

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP PANEL YAPI SİSTEMLERİ VE
BİRLEŞİM ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Aygül CEYLAN

DOKTORA TEZİ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

Şubat, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP PANEL YAPI SİSTEMLERİ VE
BİRLEŞİM ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ**

Aygül CEYLAN tarafından hazırlanan tez çalışması 22.02.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ercan YÜKSEL, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Bilge DORAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nusret AS, Üye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Danışmanım Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN sorumluluğunda, tarafımca hazırlanan “Çapraz Lamine Ahşap Panel Yapı Sistemleri ve Birleşim Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı çalışmamda; veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde, her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Aygül CEYLAN



Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nn FDK-2018-3367 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



Aileme

TEŞEKKÜR

Türkiye’de, çapraz lamine ahşap panel yapı sistemleri ile ilgili kuramsal ve deneysel bilgi eksikliğinin giderilmesine katkı sağlaması amacıyla; panellerin birleşim özelliklerinin deney çalışmalarıyla incelendiği doktora tezi ile ülkemizde, depreme dayanıklı ahşap çok katlı yapı tasarımı ve uygulamalarında CLT panel kullanımının benimsenmesine öncülük edilebileceği varsayılmaktadır.

Tez çalışması sürecimde; bilgi birikimi, deneyimi, hiç bitmeyen bilimsel araştırma merakı ve heyecanı ile her zaman bana yön veren ve destek olan danışmanım Sayın Prof. Dr. Zehra Canan GİRĞİN’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez izleme jürilerinde çalışmamı değerli katkılarıyla yönlendiren Sayın Prof. Dr. Gülay ZORER GEDİK’e ve deney çalışmalarının tamamlanması ve sonuçların değerlendirilmesinde değerli katkılar ve öneriler sağlayan Sayın Prof. Dr. Ercan YÜKSEL’e çok teşekkür ederim. Bilimsel katkıları ve değerli görüşlerini benimle paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Nusret AS, Sayın Prof. Dr. Bilge DORAN, Sayın Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN ve Sayın Prof. Dr. Konuralp GİRĞİN’e teşekkürlerimi sunarım.

Çivi/vida çekme direnci deney çalışmalarım kapsamında, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi Ahşap Mekaniği Laboratuvarı’nı kullanmamı sağlayan Sayın Prof. Dr. Türker DÜNDAR ile laboratuvar asistanlarına teşekkür ederim. CLT panel birleşimi deney çalışmalarımı gerçekleştirdiğim İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı sorumlusu Sayın Öğr. Gör. Hakan SARUHAN ve çalışma ekibinden Y. Müh. Fatih ŞAHİN, Mahmut ŞAMLİ ile deney alanının çalışılabilir ve düzenli olmasını sağlayan Turgay ÖZGÜNAY’a, deney çalışmaları sürecimde bilgi paylaşımının yanı sıra deney yöntemini öğrenmem ve uygulamam konusunda yardımlarını esirgemeyen Sayın Y. Müh. Ergün BİNBİR’e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması sürecimde, CLT panel elemanlarının sağlanması, metal birleşimlerin oluşturulması ve deney örneklerinin oluşturulmasına kadar birçok konuda bana anlayış gösterip, destek sağlayan Sayın Mehmet Akif ASMAZ (Asmaz Ahşap

Yapı)'a; fabrika üretimlerini yoğun emek ve çaba ile gerçekleştiren Sezgin KEÇECİ başta olmak üzere tüm üretim ve uygulama ekibine teşekkür ederim. Ayrıca deney düzeneğimin üretilmesi ve çalışma alanına taşınması konusunda emeği geçen SETUP Yapı'ya teşekkür ederim.

Doktora sürecinde, destekleriyle yanımda olan Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Bölümü, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı değerli öğretim üyeleri ile çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Merve TUNCER ve Arş. Gör. Şerife ÖZATA'ya, her zaman desteğiyle yanımda olan arkadaşım Y. Müh. Mimar Beyza KAPUCU'ya teşekkür ederim.

Yaşamımın her anında yanımda olan, sevgi ve anlayışları ile her konuda beni cesaretlendiren ve destekleyen ailemin değerli üyeleri; annem Ayşe CEYLAN, babam Mehmet CEYLAN ve kardeşim Ayça CEYLAN'a sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Aygül CEYLAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	x
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xii
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
1 GİRİŞ	21
1.1 Literatür Özeti	21
1.2 Tezin Amacı	25
1.3 Hipotez	25
2 ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANEL VE ÖZELLİKLERİ	27
2.1 Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel.....	27
2.2 CLT Panelin Özellikleri	31
2.2.1 Fiziksel Özellikler	31
2.2.2 Mekanik Özellikler	36
2.2.3 Yangın Dayanımı.....	41
2.2.4 Isısal Özellikler.....	44
2.2.5 Akustik Özellikler	46
2.2.6 Görsel Özellikler.....	49
2.2.7 Mimari Tasarımda Esneklik	50
2.2.8 Yapım Süresi ve Yapım Maliyeti	51
2.2.9 Sürdürülebilir Yapım Sistemi.....	53

2.3	Dünyada CLT Panel Üretimi ve Uygulamaları	56
2.3.1	Avrupa Ülkeleri	58
2.3.2	A.B.D. ve Kanada.....	58
2.3.3	Japonya.....	60
2.3.4	Avustralya ve Yeni Zelanda	60
2.3.5	Diğer Ülkeler	60
3	CLT PANEL YAPI ELEMANLARI VE YAPI KABUĞU	61
3.1	CLT Panel Yapı Elemanları.....	61
3.1.1	Duvar Elemanı.....	62
3.1.2	Döşeme Elemanı.....	67
3.2	CLT Panel ile Yapı Kabuğu.....	72
3.2.1	Yapı Kabuğu Katmanları ve Yerleşimleri.....	74
3.2.2	İç ve Dış Ortam Koruma Yöntemleri	78
3.2.3	Yangına Dayanıklı Yapı Kabuğu.....	82
4	CLT PANEL YAPI BİRLEŞİMLERİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ	84
4.1	CLT Panel Yapı Birleşimleri.....	84
4.1.1	Birleşim Ürünleri.....	84
4.1.2	Birleşim Türleri	90
4.2	CLT Panel Yapı Birleşimlerinin Deneysel İncelenmesi	94
4.2.1	Çivi/Vidanın Çekme Direnci Deneyleri	95
4.2.2	CLT Panel Birleşimi Deneyleri	98
4.2.3	CLT Panel Yapı Deneyleri	104
5	CLT PANEL BİRLEŞİMLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ	110
5.1	CLT Panel ile Çivi/Vida Çekme Direnci Deneyleri	110
5.1.1	Deney Örneklerinin Hazırlanması.....	111

5.1.2	Deney Düzeneği ve Veri Toplama.....	115
5.1.3	Veri Analizi ve Değerlendirmeler.....	1155
5.1.4	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	123
5.2	CLT Panel Duvar-Döşeme Birleşimleri Deneyleri.....	124
5.2.1	Deney Örneklerinin Hazırlanması.....	125
5.2.2	Deney Düzeneği ve Veri Toplama.....	129
5.2.3	Veri Analizi ve Değerlendirmeler.....	130
5.2.4	Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	144
6	SONUÇ VE ÖNERİLER	146
	KAYNAKÇA	150
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	164

SİMGE LİSTESİ

Mw	Deprem Moment Büyüklüğü
dB	Desibel
GLc	Glulam Dayanım Sınıfı
λ	Isı İletim Katsayısı
RSI	Isısal Direnç
LSL	Laminated Strand Lumber
LVL	Laminated Veneer Lumber
MUF	Melamin Üre Formaldehit
CH ₄	Metan
OSL	Oriented Strand Lumber
PSL	Parallel Strand Lumber
μ	Perm (Su Buharı Geçirgenliği Birimi)
PUR	Poliüretan Tutkal
STS	Self-Tapping Screw (Ahşap Vidası)
Rc	Sertlik
U	Toplam Isı Geçirme Katsayısı
VOCs	Volatile Organic Compounds (Uçucu Organik Bileşikler)
R	Yangın Dayanımı
R, q	Yapı Davranışı Katsayısı
C	Yapısal Ahşap Dayanım Sınıfı

