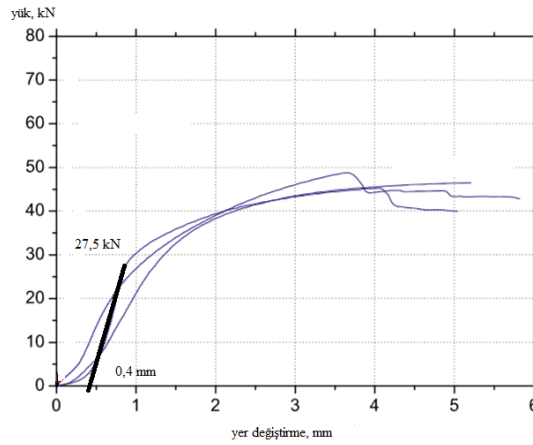
5.7 Modellerin değerdendirilmesi

5.7.1 Model 1 ve 2

Çalışma sonuçları incelendiğinde elastik sınır altında davranışın incelendiği model 1 ve 2'nin göçme yükü değeri doğru tespit edilmesine rağmen yer değıştirme değeri doğru tespit edilememiştir ve sapma değeri çok büyük olup %95 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.16'da kafes deneyinin elastik sınıra karşılık gelen yer değıştirme ve göçme değeri verilmiştir. Şekil 5.17'de ise birleşim deneyinin elastik sınıra karşılık gelen yük ve yer değıştirme değeri verilmiştir.



Şekil 5.16 Elastik sınıra karşılık gelen kafes yük ve yer değıştirme değeri



Şekil 5.17 Elastik sınıra karşılık gelen birleşim yük ve yer değıştirme değeri

Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve model 1 ve 2'nin sonuçları kıyaslandığında bir korelasyon görülmektedir. Kafes elastik sınır yükü 22,5 kN iken birleşim için bu değer 27,5 kN olmaktadır. Birleşim için bu değere bakıldığında yer değiştirmenin büyük kısmı başlangıç yer değiştirmesi değerine karşılık gelmektedir. Başlangıç yer değiştirme tamamlanıp birleşimler yük aktarım mekanizmasına kusursuz şekilde dahil edileceği noktaya kadar elemanlarda ve sistem genelinde önemli gerilmeler görülmeyeceği kabuk edilebilir olup bu sonuç model 1 ve 2'de görülebilmektedir. Bunun yanında birleşim ve kafes elastik sınır yüklerine karşılık gelen yer değiştirmeler kıyaslandığında kafes için 6,5 mm, birleşim ise 0,1 mm değeri okunmaktadır. Model 1 ve 2 de ise bu sonuç 0,6 mm olarak elde edilmişti. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde aşağıda denklem 5.14'deki ilişki kurulabilir. Burada δ , yer değiştirme; g,e alt indisi global elastik analize göre sistem yer değiştirme değeri, i ve j ise düğüm sayısıdır. Denklem her bir birleşimin başlangıç yer değiştirmesi ile sistem global yer değiştirmesinin toplamının gerçek yer değiştirme değerine eşit olduğunu ifade etmektedir. İşlem yapılırsa $0,4*7+0,6=3,4$ mm'dir. Bu değere incelenen probleme özel olarak başlangıç yer değiştirme değeri birbirleri ile etkileşimde olacak 4 düğüm için 4 katı olarak dikkate alınması gerekmektedir. Buna göre gerçek yer değiştirme değeri $3,4+0,4*4=5$ mm'dir.

$$\sum_i^j \delta = \delta_i + \delta_{g,e} = \delta_{sistem} \quad (5.14)$$

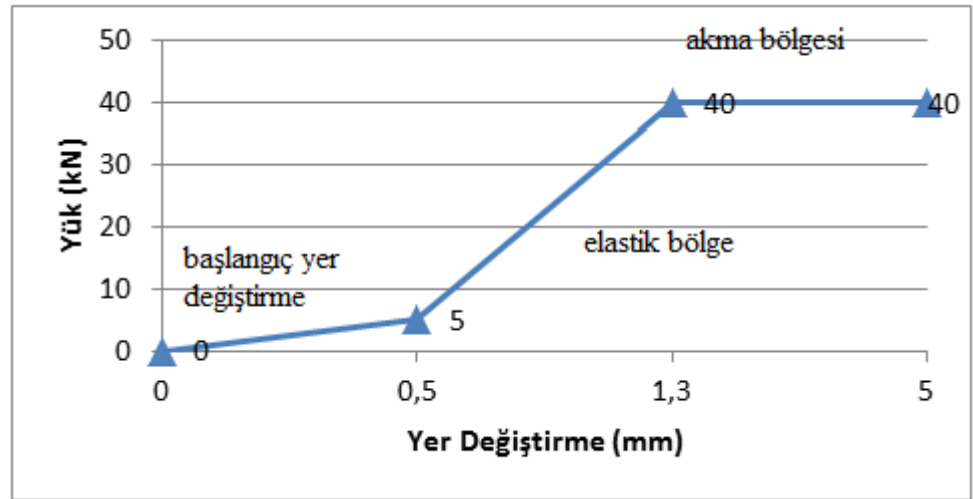
Yukarıdaki işlemlerden görüleceği üzere global analiz sonuçlarına modellerle elde edilemeyecek olan birleşim başlangıç yer değiştirme değerleri harici olarak hesaplanıp dikkate alınmasıyla sistemin gerçek yer değiştirme değeri elde edilebilir. Yukarıda verilen işlemlerde bazı ön kabuller yapılmış olup bunlar aşağıda sıralanmıştır:

- Süperpozisyon ilkesi geçerlidir.
- Başlangıç yer değiştirme değerleri mesnet çökmesi gibi değerlendirilmeyip sistemin başlangıç koşullarını oluşturacak şekilde değerlendirilmelidir. Ancak global analizlerde bu yer değiştirme değeri ihmal edilebilir.
- Başlangıç yer değiştirmeler sistem elemanlarında önemli mertebede gerilme oluşturmamaktadır.

5.7.2 Model 3, 4 ve 5

Model 3 sonuçları sistem yer değiştirme değerinin tespitinde başarılı olmuştur. Bu durumun temel nedeni birleşim gerçek rijitlik değeri dikkate alınması sonucu birleşimin başlangıç yer değiştirmesinin dikkate alınabilmesidir (Şekil 5.12). Ancak bunun yapılabilmesi için doğrusal olmayan analiz gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Buna karşın, başlangıç yer değiştirmelerini sistemde gerilme oluşturmayacak şekilde değerlendirilirse, sistem yer değiştirmesi için aşağıdaki yöntem önerilerilebilir:

- Elastik analiz iki aşamada yapılır. Birinci aşamada birleşim rijitlik değeri doğrusal olarak dikkate alınır ve bu değer başlangıç yer değiştirmesine karşılık gelecek şekilde dikkate alınır (Şekil 5.18). Daha sonra sistem sıfır başlangıç koşulları altında ve elastik davranışa karşılık gelen birleşim rijitlik değerleri ile analiz edilir. Çıkan iki ayrı yer değiştirme değerinin süperpozisyon ilkesi gereğince toplanması ile gerçek yer değiştirme değeri elde edilebilir.



Şekil 5.18 Birleşim yük yer değiştirme şekli ve bölgeleri

Model 4 sistem göçme yükü değeri ve göçme modunu belirlemede etkili olmuştur (Şekil 5.19). Ancak yer değiştirmeler yeterli doğrulukta değildir. Bu durumun nedeninin kusursuz yük aktarım kabulü olduğu düşünülmektedir.

Dolayısıyla pratik modellemelerde sistemi düzlem sonlu elemanlara modelleyip kırılma kriteri dikkate alınması gerçekçi bir analiz için yeterli değildir. Etkileşim dikkate alınması gerekmektedir



Şekil 5.19 Kafes göçme modu deney ve analiz sonuçlarının karşılaştırması

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ahşap insanoğlunun kullandığı en eski yapı malzemelerinden birisidir. Bu özelliği ile ahşap yapılar üzerinde çok çeşitli uygulama teknikleri ve çeşitliliği günümüze miras kalmış olup modern mühendislik ilkeleri ve imkanları ile de çeşitlenerek gün geçtikçe artmaktadır.

Ahşabın tarihçesi beş ana bölümde değerlendirilebilir. Bunlar; Ortaçağ öncesi, Ortaçağ-18.yy arası, 18.yy-19.yy arası, 19.yy-20.yy arası ve günümüz olarak değerlendirilebilir. Bu sınıflandırma ahşap yapıların tarihçesinde görülen önemli değişiklikler referans alınarak yapılmış olup Bölüm 1’de detaylıca açıklanmıştır.

Ahşap doğası itibariyle anizotrop ve heterojen bir malzemedir. Mekanik davranışı yükleme yönü, nem, yük süresi gibi çeşitli etkilerle önemli mertebede değişmektedir. Ahşap yapıların analizlerinin yeterli olabilmesi için bu özelliklerin iyi tespit edilip tasarım ve analiz sürecine dahil edilmesi zorunludur.

Ahşap yapı birleşimleri 4 temel grupta derlenebilir olup bunlar; geleneksel, dübel, yapıştırma ve mekanik olarak açıklanabilir. Ahşap malzemelerde olduğu gibi birleşim türü de davranışa önemli mertebede etkili olup dikkate alınmalıdır.

Günümüz yönetmelik ve standartları çerçevesinde ahşap yapılar belirli sınırlar altında uygulanabilmektedir. Ancak başta depreme karşı tasarım gibi konularda imkanlar sınırlı olup daha fazla çalışmanın literatüre kazandırılması önem arz etmektedir.

Ahşap yapılar çeşitli yaklaşımlarla modellenip analiz edilebilir. Literatürde ahşap malzeme modelleri temelde 2 grupta derlenebilir olup bunlar basit ve karmaşık olarak açıklanabilir. Basit modeller elastik ve elastoplastik modellerdir. Karmaşık modeller ise deneysel, elastisite temelli, plastisite temelli, sürekli ortam hasar

mekaniği, kırılma mekaniği ve karma modeller olarak açıklanabilir. Modeller teorik olarak basitten karmaşığa doğru verilmiştir. Ahşabın modellenmesi ise genel itibarıyla malzeme geometrileri referans alınarak yapılmaktadır.

Ahşap yapıların modellenmesi konusunda sönüm ve birleşim modelleri malzeme modellerine oranla daha sınırlıdır. Ahşap yapıların özellikle depreme karşı tasarımı dikkate alındığında bu alanlarda daha fazla çalışmanın literatüre kazandırılması büyük önem arz etmektedir.