KISALTMA LİSTESİ

ANSI	American National Standards Institute
APA	American Plywood Association
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society of Testing and Materials
BIM	Building Information Modeling
CE	Conformité Européene (Avrupa Uygunluk Etiketi)
CNC	Computer Numerical Control
CSA	Canadian Standards Association
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	European Norm
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	European Organisation for Technical Assessment
FPAC	Forest Products Association of Canada
FSC	Forest Stewardship Council
IBC	International Building Code
IECC	International Energy Conservation Code
ISO	International Organization for Standardization
NBCC	The National Board for Certified Counselors
NIED	National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification
TRADA	Timber Research and Development Association
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	CLT panelin tabakalarının bir araya gelişi ve son görünümü [2,6]	28
Şekil 2.2	CLT paneli oluşturan ahşap tabakaların lif yönleri [16]	30
Şekil 2.3	CLT panellerin vinç ile uygulama yerine taşınması [2,26]	31
Şekil 2.4	CLT panellerin değişen tabaka özellikleri [29].....	32
Şekil 2.5	Londra’da çok katlı CLT panel yapı örnekleri [26,34]	33
Şekil 2.6	CLT duvar ve döşeme panellerinin yerleştirilmesi [3]	38
Şekil 2.7	CLT döşeme panellerinin yerleştirilmesi [2]	38
Şekil 2.8	Ahşapta sıcaklık değişimi ve kömürleşme oluşumu [59]	41
Şekil 2.9	CLT panellerin yangın öncesi ve sonrasındaki durumu [62,63]	42
Şekil 2.10	CLT panel yapı sisteminde yangın sürecindeki gözlemler [64]	43
Şekil 2.11	CLT panel yapı sisteminde yangının yayılması [63].....	44
Şekil 2.12	CLT paneli ile oluşturulan döşeme sistemi katmanları [2]	48
Şekil 2.13	CLT panel yapı sisteminde sesin iletim yolları ve yalıtımı [12]	49
Şekil 2.14	İç ortamdaki CLT duvar ve döşeme elemanlarının görünümü [26].	50
Şekil 2.15	CLT yüzeylerin parametrik programlama ile üretim süreci [82]	51
Şekil 2.16	CLT panellerin helikopter ve teleferik ile taşınması [2,85]	52
Şekil 2.17	Çok katlı ahşap yapım sistemlerinde yapısal ahşap kullanımı [87] .	52
Şekil 2.18	2017-2020 yılları arasında ahşap yüksek yapı uygulamaları [89]...	53
Şekil 2.19	Yapım sistemlerinde enerji tüketimlerinin karşılaştırılması [25].....	54
Şekil 2.20	Yapı ürünlerinin üretimleri sürecindeki sera gazı yayılımları [93] ..	55
Şekil 2.21	Türkiye’de CLT panel yapı sistemi uygulamalarına örnekler [100] .	57
Şekil 3.1	CLT paneller ile platform çerçeve sistemin oluşturulması [1,106]	61
Şekil 3.2	CLT duvar panellerinin yerleşimi ve yalıtım uygulaması [106]	62
Şekil 3.3	Tek parça ve parçalı CLT duvar panelleri [2,106]	63
Şekil 3.4	CLT duvar panelleri uygulamaları [107,108]	63
Şekil 3.5	CLT paneller ile eğimli duvar oluşturma [109]	63
Şekil 3.6	CLT duvar panelleri ile pencere uygulaması [12,28]	64
Şekil 3.7	CLT paneller ile üretilen asansör boşlukları [2,109]	64
Şekil 3.8	CLT paneller ile tesisat boşluklarının oluşturulması [12,109]	65
Şekil 3.9	Tesisat kanallarının oluşturulması [12]	65

Şekil 3.10	Betonarme yapıya farklı taşıyıcı sistemler ile kat eklenmesi [112]..66
Şekil 3.11	CLT panel yapı sistemi ile balkon oluşturulması [1]67
Şekil 3.12	CLT döşeme panellerinde boşluk oluşturma [12]68
Şekil 3.13	CLT döşeme elemanları ile ıslak hacim ve balkon detayları [12]68
Şekil 3.14	CLT panel duvar-betonarme döşeme birleşiminde ısı yalıtımı [12].69
Şekil 3.15	CLT panel ile oluşturulan nervürlü döşeme sistemi [113]69
Şekil 3.16	Nervürlü döşeme sistemi ile açılı çivi/vida uygulaması [113].....70
Şekil 3.17	CLT panel ile merdiven uygulamaları [115,116]70
Şekil 3.18	CLT paneller ile eğrisel çatı uygulaması [109].....71
Şekil 3.19	Katlanmış plak CLT paneller ile konsollu çatı uygulaması [117]71
Şekil 3.20	Glulam ve CLT panelin birlikte kullanıldığı kaset sistem [118].....71
Şekil 3.21	CLT panelin ısı iletkenliğinin ölçümü [16]73
Şekil 3.22	CLT panel kalınlığı ile U katsayısı arasındaki ilişki [12].....74
Şekil 3.23	Yapı kabuğunda ısı yalıtımı uygulamaları [123]76
Şekil 3.24	CLT panellerin iç ve dıştan yalıtımının karşılaştırması [16]76
Şekil 3.25	CLT panel yapı sisteminde yalıtım uygulamaları [12].....76
Şekil 3.26	CLT panel ile yapı kabuğu oluşturma [2,12]77
Şekil 3.27	CLT panel birleşimlerinde ısı yalıtımı bandı uygulamaları [12]77
Şekil 3.28	CLT panel birleşimlerinde ısı yalıtımı uygulamaları [126]78
Şekil 3.29	CLT panellerin dış ortam koşullarından korunması [2]79
Şekil 3.30	CLT yapım sisteminde koruyucu örtü uygulamaları [2,108,129]80
Şekil 3.31	CLT paneller ile yangın duvarı uygulaması [106]82
Şekil 3.32	Birleşimlerde yangın durdurucu yalıtım uygulamaları [106]83
Şekil 3.33	CLT panel yapı sistemlerinin yangın deneyleri [134-136]83
Şekil 4.1	CLT panel birleşimlerinde kullanılan çelik köşebentler85
Şekil 4.2	CLT panel birleşimlerinde kullanılan güçlendirilmiş L köşebentler ...85
Şekil 4.3	Metal birleşim levhaları ile uygulanan CLT panel birleşimleri.....86
Şekil 4.4	CLT panel birleşimlerinde farklı açıda çivi/vida uygulaması [137] ...86
Şekil 4.5	İki parçalı metal birleşim ürünü [137,138]87
Şekil 4.6	CLT panel birleşimlerinde kullanılan çivi/vida örnekleri.....87
Şekil 4.7	Birleşimlerde kullanılan perçinler ve şekil değiştirmesi [140,141]88
Şekil 4.8	CLT panel birleşimlerinde bulon ve kavela uygulamaları [12,142] ...89

Şekil 4.9 Çelik X köşebent ile CLT panel birleşimleri [143]	89
Şekil 4.10 CLT birleşimlerinde tutkallı çelik çubuk kullanımı [144]	89
Şekil 4.11 CLT duvar paneli birleşimleri [2,12]	91
Şekil 4.12 CLT döşeme ve çatı panellerinin birleşimleri [12]	91
Şekil 4.13 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri [1,12,26]	92
Şekil 4.14 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri [2,12,26]	92
Şekil 4.15 CLT panel duvar-betonarme döşeme birleşimleri [2,12].....	93
Şekil 4.16 Glulam kiriş-CLT panel birleşimleri [12]	93
Şekil 4.17 Ardgermeli CLT panel birleşimleri ve enerji sönümleyiciler [145] ..	94
Şekil 4.18 Çelik yapı sistemi ile CLT panel birleşimleri [12]	94
Şekil 4.19 Yapı birleşimlerinin yük-yerdeğiştirme ve yük-şekil değiştirme zarf eğrileri [146,147]	95
Şekil 4.20 Panel birleşimlerinde yük doğrultusuna göre yük aktarımı [55]	96
Şekil 4.21 CLT panel birleşiminde çivi/vida/kavela yerleşimi [152]	97
Şekil 4.22 CLT birleşimlerin çekme ve kayma dayanımı deneyleri [155]	97
Şekil 4.23 Enerji sönümleyebilen ve sönümleyemeyen panel birleşimleri [55]	98
Şekil 4.24 Vida ile CLT döşeme paneli birleşimleri [156]	99
Şekil 4.25 Düzlem içi yatay yükler altında panelin hareketleri [157]	99
Şekil 4.26 Duvar paneli deney örnekleri ile birleşim detayı [158].....	100
Şekil 4.27 Panelin yük-yerdeğiştirme ilişkisi ile birleşim detayları [160,161]	100
Şekil 4.28 Duvar paneli birleşimleri ile deney düzeneğinin görünümü [139]	102
Şekil 4.29 Güçlendirilmiş L köşebent birleşimlerinde akma hasarı [53]	102
Şekil 4.30 Panel birleşimi deneylerinde gerçekleşen hasar türleri [167]	103
Şekil 4.31 CLT duvar-temel birleşimi deneylerinde hasar ölçeği [167,168] ..	104
Şekil 4.32 SOFIE Project kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar [181-183] ..	107
Şekil 4.33 CLT panel birleşimlerinde hasar türleri [184]	107
Şekil 4.34 SERIES kapsamında gerçekleştirilen deney çalışmaları [138].....	108
Şekil 4.35 CLT panel yapı ve birleşimlerindeki hasar oluşumları [166].....	109
Şekil 5.1 Çekme direnci deney düzeneği ile deney örneğinin görünümü	115
Şekil 5.2 CLT ile çivi/vida çekme direnci P-Δ karşılaştırmaları	117
Şekil 5.3 Çivi/Vida çekme direnci ve çekme enerjisi değerleri	119
Şekil 5.4 Çivi/Vida çekme direnci ve çekme enerjisi karşılaştırmaları.....	120
Şekil 5.5 Halkalı çivilerin çekme direnci ve çekme enerjisi karşılaştırması.....	122

Şekil 5.6 Çivi/Vida çekme direnci deneylerinde hasar türleri	122
Şekil 5.7 CLT tabakalarının lif yoğunluğu ve yapısına bağlı P-Δ ilişkisi.....	124
Şekil 5.8 CLT panel duvar-döşeme birleşimi deney düzeneği ve detayları	129
Şekil 5.9 MTS-RN-A-01 deneyi sonucunda birleşimin görünümü	131
Şekil 5.10 MTS-RN-A-02 deneyi sonucunda birleşimin görünümü	133
Şekil 5.11 MTS-RN-A-03 birleşiminin deney sürecindeki hareketi.....	136
Şekil 5.12 MTS-RN-A-03 deneyi sonucunda birleşimin görünümü [200]	137
Şekil 5.13 MTS-WS-A-04 deneyi sonucunda birleşimin görünümü.....	141
Şekil 5.15 MTS-RN-2A-05 deneyi sonucunda birleşimlerin görünümü.....	142
Şekil 5.16 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri deneylerinin P-δ grafikleri ..	142



TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	EN 1995-1-1 taşıyıcı sistem elemanlarının kullanım sınıfları [35] ...34
Tablo 2.2	CLT panelin bağıl nem düzeyine göre su buharı geçirgenlikleri [2].36
Tablo 2.3	CLT panellerin mekanik özellikleri [42]37
Tablo 2.4	Ahşap birleşimleri için önerilen dayanım fazlalığı katsayısı [55]40
Tablo 2.5	CLT panel ve farklı yapı ürünlerinin ısı iletkenliği değerleri [68]45
Tablo 2.6	CLT panelin yalın durumdaki ses geçiş kaybı değerleri [68].....47
Tablo 2.7	Avrupa’da CLT üretimi yapan kurumlar ve üretim hacimleri58
Tablo 3.1	CLT panel ile yapı kabuğunun ısısal direnç özellikleri [1]73
Tablo 3.2	Isı yalıtım ürünleri ve özellikleri [38,124,125]75
Tablo 4.1	CLT panel yapılar için önerilen q katsayısı değerleri [55]106
Tablo 5.1	Lif yönleri ve yapısına göre deney örneklerinin sınıflandırılması ...111
Tablo 5.2	Deneylerde kullanılan çiviler ile ahşap vidasının özellikleri.....113
Tablo 5.3	Çiviler ve vidanın mekanik özellikleri ile mikro yapı görünümleri.114
Tablo 5.4	CLT ile çivi/vida çekme direnci deney örnekleri1144
Tablo 5.5	Literatürde yer alan çekme direnci hesaplama yöntemleri.....121
Tablo 5.6	Deney sonuçları ile hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması121
Tablo 5.7	Deney örneklerinde kullanılan CLT panelin özellikleri1266
Tablo 5.8	CLT panel duvar-döşeme metal birleşimlerinin özellikleri1277
Tablo 5.9	CLT panel duvar-döşeme birleşimleri örnekleri ve özellikleri1288
Tablo 5.10	Deney düzeneğindeki yerdeğiştirme ve şekil değiştirme ölçerler.130
Tablo 5.11	MTS-RN-A-01 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri131
Tablo 5.12	MTS-RN-A-01 hazırlık deneyi P-δ grafiği ve gözlemleri.....132
Tablo 5.13	MTS-RN-A-02 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri133
Tablo 5.14	MTS-RN-A-02 deneyi P-δ grafiği ve gözlemleri134
Tablo 5.15	MTS-RN-A-03 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri137
Tablo 5.16	MTS-RN-A-03 deneyi P-δ grafiği ve gözlemleri138
Tablo 5.17	MTS-WS-A-04 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri.....139
Tablo 5.18	MTS-WS-A-04 deneyi P-δ grafiği ve gözlemleri140
Tablo 5.19	MTS-RN-2A-05 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri142
Tablo 5.20	MTS-RN-2A-05 deneyi P-δ grafiği ve gözlemleri143

Çapraz Lamine Ahşap Panel Yapı Sistemleri ve Birleşim Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi

Aygül CEYLAN

Mimarlık Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

Sismik açıdan aktif bir bölgede yer alan Türkiye’de; sünek, hafif, sürdürülebilir, insan sağlığı ve konfor gereksinimlerine uygun yapı sistemlerine gereksinim vardır. Bu özelliklere uygun, yatay/düşey yüklere karşı rijitlik sağlayan, yenilikçi çapraz lamine ahşap (CLT) paneller; 1990’larda Avrupa’da geliştirilmiş, 2010 yılı ile üretimi yaygınlaşmıştır. Deprem etkin bölgelerde kullanımı üzerine yoğunlaşan araştırmalarda; özellikle, enerji yutabilen metal birleşimlerin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Ülkemizde ise, CLT panellerin döşeme/duvar uygulamaları henüz, az sayıda az katlı yapı uygulaması ile sınırlıdır. Bu çalışmada, kapsamlı bir literatür araştırmasının ardından, Türkiye’de üretilen metal birleşim parçaları kullanılarak; yapıya etkiyen kuvvetler altında enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Tez; Türkiye’de, CLT panel duvar-döşeme birleşim davranışını inceleyen ilk deneysel araştırmaları içermektedir.

Araştırma kapsamında öncelikle; birleşimi sağlayan vida ve çivilerin çekme direnci (çivi/vida tutma dayanımı/sıyrılma/direnci), 50mmx50mmx100mm’lik 200 adet CLT örnek ile incelenmiştir. Bu kapsamda, el ve tabanca ile uygulanan

halkalı/burgulu çiviler ve ahşap vidasının çekme deneyleri gerçekleştirilmiş, çekme dirençleri literatürdeki bağıntılar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, uluslararası literatür açısından özgünlük taşıyan; fosfat ve reçine kaplamalı halkalı çivilerin sıyrılma davranışı, çakılma biçimi ve CLT örneğin lif yapısının çekme direncine etkisi ile çekme enerjileri irdelenmiştir. Yük/enerji-yerdeğiştirme, birim uzunluğa ilişkin çekme dayanımı-çekme enerjisi bağıntıları üretilmiştir. En yüksek çekme direnci; yerli üretim fosfat kaplamalı çivilerde elde edilmiş olup, CLT duvar-döşeme birleşim deneylerinde bu çiviler kullanılmıştır.

Birleşim deneyleri, küçük ölçekli ve düşük maliyetli olup, birleşim davranışının belirlenmesinde öncü niteliktedir. Çivi/vida deneyleri sonrası; gerçek boyutlu beş CLT duvar-döşeme birleşimi örneği, monotonik deprem yüklerini temsilen çekme kuvveti altında incelenmiştir. Literatürün değerlendirilmesi ile metal birleşimlerin seçiminde, ülkemizde uygulanabiliyor olması esas alınmıştır. Deneylerin sonucunda; kullanılan yerli üretim güçlendirilmiş köşebent ve levha gibi metal parçalar ile enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin elde edilebileceği görülmüştür.

Tezin Birinci Bölümünde; amaç, önem, kapsam ve hipotez aktarılmıştır. İkinci Bölümde, CLT panel üretimi ve özellikleri; Üçüncü Bölümde, yapı sistemi elemanları ve yapı kabuğu özellikleri incelenmiştir. Dördüncü Bölümde, yapı sistemi birleşimleri ile yapı davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Beşinci Bölüm, deneysel çalışmalara ayrılmıştır. Altıncı Bölümde, sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmanın; ülkemizde CLT panel yapı sistemi üzerine kuramsal ve deneysel bilgi eksikliğinin giderilmesine katkı sağlayarak, depreme dayanıklı ahşap çok katlı yapı tasarımı ve uygulamalarına öncülük edebileceği varsayılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çapraz lamine ahşap, CLT panel, metal birleşim, deprem, süneklik.

Cross Laminated Timber (CLT) Panel Structural Systems and Experimental Investigation of Connections

Aygül CEYLAN

Department of Architecture

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Prof. Dr. Zehra Canan GİRGIN

Turkey is located in a seismically active region; there is a need for ductile, lightweight, sustainable structural systems that comply with human health and comfort necessities. Innovative cross laminated timber (CLT) panels meet these features as well as rigidity requirements against horizontal/vertical loads. It was developed in Europe in the 1990s and became widespread after 2010. Intensive research studies are carried out about its utilization in earthquake-prone areas; especially to develop metal components for energy dissipating connections. In Turkey, wall/floor applications of CLT panels are still limited with a small number of low-rise building applications. In this study; following a comprehensive literature search, metal components produced in Turkey were focused to enhance seismic performance and producing energy dissipating connections for CLT panel combinations under lateral forces. This Thesis includes the first experiments examining the behavior of wall-to-floor connections with CLT panels.

First, the withdrawal strength tests of the four types of nails and wood screw (self tapping screw) were executed on 200 CLT specimens of 50mmx50mmx100mm. Withdrawal tests of nails with annular/helical shanks and wood screw applied via manual/gun drive were executed, and withdrawal strengths were compared with the relationships in the literature. Herein, the withdrawal strength of phosphate and resin threated annular ring nails, the grain density of CLT, the effect of drive style, and the withdrawal energy were investigated the first time in the international literature. Load/energy-displacement, withdrawal strength-withdrawal energy relationships per length were produced. The highest withdrawal strengths were attained in domestic phosphate-coated annular ring nails, and these nails were used in CLT wall-to-floor connections tests.

After nail/screw withdrawal tests; pioneering small-scale low-cost connection experiments were organized through five full-size CLT wall-to-floor tests. Metal combinations were based on its application in Turkey. It was concluded CLT panel connections can dissipate energy with domestic angle brackets and plates.

In the First Chapter of this Thesis; aim, importance, scope, and hypothesis are introduced. In the Second Chapter, CLT panel production and properties; in the Third Chapter, members of structural system and properties of building envelope are examined. In the Fourth Chapter, structural system combinations and their effects on building behavior are investigated. The Fifth Chapter is devoted to experimental studies. In Chapter Six, concluding remarks are presented.

This Thesis, by contributing to eliminate the lack of theoretical and experimental knowledge on the CLT panel structural systems in Turkey, may lead to the design and applications of earthquake-resistant wooden multi-storey building.

Keywords: Cross laminated timber, CLT panel, metal connection, earthquake, ductility.

1.1 Literatür Özeti

Tutkallı tabakalı (lamine) ahşap; değişik ölçülerdeki bağımsız ahşap tabakaların, denetimli endüstriyel koşullarda, özel bağlayıcılar ile birleştirilmesiyle oluşturulan ön üretimli yapı ürünleridir. Çapraz lamine ahşap (*Cross Laminated Timber, CLT*) panel, yapısal ahşap grubunun en yenilikçi üyesidir. Üretim süreci ve tutkal teknolojilerindeki yeniliklere bağlı olarak geliştirilen, hafif ancak rijit CLT panellerin kullanıldığı çok katlı ahşap yapılar, betonarme ve çelik yapı sistemleri ile yarışabilir niteliktedir. Söz konusu sistemler ile karşılaştırıldığında, üretiminden kullanım ömrünün sonuna kadar olan süreçte; sürdürülebilir olması, daha az atık oluşturması ve yapısında karbon saklayabilme özelliği ile insan sağlığı ve çevre üzerinde olumlu etkiler yaratan panellerin, aynı zamanda ısısal ve akustik özellikleri ile yangın dayanımları da üst düzeydedir. Yapım maliyeti ve süresi ile ilgili araştırmalar; CLT panel yapı sisteminin, ahşap çok katlı yapılar için yenilikçi bir seçenek olduğunu göstermektedir.