Ahşap yapıların analizi üzerine mevcut literatür birikimi ve güncel yönetmeliklerdeki yönlendirmeler kıyaslandığında önemli açıklar tespit edilmiştir. Bu hususlardan birisi hangi analiz yönteminin hangi şartlar ve sınırlar altında yeterli doğrulukta pratik olarak kullanılabileceğidir. Bu amaçla tez çalışması kapsamında literatürde mevcut olan bir deney çalışması farklı modelleme yaklaşımları ile analiz edilerek deney sonuçları ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda gerçekçi bir model için birleşimlerin gerçekçi bir şekilde modellenmesinin kafes yer değiştirmesinde en önemli etkiyi yaptığı görülmektedir. Buna karşın göçme yükü ve göçme modu tespiti için en az düzlem modelleme ve hasar mekaniği gibi karmaşık malzeme modeli de dikkate alınması gerekmektedir. Günümüz imkanları ve gereksinimleri göz önüne alındığında en gerçekçi yaklaşım olan model 5'in pratik olmaktan uzak olduğu söylenebilir. Buna karşın model 3 ve model 4 farklı açılardan yeterli sonuç vermektedir. Model 3'te birleşimin başlangıç yer değiştirmesi çok parçalı doğrusal bir ilişki ile temsil edilebilir olup böylelikle kafes yer değiştirmesi deney sonuçlarına daha yakın sonuç vermiştir. Buna karşın modelde çubuk elemanların kullanılması nedeniyle göçme modu kusursuz bir şekilde tespit edilememektedir. Model 4'te ise düzlem sonlu elemanların kullanılması ile göçme modu ve yükü deney sonuçlarına daha yakın elde edilmiş olsa da birleşim yük aktarımının kusursuz olduğu varsayımı nedeniyle yer değiştirmeler model 3'e oranla daha yanlış sonuçlanmıştır.

Çalışmada dikkate alınan beş farklı modelleme yaklaşımı farklı yeterlilik ve amaçlara uygun sonuç verebilmektedir. Model 1 ve 2 deney sonuçlarına en uzak

sonucu vermiştir. Bu durumun temel nedeninin birleşim davranışının dikkate alınamamasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Doğrusal elastik göçme sınırı altında çalışıldığında bile yer değiştirmelerin gerçekçi bir şekilde hesaplanamadığı göz önüne alındığında, başlangıç birleşim yer değiştirmesinin dikkate alınabileceği yaklaşık yöntemlerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanabilir. Tez kapsamında bu konu için bir yöntem önerilmiş olup başarılı sonuç verilmiştir. Model 3 birleşim yer değiştirme değerinde ve göçme yükü tespitinde en başarılı yöntemlerden biridir. Ancak ahşap yapılarda birleşim modelleri üzerine yapılmış olan çalışmalar çok sınırlıdır. Model 3'ün etkin bir şekilde kullanılabilmesi için bu konuda daha fazla araştırma gerekmektedir. Buna ek olarak Model 3 ile kafes yer değiştirmelerinin yeterli doğrulukta elde edilebilmesi için de bir yöntem önerilmiştir. Model 4 ve 5'te göre daha pratik olduğu da göz önüne alınırsa, birleşim davranışının global analizlere dahil edilebilirliği üzerine çalışmaların artması ahşap yapıların daha iyi tasarlanmasında umut verici gelişmeler sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Abrahamsen, R. (2017, December). *Mjøstårnet-Construction of an 81 m tall timber building* [Bildiri Özeti]. In Internationales Holzbau-Forum IHF (Vol. 2017).
- Akter, S. T., Serrano, E. ve Bader, T. K. (2021). Numerical modelling of wood under combined loading of compression perpendicular to the grain and rolling shear. *Engineering Structures*, 244, .
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112800>
- Aleman, J., ve Mosqueda, G. (2020). Simplified nonlinear model of straight-sheathed wood diaphragms in unreinforced masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, 146(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002539](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002539)
- American Society of Civil Engineers. (2017). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE/SEI 7-16).
<https://doi.org/10.1061/9780784414248>
- American Wood Council. (2018). *National design specification (NDS) for wood construction*. <https://awc.org/publications/2018-nds/>
- Andreasson, S., Yasumura, M. ve Daudeville, L. (2002). Sensitivity study of the finite element model for wood-framed shear walls. *Journal of Wood Science*, 48(3), 171-178. <https://doi.org/10.1007/BF00771363>
- Awaludin, A., Hirai, T., Hayashikawa, T. ve Leijten, A. J. M. (2012). A finite element analysis of bearing resistance of timber loaded through a steel plate. *Civil Engineering Dimension*, 14(1), 1-6. <https://doi.org/10.9744/ced.14.1.1-6>

- Awaludin, A., Smittakorn, W., Hayashikawa, T. ve Hirai, T. (2007). M- θ curve of timber connection with various bolt arrangements under monotonic loading. *Journal of Structural Engineering*, A, 53, 853-862. <https://doi.org/10.11532/structcivil.53A.853>
- Baño, V., Arriaga, F., Soilán, A. ve Guaita, M. (2011). Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. *Biosystems engineering*, 109(4), 241-249. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.05.008>
- Baño, V., Arriaga, F. ve Guaita, M. (2013). Determination of the influence of size and position of knots on load capacity and stress distribution in timber beams of *Pinus sylvestris* using finite element model. *Biosystems engineering*, 114(3), 214-222. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.010>
- Basheer, I. A. (2001). Empirical modeling of the compaction curve of cohesive soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(1), 29-45. <https://doi.org/10.1139/t00-068>
- Bazan, I. M. M. (1980). *Ultimate bending strength of timber beams* [Doktora Tezi]. Nova Scotia Technical College, Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Bedon, C. ve Fragiaco, M. (2019). Numerical analysis of timber-to-timber joints and composite beams with inclined self-tapping screws. *Composite Structures*, 207, 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.008>
- Bill, N. A. (2016). Timber bridge construction on British and Irish railways, 1840-1870: the scale of construction and factors influencing material selection. *Construction History*, 31(1), 75-98. <https://www.jstor.org/stable/26489021>