CLT paneller; 1990'lı yıllarda Orta Avrupa'da, ahşap çok katlı yapı üretiminde, özellikle yatay yükler etkisinde taşıyıcı duvar gereksinimini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. 2000'lerin ikinci yarısıyla birlikte İtalya, Yeni Zelanda, Japonya ve Kanada gibi deprem riskinin yüksek olduğu yerlerde kullanılmaya başlanmış olup zamanla kullanımı yaygınlaşmaya devam etmektedir. Kültürümüzde ahşap yapı geleneği olmasına karşın, bu yapı sistemlerinin teknolojik gelişmeler ve yenilikçi yöntemler ile geliştirilememesi sonucunda yeterli bilgi ve deneyim düzeyine ulaşamaması; tutkallı tabakalı yapısal ahşabın kullanım olanaklarının kısıtlı olmasına ve bu süreçte yeterince benimsenmemesine neden olmaktadır. Bu kapsamda Türkiye'de, özel kurumların az katlı yapı uygulamaları dışında CLT

panel yapı sisteminin kullanımı oldukça azdır. Dünyada hızla büyüyen çağdaş ahşap yapım sistemleri kapsamında CLT panel üretimi ve kullanımı;

- Sürdürülebilir orman yönetimi sistemleri ile orman varlığının artırılması ve tutkallı tabakalı ahşap üretiminde hammadde kaynaklarının geliştirilmesi çalışmalarının yetersiz kalması,
- Diğer yapım sistemleri ile karşılaştırıldığında; tutkallı tabakalı ahşabın neme ve biyolojik etkenlere karşı duyarlı olması nedeniyle dayanımının her durumda olumsuz etkilendiği yanlış bilgisi ile yapım, bakım ve onarım maliyetlerinin çok yüksek olduğu önyargısı,
- CLT panel üretiminin gerçekleştirileceği fabrikanın kurulması aşamasında ilk yatırım maliyetlerinin, ülkemiz koşullarında fazla olduğu algısı ile bu konuda yatırımcılara yeterli desteğin sağlanamaması,
- Uluslararası yönetmeliklere uygun nitelikte CLT panel üretiminin gerçekleştirilememesi ve elemanların, yurtdışından getirilmesi ile yapım maliyetlerinin artması,
- Çağdaş ahşap yapı tasarımı ve uygulamaları konusunda, dünyadaki yapım standartları (EN, ANSI vb.) ile karşılaştırıldığında; ülkemizde, CLT panel yapı sistemi uygulamalarında kılavuz olabilecek ulusal bir yönetmeliğin olmaması ve bu kapsamda yürürlükte olan ahşap yapı yönetmeliğinin yetersiz kalması,
- CLT panel yapı sisteminin fiziksel, mekanik ve teknik özellikleri konusunda bilgi ve uygulama deneyimi eksikliği ile tasarımcılar ve uygulayıcıların, CLT panelleri yapı elemanı olarak kullanımları konusunda çekince yaşamaları,
- Depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında, rijit CLT paneller ile sağlanan enerji sönmüleyebilen yapı birleşimlerini inceleyen bilimsel araştırmaları, kapsamlı ve sistematik bir biçimde irdeleyen Türkçe bir kaynağın olmayışı,
- Dünyada gerçekleştirilen bilimsel araştırmalar ile karşılaştırıldığında, Türkiye’de CLT panel yapım sistemi ile ilgili bilimsel çalışmaların çok az sayıda olması ve yapılan araştırmaların, sadece derleme çalışması olması ile deneysel karşılık bulamaması,

nedenleri ile Türkiye koşullarında gelişme gösterememektedir. Buna karşın ülkemizde, panel yapı sisteminin üretim olanaklarını inceleyen araştırmaların son zamanlarda hız kazanması da umut vericidir. Bu kapsamda; ülkemizde yetişen yerli ağaç türlerinden panel üretimi ile CLT birleşimlerinin yapıya etkiyen yükler altında davranışının deneysel incelendiği araştırmalar yapılmaktadır.

Ahşap taşıyıcı sistemlerin deprem davranışını, yapı elemanlarının birleşimleri belirlemektedir. CLT panel yapı sistemi ile yatay yüklere karşı dayanımı yüksek, enerji yutabilen yapı birleşimlerinin elde edilebilmesi amacıyla; devlet desteği ile üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel kurumların iş birliği sonucunda dünyada birçok bilimsel araştırma projesi yürütülmektedir. Bu kapsamda ilk çalışmalar, 2005 yılında Kanada'da bir araştırma enstitüsü olan FPInnovations'ın çok disiplinli bir araştırma programı ile başlamıştır. Araştırmaların sonuçları ve Avrupa'daki CLT panel uygulamalarından elde edilen bilgiler derlenerek; 2010 yılında Kanada'da [1] ve 2013'te A.B.D.'de [2] olmak üzere kılavuz niteliğinde, iki el kitabı yayımlanmıştır. 2012 yılında A.B.D.'de, panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile bu özelliklerin belirlenmesini sağlayan deney yöntemleri ve uygulamaları içeren APA PRG 320 Standardı [3] yürürlüğe girmiştir. 2015 yılında CLT yapım sisteminin IBC kapsamına girmesi ile günümüzde, birçok kurum ETA onayı alarak panel üretimi yapmaya devam etse de üretim yapılan ülke ile üretim koşullarına bağlı olarak panelin özellikleri değişebilmektedir. Bu nedenle CLT panellerin üretimi, fiziksel ve teknik özellikleri ile panel yapı sisteminin uygulanabilmesine ilişkin ortak ve kapsamlı bir yönetmeliğin olmadığı, standartlarda tanımlanan değerlendirme yöntemlerinin ise yatay kuvvetler altında yapı davranışının belirlenmesinde yetersiz kaldığı bilinmektedir. 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [4] kapsamında; tutkallı perde ve tutkallı döşeme panel elemanları, taşıyıcı sistem modellemelerinde süneklik düzeyi sınırlı sistemler olarak ele alınmıştır. Ayrıca CLT panel yapı sistemi ile depreme dayanıklı yapı tasarımında; panellerin mekanik özellikleri, enerji sönmeme yeteneği ve yükleme altında zamana bağlı dayanımın azalması konularında Eurocode 8[5]'in yetersiz kaldığı görülmektedir. CLT paneller ve birleşimlerinin yapıya etkiyen yükler altında davranışının belirlenebilmesi

amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ile sayısal analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçların değerlendirilerek, yapı kılavuzları ve yönetmeliklerin yeniden ele alınması ve güncellenmesi gerekmektedir.

Büyük bölümü deprem riski altında olan Türkiye’de, deprem ivmesinin yapının kütlesi ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde; daha hafif, sünek ve dayanıklı taşıyıcı sistemlere gereksinim olduğu açıktır. Bu anlamda, yatay yükler altında rijitlik gereksinimini karşılayan CLT panel taşıyıcı duvarların, ahşap taşıyıcı sistemler için önemli bir yenilik olduğu görülmektedir. Türkiye’de özel kurumların az katlı yapı uygulamaları dışında, günümüzde CLT yapıım sisteminin kullanımı kısıtlı olsa da incelenmesi gereken öncelikli alanın; özellikle Türkiye’de üretilen metal birleşimler kullanılarak, CLT panel duvar-döşeme birleşiminin, monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti altında etkinliğinin deneysel olarak araştırılması konusu olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle, tez çalışmasının CLT panel birleşimlerinin geliştirilmesi sürecinde;

- İlk aşamada; 50mmx50mmx100mm’lik 200 adet CLT örneğine, el/tabanca ile çakılan, ahşap vidası, burgulu ve dört tür halkalı çivinin çekme direnci deneylerinin yapılması ve çekme direnci/çekme enerjisi en yüksek olanın seçilmesi,
- İkinci aşamada; gerçek boyutlu CLT panellerin duvar-döşeme birleşimlerinin, monotonik deprem yüklerinin moment etkisinden oluşan çekme kuvveti altında davranışının incelenerek, birleşim elemanları ve tekniğinin deney sonuçlarına göre geliştirilmesi sağlanmıştır.

Tez alışması, Türkiye’de CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışını inceleyen ilk deneysel araştırma olma özelliğini taşımaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Deprem ivmesinin yapının kütlesi ile doğru orantılı olduğu düşünülduğünde; yenilikçi, hafif ancak rijitliği olan ahşap taşıyıcı sistemlere gereksinim olduğu açıktır. CLT panel yapı sistemleri ve birleşim özelliklerinin deneysel çalışmalar ile incelendiği doktora tezinin amacı; dünyada, özellikle depreme dayanıklı çok katlı ahşap yapı uygulamalarında yaygın kullanılan bu sistem ile ilgili bilgi eksikliğinin giderilerek, tanınırlığının artırılması ve Türkiye’de uygulanabilirliği koşullarının tartışılmasının sağlanmasıdır. Bu kapsamda tez çalışmasında, Türkiye’de üretilen metal birleşimler kullanılarak, enerji yutabilen CLT duvar-döşeme birleşimlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma ile CLT panel yapı sistemi konusunda yapılacak gelecek araştırmalara öncülük edilerek; Türkiye’de yerli ağaç türleri ile CLT panel üretimi ve deprem dayanıklı çok katlı ahşap yapı uygulamalarında kullanımı konusunda kaynak oluşturulmasının önemli olduğu düşünülmektedir. Sürdürülebilir orman yönetimi uygulamaları ile CLT panel elemanların elde edilmesi; Türkiye’nin orman varlığının iyileştirilmesi ve geliştirilmesini sağlayarak ülke ekonomisi üzerinde olumlu katkılar yaratacaktır.

1.3 Hipotez

Çağdaş ahşap yapıların, başlıca özelliklerini (dayanım ve dayanıklılık, hafiflik, sürdürülebilirlik vb.) sağlamasının yanı sıra CLT panel yapı sisteminin, betonarme ve çelik yapı sistemleri ile karşılaştırıldığında; ısısal, akustik ve yangın dayanımı özellikleri de üst düzeydedir. Bu anlamda, ahşap yapı tasarımında kullanılmasının dünyada, yeni ve etkin bir bakış açısı yarattığının gözlemlenmesine karşın Türkiye’de özel kurumların az katlı yapı uygulamaları dışında, CLT panellerin kullanımının kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, kapsamlı bir literatür araştırmasının ardından, Türkiye’de üretilen metal birleşim parçaları kullanılarak; monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti altında enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin geliştirilmesine odaklanılmıştır. Deneylerin sonucunda; kullanılan yerli üretim güçlendirilmiş köşebent ve levha gibi metal parçalar ile enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin elde edilebileceği görülmüştür. Ahşap

yüksek yapıların taşıyıcı sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilen ve CLT paneller ile kompozit yapı elemanı oluşturan ürünler, çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.

Tez çalışması; Türkiye’de, CLT panel duvar-döşeme birleşim davranışını inceleyen ilk deneysel araştırmaları içermektedir. Bu çalışma ile büyük bölümü deprem riski altında olan ülkemizde, CLT panel yapı sistemi ile ilgili kuramsal ve deneysel bilgi eksikliğinin giderilmesine katkı sağlanarak; Türkiye’de depreme dayanıklı ahşap çok katlı yapı tasarımı ve uygulamalarında CLT panellerin kullanımının benimsenmesine öncülük edilebileceği varsayılmaktadır.

Türkiye’de, depreme dayanıklı çağdaş ahşap yapı üretiminin gerçekleştirilebilmesi için CLT panel yapı sistemlerinin etkinliğini inceleyen bilimsel çalışmaların artırılması, devlet, üniversiteler, araştırma enstitüleri ve özel girişimlerin iş birlikleri ile projelerin geliştirilmesinin sağlanması ve çok disiplinli araştırmalardan elde edilecek sonuçların değerlendirilerek uygulama aşamasına geçilmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.

ÇAPRAZ LAMİNE AHŞAP (CLT) PANEL VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Panel

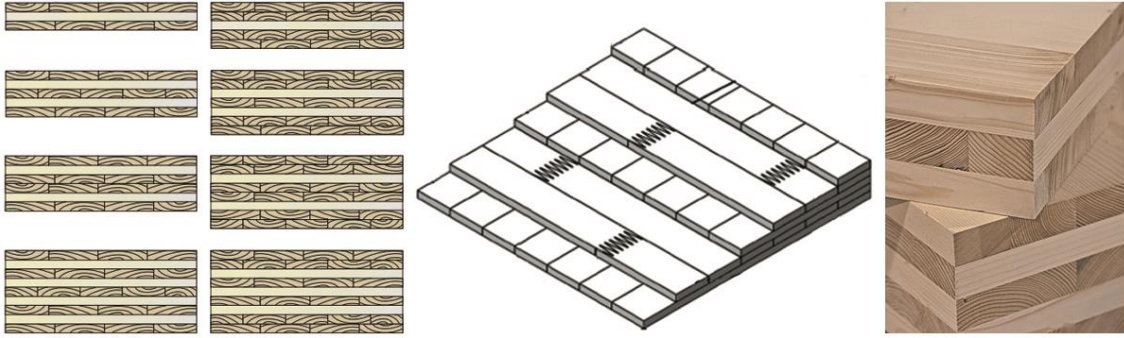
Tutkallı tabakalı (lamine) ahşap; değişik ölçülerdeki bağımsız ahşap tabakaların, denetimli endüstriyel koşullarda, tutkal türünde özel bağlayıcılar ile birleştirilmesiyle oluşturulan, ön üretimli yapı ürünleridir. Yapısal lamine ahşap ürün grubu; tutkallı tabakalı ahşap (*glulam*), tabakalı kaplama kereste (*LVL*), paralel şerit kereste (*PSL*), tabakalı şerit kereste (*LSL*) ve çapraz lamine ahşap (*CLT*)'tan oluşmaktadır.

Yapısal lamine ahşap grubunun en yenilikçi üyelerinden biri olan çapraz lamine ahşap (*Cross Laminated Timber, CLT*)¹ paneller; 1990'lı yıllarda Orta Avrupa'da, ahşap çok katlı yapı üretiminde, özellikle yatay yükler etkisinde taşıyıcı duvar gereksinimini karşılamak amacıyla geliştirilmiştir. 2000'lerin ikinci yarısıyla birlikte İtalya, Yeni Zelanda, Japonya ve Kanada gibi deprem riskinin yüksek olduğu yerlerde kullanılmaya başlanmış olup, zamanla kullanımı yaygınlaşmaya devam etmektedir.

CLT panel; üç, beş, yedi ya da taşıyıcı sistem gereksinimlerine bağlı olarak daha fazla tabakanın, lif yönleri birbirine karşıt olacak biçimde (çoğunlukla 90°), basınç kuvveti altında, birbirlerine geniş yüzeylerinden (özel durumlarda dar yüzeylerinden de) tutkal kullanılarak yapıştırılması ile elde edilir. Özel durumlarda ardışık tabakalar, çift tabaka oluşturacak biçimde aynı yönde de yerleştirilebilmektedir (Şekil 2.1). Basınç kuvveti altında bir araya getirilen ahşap tabakalarda, genleşme ve büzülme davranışları göz ardı edilebilir düzeydedir.

¹ CLT ulusal literatürde, çapraz lamine kereste (ÇLK) ya da tabakalanmış kereste (ÇTK) olarak adlandırılırken; uluslararası literatürde masif ahşap panel (*massive wooden/mass timber/cross-lam/X-lam panel*), CLSTP (*Cross Laminated Solid Timber Panel*) ya da BSP (*Brettsperholz*) adlarıyla bilinmektedir.

Ahşap tabakaların, birbirine karşıt yönde yerleştirilmesi ile boyutsal kararlılığı olan panel elemanlar elde edilmektedir.



Şekil 2.1 CLT panelin tabakalarının bir araya gelişi ve son görünümü [2, 6]

CLT panelin üretimi süreci sırasıyla;

- Kerestelerin seçimi, biçilmesi, kurutulması, görsel ve mekanik niteliklerine göre sınıflandırılması,
- Kerestelerin genişlik ve boyu yönünde, uç uca kurtağzı birleşim ile birbirine eklenmesi ve tabakaların oluşturulması,
- Ahşap tabakaların tüm yüzeylerinde, düzeltme (planyalama) işlemlerinin yapılması,
- Tabakaların, lif yönleri birbirine 90° açılı biçimde bir araya getirilmesi ve yüzeylere tutkal uygulanması ile basınç kuvveti (çoğunlukla 0,6-1 MPa²) altında birleştirilmeleri,
- Üretilen panelin, CNC teknolojisi ile gereksinim duyulan uygun boyutlara getirilmesi, pencere, kapı, tesisat vb. boşluklarının açılması ve ek yerlerinde küçük onarımlarının yapılması,
- Panelin niteliğinin, üretim standartlarına uygunluğunun denetlenmesi ve sonuç ürününün uygun koşullarda saklanarak uygulama alanına taşınması

aşamalarını kapsamaktadır. Üretilen paneller, standartlara [8, 9] uygun biçimde sınıflandırılır. CLT paneller yapıda, taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan yapı elemanları olarak kullanılmaktadır. Taşıyıcı panellerin dayanım sınıfı EN 338[10]'e göre

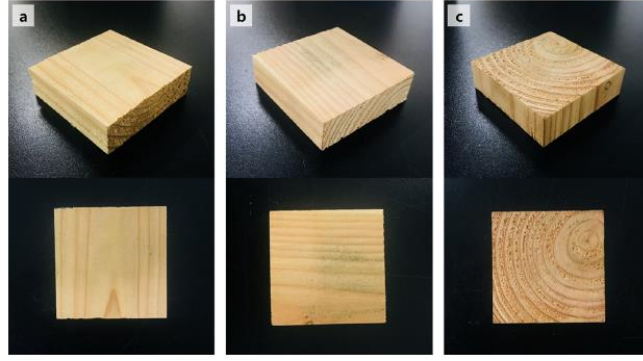
² CLT üretiminde kullanılan basınç kuvveti; hidrolik sistemde $\leq 1,5$ MPa, pnömatik sistemde $\leq 1,0$ MPa ve vakum sistemde $\leq 0,1$ MPa olarak uygulanmaktadır [7].

C24'tür ve ETA 0138 [11] ile karşılaştırıldığında bu panellerde, en fazla %10 oranında C16 dayanımlı ahşap kullanımına izin verilmektedir [12].

CLT panel üretiminde, çoğunlukla ladin, çam ve göknar gibi iğne yapraklı ağaçlar (yumuşak odunlar) seçilirken; yeterli dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin sağlanması koşuluyla değişik özellikte ahşaplar da kullanılabilir. Yumuşak odunların tür çeşitliliği, sert odunlara göre daha azdır [2]. Bununla birlikte kullanılan ağacın özellikleri, yetiştiği çevreye göre değişebilmektedir. Avusturya ve Almanya'da ladin, çam ve kavak ile karşılaştırıldığında daha çok kullanılır. Kanada'da ladin-çam-göknar; Avustralya ve Yeni Zelanda'da ise çam (*pinus radiata*) kullanımı yaygındır [13]. İtalya'da gerçekleştirilen bir araştırma projesi kapsamında, taşıyıcı olmayan CLT panellerin üretiminde, yerel ormanlardan elde edilen kestane ve kavak odunları kullanılmıştır [14].