- Blank, L., Fink, G., Jockwer, R. ve Frangi, A. (2017). Quasi-brittle fracture and size effect of glued laminated timber beams. *European Journal of Wood and Wood Products*, 75(5), 667-681. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1156-0>
- Blasetti, A. S., Hoffman, R. M. ve Dinehart, D. W. (2008). Simplified hysteretic finite-element model for wood and viscoelastic polymer connections for the dynamic analysis of shear walls. *Journal of structural engineering*, 134(1), 77-86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(77\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(77))
- Bouchair, A. ve Vergne, A. (1995). An application of the Tsai criterion as a plastic flow law for timber bolted joint modelling. *Wood science and technology*, 30(1), 3-19. <https://doi.org/10.1007/BF00195264>
- Boudaud, C., Humbert, J., Baroth, J., Hameury, S. ve Daudeville, L. (2015). Joints and wood shear walls modelling II: Experimental tests and FE models under seismic loading. *Engineering Structures*, 101, 743-749. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.053>
- Buchanan, A., Deam, B., Fragiacomio, M., Pampanin, S. ve Palermo, A. (2008). Multi-storey prestressed timber buildings in New Zealand. *Structural Engineering International*, 18(2), 166-173. <https://doi.org/10.2749/101686608784218635>
- Cao, J., Xiong, H., Chen, J. ve Huynh, A. (2019). Bayesian parameter identification for empirical model of CLT connections. *Construction and Building Materials*, 218, 254-269. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.051>
- Chang, W. S., Hsu, M. F. ve Komatsu, K. (2006). Rotational performance of traditional Nuki joints with gap I: theory and verification. *Journal of wood science*, 52(1), 58-62. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0734-7>

- Chang, W. S., Shanks, J., Kitamori, A. ve Komatsu, K. (2009). The structural behaviour of timber joints subjected to bi-axial bending. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 38(6), 739-757. <https://doi.org/10.1002/eqe.854>
- Chen, P. S. (2008). A Study Report on an Ancient Chinese Wooden Bridge Hongqiao. *Structural engineering international*, 18(1), 84-87. <https://doi.org/10.2749/101686608783726614>
- Chopra, A. K. (2015). Teori ve Deprem Mühendisliği Uygulamaları. *Ankara: Palme Yayıncılık, Dördüncü Baskıdan Çeviri.*
- Čizmar, D., Damjanović, D., Pavković, K. ve Rajčić, V. (2014). Ductility analysis of laminated timber beams of small section height. *Građevinar*, 66(05.), 395-406. <https://hrcak.srce.hr/122572>
- Conners, T. E. (1989). Segmented models for stress-strain diagrams. *Wood science and Technology*, 23(1), 65-73. <https://doi.org/10.1007/BF00350608>
- Coşkun, G. ve Soyhan, H. S. (2011). Sonlu elemanların ağ yöntemi yaklaşımına dayalı kenar civarlarındaki gerilim dağılımlarının tekillikleri. *Engineer & the Machinery Magazine*, (614).
- Cowin, S. C. (1979). On the strength anisotropy of bone and wood. *Journal of Applied Mechanics*, 46(4), 832-838. <https://doi.org/10.1115/1.3424663>
- Crocetti, R. (2014). Timber bridges: General issues, with particular emphasis on Swedish typologies. In *Internationales Holzbau-Forum IHF 2014*.
- Çalışkan, Ö., Meriç, E. ve Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve ahşap yapıların dünü, bugünü ve yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109-118.

Çatal, H. H. (2002). *Yapı ve deprem mühendisliğinde matris yöntemler*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği*. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1-2.htm>

Daudeville, L., Davenne, L. ve Yasumura, M. (1999). Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints. *Wood Science and Technology*, 33(1), 15-29. <https://doi.org/10.1007/s002260050095>

Demirci, C., Málaga-Chuquitaype, C. ve Macorini, L. (2018). Seismic drift demands in multi-storey cross-laminated timber buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 47(4), 1014-1031. <https://doi.org/10.1002/eqe.3003>

Dias, A. M. P. G., Lopes, S. M. R., Van de Kuilen, J. G. ve Cruz, H. M. P. (2007). Load-carrying capacity of timber–concrete joints with dowel-type fasteners. *Journal of structural engineering*, 133(5), 720-727. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:5\(720\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:5(720))

Dias, A. M. P. G., Van de Kuilen, J. W., Lopes, S. ve Cruz, H. (2007). A non-linear 3D FEM model to simulate timber–concrete joints. *Advances in Engineering Software*, 38(8-9), 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.08.024>

Díaz, C., Martí, P., Victoria, M. ve Querin, O. M. (2011). Review on the modelling of joint behaviour in steel frames. *Journal of constructional steel research*, 67(5), 741-758. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.12.014>

Dietsch, P., ve Winter, S. (2012). Eurocode 5—future developments towards a more comprehensive code on timber structures. *Structural Engineering International*, 22(2), 223-231. <https://doi.org/10.2749/101686612X13291382991001>

- Dinehart, D. W. ve Shenton III, H. W. (2000). Model for dynamic analysis of wood frame shear walls. *Journal of engineering mechanics*, 126(9), 899-908. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2000\)126:9\(899\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2000)126:9(899))
- Dinwoodie, J. M. (2000). *Timber: its nature and behaviour*. CRC Press.
- Dolan, J. D. ve Foschi, R. O. (1991). Structural analysis model for static loads on timber shear walls. *Journal of Structural Engineering*, 117(3), 851-861. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:3\(851\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:3(851))
- Dorn, M., de Borst, K. ve Eberhardsteiner, J. (2013). Experiments on dowel-type timber connections. *Engineering structures*, 47, 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>
- Eslami, H., Jayasinghe, L. B. ve Waldmann, D. (2021). Nonlinear three-dimensional anisotropic material model for failure analysis of timber. *Engineering Failure Analysis*, 130, 105764. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105764>
- Estrella, X., Guindos, P., Almazán, J. L., ve Malek, S. (2020). Efficient nonlinear modeling of strong wood frame shear walls for mid-rise buildings. *Engineering Structures*, 215, 110670. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110670>
- European Commission. (1995). *Design of timber structures* (Eurocode 5). <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-5-design-timber-structures>
- European Commission. (1998). *Design of structures for earthquake resistance* (Eurocode 8). <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-8-design-structures-earthquake-resistance>

- Fairhurst, M., Zhang, X. ve Tannert, T. (2014, August). Nonlinear dynamic analysis of a novel timber–steel hybrid system [bildiri özeti]. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*.
- Fairweather, R. H. (1992). *Beam column connections for multi-storey timber buildings* [Yüksek Lisans Tezi]. University of Canterbury. <http://dx.doi.org/10.26021/2586>
- Folz, B., ve Filiatrault, A. (2001). Cyclic analysis of wood shear walls. *Journal of structural engineering*, 127(4), 433-441. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:4\(433\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:4(433))
- Fragiacomo, M., Gregori, A., Xue, J., Demartino, C. ve Toso, M. (2018). Timber-concrete composite bridges: Three case studies. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5(6), 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.09.001>
- Fuentes, S., Eric, F., Clermont-ferrand, P. ve Bouchair, A. (2014). Semi rigidity of traditional timber floors-Modelling aspects of horizontal diaphragms for seismic loading [Bildiri Özeti]. In *World conference on timber engineering*.
- Gattesco, N. ve Boem, I. (2015). Seismic performances and behavior factor of post-and-beam timber buildings braced with nailed shear walls. *Engineering Structures*, 100, 674-685. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.057>
- Gečys, T., Daniūnas, A., Bader, T. K., Wagner, L. ve Eberhardsteiner, J. (2015). 3D finite element analysis and experimental investigations of a new type of timber beam-to-beam connection. *Engineering structures*, 86, 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.037>

- Gharib, M., Hassanieh, A., Valipour, H. ve Bradford, M. A. (2017). Three-dimensional constitutive modelling of arbitrarily orientated timber based on continuum damage mechanics. *Finite Elements in Analysis and Design*, 135, 79-90. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2017.07.008>
- Gilham, P. C. (2015, April). A new look at modern timber bridges [Bildiri Özeti]. In *Structures congress*.
- Girhammar, U. A., Gustafsson, P. J. ve Källsner, B. (2017). Modeling of shear walls using finite shear connector elements based on continuum plasticity. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 11(2), 143-157. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0377-3>
- Groenier, J. (2005). Comparing ASD and LRFD for load rating of timber bridges [Bildiri Özeti]. In *Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*.
- Hankinson, R. L. (1921). Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. *Air service information circular*, 3(259), 130.
- Hashin, Z. (1980). Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of Applied Mechanics*, 47(2), 329-334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
- Hassanieh, A., Valipour, H. R., Bradford, M. A. ve Sandhaas, C. (2017). Modelling of steel-timber composite connections: Validation of finite element model and parametric study. *Engineering Structures*, 138, 35-49. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.016>
- Hassanieh, A., Valipour, H. R. ve Bradford, M. A. (2017). Composite connections between CLT slab and steel beam: Experiments and empirical models. *Journal of*

Constructional Steel Research, 138, 823-836.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.002>

Hill, R. (1998). *The mathematical theory of plasticity* (Vol. 11). Oxford university press.

Hoffman, O. (1967). The brittle strength of orthotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 1(2), 200-206.
<https://doi.org/10.1177%2F002199836700100210>

Itani, R. Y. ve Cheung, C. K. (1984). Nonlinear analysis of sheathed wood diaphragms. *Journal of Structural Engineering*, 110(9), 2137-2147.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1984\)110:9\(2137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1984)110:9(2137))

Ivanyi, M. (2000). *Semi-Rigid Joints Instructural Steelwork*, Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2478-9>

Jenkel, C. ve Kaliske, M. (2014). Finite element analysis of timber containing branches—an approach to model the grain course and the influence on the structural behaviour. *Engineering structures*, 75, 237-247.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.005>

Borgström, E. (2016). *Design of Timber Structures*, Swedish Forest Industries Federation.

Jones, S. W., Kirby, P. A. ve Nethercort, D. A. (1983). The analysis of frames with semi-rigid connections—a state-of-the-art report. *Journal of Constructional Steel Research*, 3(2), 2-13. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(83\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0143-974X(83)90017-2)

Jorissen, A. ve Fragiaco, M. (2011). General notes on ductility in timber structures. *Engineering structures*, 33(11), 2987-2997. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.07.024>

Kang, M., Yang, N. ve Cha, Q. (2011, April). Studies on static performance of mortise and tenon joint in traditional column and tie construction timber structure [Bildiri Özeti]. In *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)* (6197-6200). IEEE.