CLT panel üretiminde kullanılacak keresteler, %12±3 nem değerini sağlayacak biçimde fırınlarda kurutulur. Bu işlem; ahşabın mantar, böcek vb. zararlılara karşı dayanımı ve dayanıklılığını korumasını sağlamaktadır. Budak, çatlak ve lif kıvrıklığı gibi istenmeyen özellikleri giderilen ve kalınlıkları 16-40 mm olan ahşap parçalar, kurtağzı birleşim ile bir araya getirilir. Ahşap yapı elemanlarının üretiminde EN 387[15]'de tanımlandığı gibi; 15-20 mm uzunluğundaki kurtağzı birleşim, geometrisi ile ahşap tabakalarının yapışma yüzeylerinin artırılmasını sağlamaktadır [3, 13].

Paneli oluşturan tabakaların lif yönleri; liflere dik (enine ya da teğet) ya da liflere paralel yönde olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Şekil 2.2 (a)'da enine, (b)'de teğet ve (c)'de liflere paralel yönde ahşap lifleri görülmektedir. Yapılan araştırmalarda; yıllık yaş halkalarının yönlerine dikkat edilerek üretim yapılmasının, yüksek boyutsal kararlılıkta yapı elemanlarının elde edilmesinde etkili olduğunu göstermektedir [2].



Şekil 2.2 CLT paneli oluşturan ahşap tabakaların lif yönleri [16]

CLT panelin tabakalarını bir arada tutan tutkalın yapışma yeteneğinin³ yüksek olması; panelin dayanımının artmasında etkilidir ve bu durum, eşit yük dağılımının karşılanmasını sağlar. Ahşap taşıyıcı yapı elemanlarının üretiminde kullanılan tutkallar; üre, melamin, resorsinol ya da fenol içeren ve formaldehitle kürleşen iki bileşenli özelliktedir [17]. CLT panel üretiminde; fenol-resorsinol formaldehit (PRF), emülsiyon polimer izosiyanat (EPI), poliüretan (PUR) ve melamin üre formaldehit (MUF) içerikli tutkallar kullanılmaktadır [2]. Son yıllarda yapılan çalışmalar, içeriğinde formaldehit ve solvent bulundurmaması ile uçucu organik bileşik yaymayan poliüretan tutkalların yaygın kullanıldığını göstermektedir [13, 18]. Avrupa’da, tutkalların fiziksel ve mekanik dayanımları ile uygulama aşamasındaki önemli bilgileri içeren birçok standart⁴ yayımlanmıştır. A.B.D.’de, tutkal uygulamalarında özel durumlar dışında; ANSI 405 [23] ve CSA O112[24]’ye uyulmalıdır. Bununla birlikte ahşap yapı elemanlarının üretiminde kullanılan tutkalın, maliyetinin yüksek olduğu belirtilmektedir [25].

Fabrikada üretilen CLT panellerin, şantiye alanına taşınması kamyon, tır vb. araçlar ile gerçekleştirilir. Panellerin, şantiye alanına getirildiği kamyonun alınarak doğrudan uygulama yerine vinç ile taşınması (Şekil 2.3), yapım süresi ve maliyeti açısından en uygun yöntemdir [12]. Vinç ile taşınması sürecinde, panelin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkilemeyecek, yönetmelik ve

³ Tutkalların yapıştırma yeteneği; adhezyon ve kohezyon tanımları ile ilişkilidir. Adhezyon, tutkalın yabancı maddeye yapışması; kohezyon ise tutkalı oluşturan moleküllerinin arasındaki çekim kuvveti ile birbirine yapışmasıdır.

⁴ Ahşap yapı elemanlarının üretiminde kullanılacak tutkallar; ETA standartlarının yanı sıra EN 301 [17], EN 15425 [19], EN 16351 [20], DIN 68141 [21] ve DIN 1052[22]’ye uygun olmalıdır.

standartlara uygun tasarlanmış taşıma parçaları kullanılmaktadır. Bu özel parçalar, taşınacak elemanın duvar, çatı ve döşeme elemanı olmasına ya da panelin yüzey niteliğine göre değişebilmektedir.



Şekil 2.3 CLT panellerin vinç ile uygulama yerine taşınması [2, 26]

2.2 CLT Panelin Özellikleri

CLT panellerin üretimi, fiziksel ve mekanik özellikleri ile uygulanmasına ilişkin ortak ve kapsamlı bir yönetmelik bulunmamaktadır. Birçok kurum ETA onayı olarak, CE işaretli panel üretimi yapabilmektedir. ETA onayı süreci; ürünün tüm özelliklerini ve deneysel çalışmalarının sonuçlarını içeren teknik raporların düzenlenmesini kapsar [13]; ancak üretim yapılan ülke ile üretici kurumun koşullarına bağlı olarak panel özellikleri değişebilmektedir. 2012 yılında A.B.D.'de ANSI, CLT panelin üretimi, niteliği ve teknik özellikleri ile ilgili APA PRG 320 Standardı'nı uygulamaya başlamıştır [3]. Bununla birlikte Avrupa'da, ahşap yapı elemanları için geçerli olan yönetmelik EN 13986'dir [27].

2.2.1 Fiziksel Özellikler

CLT panellerin fiziksel özellikleri; panel boyutları, yoğunluk, özgül ağırlık, nem oranı ve su buharı geçirgenliği başlıkları altında incelenecektir.

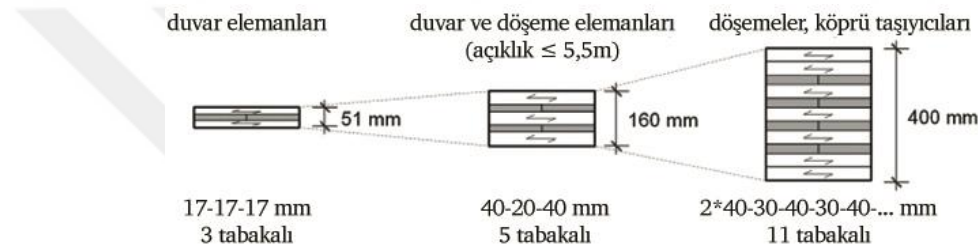
2.2.1.1 Panel Boyutları

Özel üretimler dışında CLT panelin genişliği 120-300 cm, uzunluğu ise 500-1650 cm aralığındadır⁵. Panel boyutlarının belirlenmesinde; üretim bandının uzunluğu, elemanların yapım alanına taşınma yöntemi, uygulama alanının fiziksel koşulları

⁵ En fazla 1800 cm uzunluğunda CLT panel üretimi yapılabilmektedir.

gibi birçok etken belirleyicidir. Paneller çoğunlukla tır, kamyon, kamyonet vb. ulaşım araçları ile taşınabilecek boyutta üretilmektedir. CLT panelin kalınlığı, 5-30 cm aralığındadır ancak tasarım ve taşıyıcı sistem gereksinimlerine göre kalınlığı 50,8 cm olan paneller de üretilebilmektedir [1, 3].

CLT panelin boyutlarının ve tabaka sayılarının belirlenmesinde; taşıyıcı özellikte olup olmaması, taşıyıcı duvar ya da döşeme elemanı olarak kullanıldığı durumda geçilen açıklık ile yapı davranışını belirleyen panel birleşimlerinin tasarımı önemli etkenlerdir. Kullanım amaçlarına göre değişen tabaka özellikleri Şekil 2.4'te görülmektedir. CLT panellerde burkulma oluşmaması için uygun narinlik oranı çoğunlukla; kat döşemesi için 20-30; çatı panelleri için 30-40 aralığındadır [28].



Şekil 2.4 CLT panellerin değişen tabaka özellikleri [29]

2.2.1.2 Yoğunluk ve Özgül Ağırlık

Yoğunluk; belirli bir nem düzeyindeki ahşabın ağırlığının, hacmine bölünmesiyle bulunur ve kg/m^3 ya da g/cm^3 birimleriyle gösterilir. Ağacın yapısındaki değişiklikler nedeniyle yoğunluk, sürekli aynı değerde kalmaz; ağacın nem oranının artması ile kütlesi ve hacmi de artarak, değişkenlik gösterir [30]. CLT panelin yoğunluğunu; paneli oluşturan ana ağacın yoğunluğu belirler ve bu değer çoğunlukla $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ olup [14, 27], özel durumlarda 590 kg/m^3 'e kadar çıkabilmektedir [31].

Özgül ağırlık; bir maddenin yoğunluğunun, suyun yoğunluğuna oranıdır ve nem oranı ile doğrudan ilişkilidir. Ahşapta, nem oranı %0 kabul edilerek; fırında kurutulma işlemi sonrasındaki ağırlığının, aynı hacimdeki suyun ağırlığına oranı ile hesaplanır [32]. İğne yapraklı ağaç türlerinde özgül ağırlık, 0,3-0,6 aralığındadır. CLT panel üretiminde kullanılan ağaçların özgül ağırlığı ise en az

0,35 olmalıdır [2, 3]. Ahşap ürünlerin, yoğunluk ve özgül ağırlık değerlerinin belirlenmesinde ASTM D2395[33]'ten yararlanılmaktadır.

Betonarme bir yapı, eşdeğer CLT panel yapı sistemi ile üretilen bir yapı ile karşılaştırıldığında, dört kat daha ağırdır [13]. Bu özelliği ile CLT paneller, betonarme ve çeliğe göre oldukça hafif bir yapı sistemine olanak verir. Panellerin kullanılması ile yapıya etkiyen yüklerin ve yapı üzerindeki deprem yükünün azaltılması sağlanabilmektedir ve bu durum depreme karşı dayanıklı yapı tasarımında önemli bir yaklaşımı oluşturmaktadır. Panellerin hafif olması, yapı temeline iletilen taşıyıcı sistemin ölü yükünü azaltmaktadır. Derin kazık temel uygulamalarının yapılmasının riskli olduğu tarihi yerleşim bölgelerinde, kanalizasyon ya da yeraltı ulaşım sistemi üzerinde yapılması tasarlanan yeni yapılar için temel sistemi, olabildiğince hafif olmalıdır. Londra'da tarihi kanal üzerinde yer alan, çok katlı konut projelerinin tasarım ve uygulama projeleri aşamasında, CLT panel yapı sistemi kullanımının uygulanabilecek en uygun sistem olduğu görülmüştür [26]. Şekil 2.5'te bu koşullarda tasarlanan, 2012 ve 2017 yıllarında tamamlanan Whitmore Road (a) ve Bridport House (b) görülmektedir.