Karagiannis, V., Málaga-Chuquitaype, C. ve Elghazouli, A. Y. (2017). Behaviour of hybrid timber beam-to-tubular steel column moment connections. *Engineering Structures*, 131, 243-263. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.006>

Kasımzade, A. A. (2004). *Sonlu elemanlar metodu: temelleri ve yapı mekaniğinde uygulamaları*. BirsenYayınevi.

Kharouf, N., McClure, G. ve Smith, I. (2003). Elasto-plastic modeling of wood bolted connections. *Computers & structures*, 81(8-11), 747-754. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00482-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00482-0)

Khelifa, M., Auchet, S., Méausoone, P. J. ve Celzard, A. (2015). Finite element analysis of flexural strengthening of timber beams with Carbon Fibre-Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, 101, 364-375. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.046>

Khelifa, M., Khennane, A., El Ganaoui, M. ve Celzard, A. (2016). Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures. *Materials and Structures*, 49(5), 1829-1840. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0615-5>

Khennane, A., Khelifa, M., Bleron, L. ve Viguier, J. (2014). Numerical modelling of ductile damage evolution in tensile and bending tests of timber

structures. *Mechanics of Materials*, 68, 228-236.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.09.004>

Khorsandnia, N., Valipour, H. R. ve Crews, K. (2013). Nonlinear finite element analysis of timber beams and joints using the layered approach and hypoelastic constitutive law. *Engineering Structures*, 46, 606-614.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.08.017>

Labonnote, N., Rønnquist, A. ve Malo, K. A. (2015). Prediction of material damping in timber floors, and subsequent evaluation of structural damping. *Materials and Structures*, 48(6), 1965-1975. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0286-7>

Langenbach, R. (2010, 21-23 September). *Better than Steel!? The use of timber for Large and tall buildings from ancient times until the present* [Bildiri Özeti]. Proceedings of the first international conference on structures and architecture, Guimaraes, Portugal.

Lefebvre, D. ve Richard, G. (2014, December). Design and construction of a 160-metre-long wood bridge in Mistissini, Quebec [Bildiri Özeti]. In *Proceeding of Internationales Holzbau-Forum* (3-5).

Li, M., Lam, F., Foschi, R. O., Nakajima, S. ve Nakagawa, T. (2012). Seismic performance of post and beam timber buildings I: model development and verification. *Journal of wood science*, 58(1), 20-30.
<https://doi.org/10.1007/s10086-011-1219-5>

Li, T. Q., Choo, B. S. ve Nethercot, D. A. (1995). Connection element method for the analysis of semi-rigid frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 32(2), 143-171. [https://doi.org/10.1016/0143-974X\(95\)93170-9](https://doi.org/10.1016/0143-974X(95)93170-9)

Lopes, S., Jorge, L. ve Cruz, H. (2012). Evaluation of non-linear behavior of timber–concrete composite structures using FE model. *Materials and structures*, 45(5), 653-662. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9787-9>

Lukacevic, M., Lederer, W. ve Füssl, J. (2017). A microstructure-based multisurface failure criterion for the description of brittle and ductile failure mechanisms of clear-wood. *Engineering Fracture Mechanics*, 176, 83-99. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.02.020>

SIMULIA. (2020). *Abaqus analysis user's manual*, Dassault Systemes.

Moe, J. (1961). The mechanism of failure of wood in bending. *Publication International Association for Bridge and Structural Engineering*, 21, 163-178.

Mofid, M., Asl, M. G. ve McCabe, S. L. (2001). On the analytical model of beam-to-column semi-rigid connections, using plate theory. *Thin-walled structures*, 39(4), 307-325. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(01\)00002-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(01)00002-7)

Moradei, J., Brütting, J., Fivet, C., Sherrow-Groves, N., Wilson, D., Fischer, A. ve Ye, J. (2018, July). Structural characterization of traditional moment-resisting timber joinery [Bildiri Özeti]. In *Proceedings of IASS Annual Symposia* (Vol. 2018, No. 20, pp. 1-8). International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).

Nakahara, K. O. J. I., Hisatoku, T., Nagase, T. ve Takahashi, Y. (2000). Earthquake response of ancient five-story pagoda structure of Horyu-Ji temple in Japan [Bildiri Özeti]. *Proceedings of the WCEE*.

Norris, C. (1962). *Strength of orthotropic materials subjected to combined stresses*, United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://ir.library.oregonstate.edu/concern/defaults/7p88cm24r>

- Nwokoye, D. N. (1972). *Investigation into an ultimate beam theory for rectangular timber beams-solid and laminated*. *Timber Res Develop Ass Res Rep E/rr*, 34, 45. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201303231436>
- O'Born, R. (2018). Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study from the world's longest timber bridge design in Norway. *Transportation research part D: transport and environment*, 59, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.018>
- Oñate, E. (2009). *Introduction to the finite element method for structural analysis*, Springer.
- Opazo-Vega, A., Muñoz-Valdebenito, F. ve Oyarzo-Vera, C. (2019). Damping assessment of lightweight timber floors under human walking excitations. *Applied Sciences*, 9(18), 3759. <https://doi.org/10.3390/app9183759>
- Oudjene, M. ve Khelifa, M. (2009). Elasto-plastic constitutive law for wood behaviour under compressive loadings. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3359-3366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.034>
- Pang, S. J., Oh, J. K., Park, C. Y. ve Lee, J. J. (2011). Influence of crossing-beam shoulder and wood species on moment-carrying capacity in a Korean traditional dovetail joint. *Journal of wood science*, 57(3), 195-202. <https://doi.org/10.1007/s10086-010-1159-5>
- Partov, D., Maślak, M., Ivanov, R., Petkov, M., Sergeev, D. ve Dimitrova, A. (2016). The development of wooden bridges through the ages—a review of selected examples of heritage objects. Part 1—the milestones. *Czasopismo Techniczne*, 2016(Budownictwo Zeszyt 2-B 2016), 93-105. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.161.5772>