Şekil 2.5 Londra'da çok katlı CLT panel yapı örnekleri [26, 34]

2.2.1.3 Nem Oranı

Ahşabın nem oranı; iç yapısındaki su ağırlığının, fırınlarda gerçekleştirilen kurutma işlemi sonrasındaki ağırlığına oranıdır ve % ile gösterilir. İç yapısındaki su ağırlığı; ahşabın ıslak ve kuru durumdaki ağırlıkları arasındaki farka eşittir [31]. İğne yapraklı ağaçlarda türü, büyüme mevsimi, öz odun ya da diri odun özelliklerine göre değişmekle birlikte, nem oranı %30-200 aralığındadır. Ahşap

liflerin, doyma noktasına kuramsal olarak ulaşabilmesi için fırınlarda %28-30 nem düzeyi sağlanmalıdır [2].

Ahşap; bulunduğu ortamın bağıl nem oranı ve sıcaklığı ile kurutulma yöntemine bağlı olarak nem kazanır ya da yitirir. Nem oranı azaldığında büzülen ahşap, nem oranı artışı ile genişir. Ahşabın enine yönde genişleme ve büzülmesi, boyuna yönünde gerçekleşen boyutsal değişikliklerden daha fazladır. Nem oranı, %30'u aşmayan koşulda ladin ağacında; teğet yönde %7-8; enine yönde %4 ve liflere paralel yönde %0,1-0,2 büzülme görülmektedir. İğne yapraklı ağaç türlerinde, enine kesitteki nem oranının her %1'lik değişimi için, ortalama büzülme katsayısının %0,2-0,25 arasında olması önerilmektedir. CLT panelin üretiminde, ahşap tabakaların birbirine karşıt yönde yerleştirilmesi; boyutsal değişikliklerin oluşmasını azaltarak, boyutsal kararlılığı olan yapı elemanlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Avrupa'daki çok katlı CLT yapı uygulamaları; panelin düşey yöndeki büzülme değerinin, her kat için yaklaşık 3 mm olduğunu göstermektedir [2]. Taşıyıcı CLT panel üretiminde; birim uzunluğunun 6,4 mm, genişliğinin 3,2 mm ve kalınlığının 1,6 mm ya da %2'si kadar boyutsal değişikliğe izin verilmektedir [3].

LVL, PSL, LSL vb. ahşap kompozitlerin üretiminde %8±3 olan nem oranı, CLT paneli oluşturan ahşap tabakalarda ise %12±3 olmalıdır [3]. Avrupa'daki uygulamalar, Eurocode 5 [35] kapsamında değerlendirilirken; Kanada Standardı'nda paneller ile ilgili özel bir tanım yapılmamış olup [36], ahşap kompozitlerin ASTM D5456[37]'ya uygun olması önerilmektedir.

Tablo 2.1 EN 1995-1-1 taşıyıcı sistem elemanlarının kullanım sınıfları [35]

Kullanım sınıfı	Ortam koşulları		Ahşap nem oranı (İğne yapraklı ağaçlar)	Yapı türü
	Sıcaklık	Bağıl nem oranı*		
1	20°C	≤ %65	≤ %12	Konut, okul ve yönetim yapılarının iç ortamları
2	20°C	≤ %85	≤ %20	Ticari yapıların (depo, binicilik, endüstriyel alanlar vb.) iç ortamları ve dış ortam koşullarından doğrudan etkilenmeyen (30° eğimli) üstü kapalı açık yapılar
3	-	> %85	> %20	Ahşap yapı sisteminin korunduğu dış ortam yapıları

*Bağıl nem oranı, bir yılda en fazla birkaç hafta, belirtilen değerleri aşabilir.

Nem oranının yüksek ya da düşük olduğu koşullar ve CLT panelin su ile uzun dönem etkileşimi, fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumsuz değişmesine neden olur. Nem oranının değişmesiyle panelde oluşacak çatlak ve biçimsel bozulmalar panelin boyutsal kararlılığını ve rijitliğini azaltır [2]. Bu nedenle yapı sisteminin uygulanacağı bölgenin yağış, sıcaklık, nem ve güneş ışınımı gibi iklimsel özellikleri ile iç ve dış çevre koşullarının bilinmesi çok önemlidir. Yapı içi ve çevresinde nem kaynağı oluşturabilecek etmenler belirlenerek, tasarım ve uygulama aşamasında uygun detaylar geliştirilmelidir. Nem dengesinin değişmesiyle panel yüzeyinde oluşan çatlak ve bozulmalarının önlenmesi amacıyla iç ortamdaki bağıl nem oranının %40-60 olması önerilmektedir [12].

2.2.1.4 Su Buharı Geçirgenliği

Bir elemanın iki yüzü arasında, sıcaklıklar ile bağıl nem düzeyinin farklı olması, her iki yüzeyde birbirinden farklı su buharı basınçlarını oluşturur [38]. Bu durumda, yüksek basınçtan düşük basınca doğru buhar geçişi oluşmaktadır. Birim zamanda, birim alandan geçen su buharı, su buharı geçirgenliğini gösterir. Düşük buhar geçirgenliği olan ürünlerin kullanımı, yapı kabuğunda nem birikmesini önlerken; yüksek buhar geçirgenliği olan ürünler ise kabuğun kuruma yeteneğinin artmasını sağlar [2]. Yapı kabuğunu oluşturan ürünlerin; kabuk tasarımına uygun şekilde seçilmesi, katmanların doğru sıralanması ve bir araya getirilmesi çok önemlidir. Kullanılan ürünlerin, su buharı geçişine gösterdikleri direnç farklıdır. Bu nedenle, yapı kabuğu katmanları arasında ilerleyen su buharının, gaz durumdan sıvı duruma geçmesi ile yoğuşma⁶ gerçekleşir.

Su buharı basıncı birimi ISO Standartları'nda, *Pa (pascal)* olarak tanımlanmakta ve su buharı geçirgenliği katsayısı μ (*perm⁷*) ile gösterilmektedir. CLT paneller, su buharı geçirimsiz ya da yarı geçirgen olarak sınıflandırılır. IECC'ye göre yapı kabuğu hesaplamalarında; su buharı geçirimsiz panelin, ISO 10456[40]'ya göre buhar geçirgenliği katsayısı 25-50 aralığındadır. Değişik kalınlıklardaki CLT

⁶ Yoğuşmanın değerlendirilebilmesi için ASTM E96 [39] ve EN 825[38]'ten yararlanılmaktadır.

⁷ Su buharı geçirgenliği birimi olan perm; iki yüzü arasında 1 Pa basınç farkı olan yüzeylerin birim alanından, bir saatte geçen su buharıdır.

panellerin bağıl nem düzeyine bağlı değişen su buharı geçirgenlikleri Tablo 2.2’de verilmiştir [2].

Tablo 2.2 CLT panellerin bağıl nem düzeyine göre su buharı geçirgenlikleri [2]

Bağıl nem oranı (%)	Su buharı geçirgenliği (perm, ng/(sm ² Pa))		
	100 mm CLT panel	150 mm CLT panel	200 mm CLT panel
20	0,06 (3,4)	0,04 (2,3)	0,03 (1,7)
50	0,31 (18)	0,21 (12)	0,15 (9,0)
80	1,00 (59)	0,68 (39)	0,51 (30)

Ahşapta lif yönünde gerçekleşen su buharı geçişi ve ahşabın su emiciliği, liflere dik yönüne göre daha fazladır. Ladin-çam-göknar ve göknar (Hemlock ya da Douglas) gibi Kuzey Amerika’da bulunan türlerin su emiciliği daha düşüktür [2]. Su buharı geçişi ve ahşabın su emiciliği, ISO 15148[41]’de belirtilen yöntemlere göre belirlenmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmada; 19 mm kalınlığında, sadece bir tabakası tutkallı, ladin-çam-göknar ve hemlock-göknar örnekleri ile liflere dik doğrultuda gerçekleşen su buharı geçişi incelenmiştir. Deneylerde %10 bağıl nem düzeyinde, su buharı geçişi 0,09; %90 nem oranında ise 5,7 olarak ölçülmüştür. Sonuçta; bağıl nem oranının artması ile su buharı geçirgenliğinin de arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte CLT panel üretiminde kullanılan ahşap ya da tutkal türünün, su buharı geçirgenliği üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür [2].

2.2.2 Mekanik Özellikler

CLT paneli oluşturan bağımsız tabakaların kalınlıkları, panelin mekanik özelliklerinin sağlanmasında doğrudan etkilidir. EN 338[10]’e göre; ahşap yapı elemanlarının dayanım sınıfları C16-C40 aralığındadır. CLT panel üretiminde, Eurocode 5[35]’e göre dayanım sınıfı, çoğunlukla C24 olarak seçilmektedir. Ancak üretici firmalara ve gereksinimlere göre değişmekle birlikte, panelin merkezine yakın iç tabakalarında, C18 ve C16 dayanımlı ahşaplar da kullanılabilir. Bununla birlikte; ara tabakalarda %10-30 oranında daha düşük dayanımlı ahşap kullanılması, panelin mekanik özelliklerinde olumsuz bir etki yaratmamaktadır

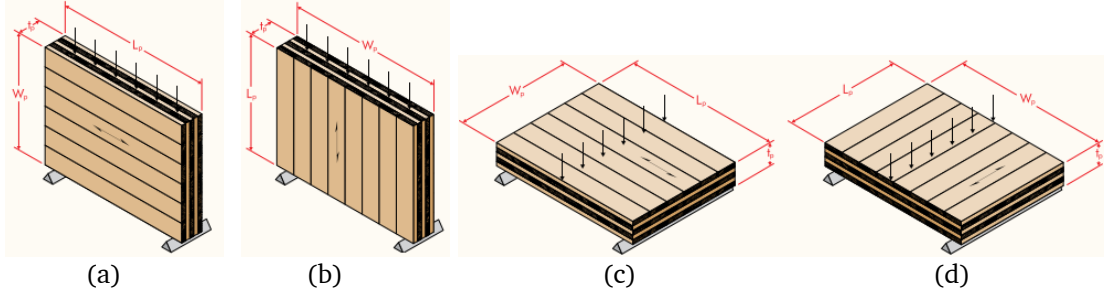
[42]. 14 mm kalınlığında, C24 ve C28 dayanım sınıflı tabakalar ile üretilen CLT panellerin (350-385 kg/m³) mekanik özellikleri Tablo 2.3'te görülmektedir.