- Plevris, N. ve Triantafillou, T. C. (1992). FRP-reinforced wood as structural material. *Journal of materials in Civil Engineering*, 4(3), 300-317. <http://worldcat.org/issn/08991561>
- PLUESS, Y., ve Zwicky, D. (2011). Plastic Design of Timber Concrete Composite Girders [Bildiri Özeti]. *London: IABSE/IASS*.
- Popovics, S. (1973). A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. *Cement and concrete research*, 3(5), 583-599. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90096-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90096-3)
- Porcu, M. C., Bosu, C. ve Gavrić, I. (2018). Non-linear dynamic analysis to assess the seismic performance of cross-laminated timber structures. *Journal of Building Engineering*, 19, 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.06.008>
- Quayyum, S. (2020). Parametric models for wind load resistances of wood-frame walls. *Journal of Structural Engineering*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002471](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002471)
- Reynolds, T., Casagrande, D. ve Tomasi, R. (2016). Comparison of multi-storey cross-laminated timber and timber frame buildings by in situ modal analysis. *Construction and building materials*, 102, 1009-1017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.056>
- Rhude, A. J. (1996). Structural glued laminated timber: History of its origins and early development. *Forest Products Journal*, 46(1), 15.
- Rhude, A. J. (1998). Structural glued laminated timber: history and early development in the United States. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 29(1), 11-17.

Richard, M. C. (2019). *Movable bridges of New Hampshire*. New Hampshire Department of Transportation Bureau of Environment.

Richard, N., Daudeville, L., Prion, H. ve Lam, F. (2002). Timber shear walls with large openings: experimental and numerical prediction of the structural behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(5), 713-724. <https://doi.org/10.1139/l02-050>

Rinaldin, G., ve Fragiaco, M. (2016). Non-linear simulation of shaking-table tests on 3-and 7-storey X-Lam timber buildings. *Engineering Structures*, 113, 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.055>

Ritter, M. A. (1990). *Timber bridges: Design, construction, inspection, and maintenance*. US Department of Agriculture, Forest Service, Engineering Staff.

Roncari, A., Gobbi, F. ve Loss, C. (2020). Nonlinear Static Seismic Response of a Building Equipped with Hybrid Cross-Laminated Timber Floor Diaphragms and Concentric X-Braced Steel Frames. *Buildings*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.3390/buildings11010009>

Sandhaas, C., Van de Kuilen, J. W., ve Blass, H. J. (2012). Constitutive model for wood based on continuum damage mechanics [Bildiri Özeti]. In *WCTE, World conference on timber engineering, Auckland, New Zealand, 15-19 July 2012*.

Sandhaas, C., Van de Kuilen, J. W., ve Blass, H. J. (2012, September). A 3D constitutive wood model using the concepts of continuum damage mechanics [Bildiri Özeti]. In *CDROM Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*, Vienna University of Technology, Austria, iSBN (pp. 978-3).

Sandhaas, C., ve Van de Kuilen, J. W. G. (2013). Material model for wood. *Heron*, 58(2-3), 171-91. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:1c5d1da8-35ec-4c5d-b162-fd3e293e85a8>

CSI SAP2000. (2003). *Analysis reference manual*. Computers and Structures, Inc., Berkley, California, USA.

Sejkot, P., Ormarsson, S., Vessby, J. ve Källsner, B. (2020). Numerical out-of-plane stability analysis of long span timber trusses with focus on buckling length calculations. *Engineering structures*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109670>

Seraphin, M. (2003, January). On the origin of modern timber engineering [Bildiri Özeti]. In *Proceedings of the First International Congress on Construction History, Madrid*.

Serrano, E. ve Gustafsson, P. J. (2007). Fracture mechanics in timber engineering—Strength analyses of components and joints. *Materials and structures*, 40(1), 87-96. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9121-0>

Shi, Y., Shi, G. ve Wang, Y. (2007). Experimental and theoretical analysis of the moment–rotation behaviour of stiffened extended end-plate connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(9), 1279-1293. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2006.11.008>

Showalter, J., Manbeck, H. B. ve Pollock, D. G. (1998, Temmuz 12-16). *LRFD versus ASD for wood design* [Bildiri Özeti]. ASAE meeting presentation, Orlando, Florida, United States.

Sirumbal-Zapata, L. F., Málaga-Chuquitaype, C. ve Elghazouli, A. Y. (2018). A three-dimensional plasticity-damage constitutive model for timber under cyclic

loads. *Computers & Structures*, 195, 47-63.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.09.010>

Smith, I. ve Snow, M. A. (2008). Timber: An ancient construction material with a bright future. *The Forestry Chronicle*, 84(4), 504-510. <https://pubs.cif-ifc.org/doi/abs/10.5558/tfc84504-4>

Staub-French, S., Pilon, A., Poirier, E., Fallahi, A., Kasbar, M., Calderon, F. ve Froese, T. (2021). Construction process innovation on brock commons tallwood house. *Construction Innovation*. <https://doi.org/10.1108/CI-11-2019-0117>

Stepinac, M., Cabrero, J. M., Ranasinghe, K. ve Kleiber, M. (2018). Proposal for reorganization of the connections chapter of Eurocode 5. *Engineering structures*, 170, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.058>

Sutherland, J. (2010). Revival of structural timber in Britain after 1945. *Construction History*, 25, 101-113. <https://www.jstor.org/stable/41613962>

Şakar, G. ve Çelik, H. K. (2021). Solutions of Solid Timber and Glulam Bridge Example with Different Approaches in Turkey. *European Journal of Technique (EJT)*, 11(1), 13-18. <https://doi.org/10.36222/ejt.712893>

Tabarsa, T. (1999). *Compression perpendicular-to-grain behaviour of wood* [Doktora Tezi]. University of New Brunswick.

Tlustochowicz, G., Serrano, E. ve Steiger, R. (2011). State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. *Materials and structures*, 44(5), 997-1020. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9682-9>

Togay, A., Anil, Ö., Karagöz İşleyen, Ü., Ediz, I. ve Durucan, C. (2017). Finite-element analyses of light timber-framed walls with and without openings [Bildiri

Özeti]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 170(8), 555-569.

Tsai, S. W. ve Wu, E. M. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of composite materials*, 5(1), 58-80.
<https://doi.org/10.1177%2F002199837100500106>

Türk Standartları Enstitüsü. (1979). *Ahşap yapıların hesap ve yapım kuralları (TS 647)*.
<https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073087057052114079112107055056111086>

Valipour, H., Khorsandnia, N., Crews, K. ve Foster, S. (2014). A simple strategy for constitutive modelling of timber. *Construction and Building Materials*, 53, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.100>

Vallée, T., Tannert, T., ve Hehl, S. (2011). Experimental and numerical investigations on full-scale adhesively bonded timber trusses. *Materials and structures*, 44(10), 1745-1758. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9735-8>

Vessby, J., Källsner, B., Olsson, A., ve Girhammar, U. A. (2014). Evaluation of softening behaviour of timber light-frame walls subjected to in-plane forces using simple FE models. *Engineering structures*, 81, 464-479.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.032>

Vessby, J., Källsner, B., ve Girhammar, U. A. (2010). Influence of contact stress between sheets on strength and stiffness of timber frame shear walls [Bildiri Özeti]. In *WCTE 2010*.

- Wacker, J. P., ve Groenier, J. (2010). Comparative analysis of design codes for timber bridges in Canada, the United States, and Europe. *Transportation research record*, 2200(1), 163-168. <https://doi.org/10.3141/2200-19>
- Wald, F., Mareš, J., Sokol, Z. ve Drdácý, M. (2000). *Component method for historical timber joints*. In *The Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures* (pp. 417-424). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0950-8_36
- Wanninger, F. ve Frangi, A. (2016). Experimental and analytical analysis of a post-tensioned timber frame under horizontal loads. *Engineering Structures*, 113, 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.03.042>
- Wei, Y., Tang, S., Ji, X., Zhao, K., ve Li, G. (2020). Stress-strain behavior and model of bamboo scrimber under cyclic axial compression. *Engineering Structures*, 209, 110279. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110279>
- Weibull, W. (1939). A Statistical theory of the Strength of materials. *Proc. Royal Academy Engrg Science*, 15.
- Winter, W., Tavoussi, K., Pixner, T. ve Parada, F. R. (2012, July). Timber-steel-hybrid beams for multi-storey buildings [Bildiri Özeti]. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering* (Vol. 2012).
- Wipf, T. J., Klaiber, F. W. ve Funke, R. W. (1990). Longitudinal glued laminated timber bridge modeling. *Journal of Structural Engineering*, 116(4), 1121-1134. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1990\)116:4\(1121\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1990)116:4(1121))
- Wu, Y. F. ve Wei, Y. (2015). General stress-strain model for steel-and FRP-confined concrete. *Journal of composites for construction*, 19(4), 04014069. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000511](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000511)

Xu, B. H., Bouchaïr, A. ve Racher, P. (2012). Analytical study and finite element modelling of timber connections with glued-in rods in bending. *Construction and Building Materials*, 34, 337-345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.087>

Xu, B. H., Bouchaïr, A. ve Racher, P. (2014). Appropriate wood constitutive law for simulation of nonlinear behavior of timber joints. *J. Mater. Civ. Eng*, 26(6), 1-7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000905](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000905)

Xu, B. H., Taazount, M., Bouchaïr, A. ve Racher, P. (2009). Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints. *Construction and Building Materials*, 23(9), 3043-3052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.006>

Yang, H., Liu, W. ve Ren, X. (2016). A component method for moment-resistant glulam beam-column connections with glued-in steel rods. *Engineering Structures*, 115, 42-54. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.02.024>

Yüncüler, M. (2019). *TS 647 ve Avrupa ahşap yapı standardı Eurocode 5 in örneklerle karşılaştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi.

Zakic, B. (2003). *Plasticity in Wood*. Serbian Academy of Sciences and Arts

Zhu, H., Faghani, P. ve Tannert, T. (2017). Experimental investigations on timber joints with single glued-in FRP rods. *Construction and Building Materials*, 140, 167-172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.091>