Tablo 2.3 CLT panellerin mekanik özellikleri [42]

Mekanik özellik	Mekanik sınıflandırma gösterimi	*CLT dayanım sınıfı (MPa)	
		CL24h	CL28h
Eğilme dayanımı	$f_{m,CLT,k}$	24	28
Çekme dayanımı	$f_{t,0,CLT,net,k}$	16	18
Basınç dayanımı	$f_{t,90,CLT,k}$		0,5
	$f_{c,0,CLT,net,k}$	24	28
Kayma dayanımı (Düzlem içi ve düzlem dışı)	$f_{c,90,CLT,k}$		2,85
	$f_{v,CLT,IP,k}$		5
Elastisite modülü (Liflere paralel doğrultuda)	$f_{v,CLT,OP,k}$		3
	$E_{0,CLT,mean}$		11.000
Kayma modülü	$G_{CLT,mean}$		650
Kayma modülü (Tabakalar arasındaki)	$G_{r,CLT,mean}$		65

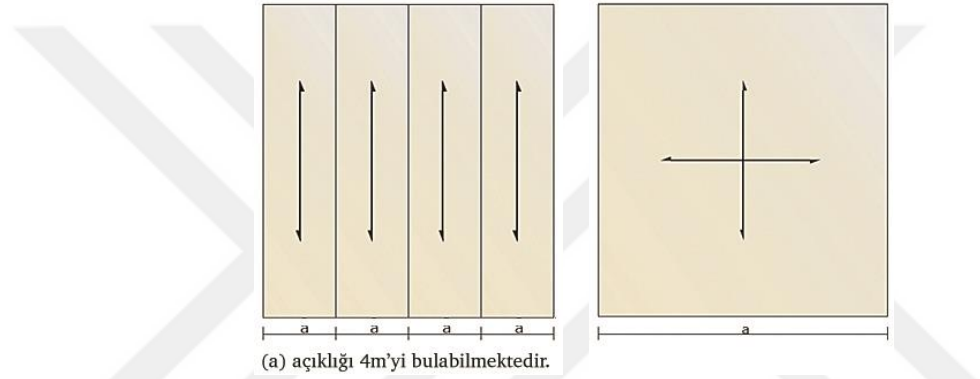
* Değişkenlik katsayısı, CL24h için %25±5; CL28h için %35±5 aralığındadır.

Panelin dayanımının belirlenmesinde, kullanılan tutkalın türü de önemlidir. CLT üretiminde, uygun oranda nanokil eklenerek yapışma özelliği artan tutkalların kullanılması ile dayanımı yüksek ahşap panel sistemler elde edilebilmektedir [43]. Bununla birlikte CLT paneli oluşturan bağımsız tabakaların çapraz yerleştirilmesi, bitişik tabakalarda olası genleşme ve büzülme etkilerini kısıtlayarak, yüksek boyutsal kararlılık ve rijitlik sağlamaktadır. Böylece; düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ile iki yönlü eğilme dayanımı olan ve rijit diyafram davranışı gösterebilen döşeme sistemi elde edilebilmektedir. Bu davranış, uygun panel birleşim detaylarının da tasarlanmasıyla yapıya etkiyen kuvvetlerin, düşey taşıyıcı elemanlara dağıtılmasını sağlar. CLT panel yapı sisteminin yük aktarma ilkeleri, betonarme panel sistem ile aynıdır. Duvar elemanı olarak kullanılacak panellerin; düşey yönde yük taşıma yeteneğini artırabilmek ve oluşacak düzlem içi eğilme kuvvetinin etkisini azaltabilmek için yerçekimi yönüne paralel, boyuna biçimde (Şekil 2.6-b) kullanılması önerilmektedir. Döşeme elemanlarının; düzlem dışı eğilme etkisine karşı dayanımının artırılması amacıyla açıklık yönüne dik doğrultuda (Şekil 2.6-d) yerleştirilmelidir [3].



Şekil 2.6 CLT duvar ve döşeme panellerinin yerleştirilmesi [3]

Düzlem içi ve düzlem dışı dayanımı yüksek olup, her iki yönde rijit davranış gösterebilen CLT panellerinin, mesnet açıklığı arttıkça rijitliği de artar [28]. Şekil 2.7'de bir ve iki yönde çalışabilen döşeme panelleri görülmektedir.



Şekil 2.7 CLT döşeme panellerinin yerleştirilmesi [2]

CLT panellerin rijitlik özellikleri birçok standart⁸ kapsamında incelenmektedir. Farklı tabaka düzenlerindeki CLT panellerin rijitlik ve dayanım özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; panele dik ve paralel doğrultudaki yükleme altında, şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Sonuçta, panele dik doğrultuda yüklemenin; tabakalar arasındaki kayma hareketi üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir [6]. CLT panelin eğilme ve kesme kuvveti altında davranışının incelendiği bir diğer çalışmada; poliüretan tutkal ile üretilen ve narinlik oranı altı olan panelin, tabakaları arasındaki kayma dayanımı 2,74 MPa ölçülmüştür. Çalışmada, narinlik oranının büyük olmadığı durumlarda; panellerin kayma dayanımının, farklı

⁸ Avrupa'da CLT panellerinin rijitlik özellikleri, EN 13986 [27], EN 13353 [44] ve EN 789[45]'a uygun olarak üretilmektedir.

açıklıklarda düzenlenmiş eğilme deneyleri ile belirlenmesinin uygun olduğu belirtilmiştir [46].

CLT paneller, gevrek özellikte yapı elemanlarıdır ve CLT yapım sisteminde süneklik, panel birleşimleri ile sağlanır. Bu kapsamda panellerin davranışı; APA PRG 320 [3], Eurocode 5 [35], ASTM D198 [47] ve ASTM D4761[48]'de tanımlanmıştır. 2018 yılında yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [4] kapsamında; tutkallı perde ve tutkallı döşeme panel elemanları, depremin etkisinde kalan yapı modellemeleri ile hesaplamalarında süneklik düzeyi sınırlı sistemler olarak ele alınmıştır. Bununla birlikte panellerin mekanik özellikleri ve enerji sönümlenme yeteneği ile yükleme altında zamana bağlı dayanımın azalması konularında Eurocode 8 [5] yetersiz kalmaktadır [13].

Panelin eğilme altında davranışını, dış tabakalarının dayanımı belirlemektedir [49]. Bununla birlikte tabakalarının birbirine karşıt yönde yerleştirilmesi nedeniyle CLT panelin, yük altında zamana bağlı şekil değiştirmesi, glulam ile karşılaştırıldığında daha fazla olabilmektedir. Graz Üniversitesi'nde yapılan çalışmalar, panellerin uzun dönem davranışlarının, tabakaların bir yönde düzenlendiği glulamdan farklı; tabakaların birbirine karşıt yönde olduğu kontrplak ile karşılaştırılabilir olduğunu göstermiştir. Bir yıl süreli, dört noktalı eğilme deneyleri sonucunda; CLT döşeme panelinin, glulama göre %30-40 daha çok sünme davranışı gösterdiği görülmüştür [50]. Panellerin yük altında, zamana bağlı davranışlarının araştırıldığı diğer bir çalışmada; ilk yükleme sonrasında, deney örnekleri üzerindeki yükler kaldırılmış ve şekildeğişiklikler, 200 gün boyunca kayıt altına alınarak gözlemlenmiştir [51].

Yapım sistemi ile yer hareketi arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak; az katlı ve çok katlı yapılarda, yatay yükler altındaki ötelenme hareketleri değişebilmektedir. Çok katlı ahşap yapılarda oluşan ötelenme, duvar panelinin birleşiminin hasar görmesi ve panel bütünlüğünün bozulması sonucunda artmaktadır. CLT panelin dayanımının araştırılması amacıyla; 6-20 kat arasında değişen 68 yapının, 1656 adet gerçek deprem yükleri altındaki davranışları incelenmiştir. Sonuçta; yüksekliği 2,85m'den az olan CLT duvar paneli birleşimlerinin, deprem enerjisinin

sönümlenmesinde etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada uzun periyotlu yapılarda, doğrusal ölçeklendirme yöntemi ile öngörülen ötelenme hesaplarının, CLT panel yapı sistemi için geçerli olmadığı belirtilerek; elastik olmayan şekil değiştirmelerin belirlenmesinde spektral analizlerin kullanılması ile ilgili araştırmaların yapılması önerilmektedir [52].

CLT panel yapı sistemi ile depreme dayanıklı yapı tasarımı araştırmalarında [13, 53]; taşıyıcı sistemin dayanımının ve enerji sönümleme yeteneğinin yüksek olduğu belirtilmektedir. Bu kapsamda, Eurocode 8’de ahşap yapı birleşimlerinin hesaplamalarında kullanılacak, enerji sönümleme tanımının yapılmamış olması önemli bir eksiklik olup, bu değer ve dayanım fazlalığı katsayısının (γ) belirlenebilmesi amacıyla araştırmalar yapılmaktadır (Tablo 2.4). C16 dayanım sınıflı CLT panellerin çelik köşebent ve birden fazla vidalı birleşimlerinde; çekme ve kayma dayanımını karşılayan değer 2,5-2,1 aralığında olup [53]; vidalı CLT birleşimlerinde ise 1,6 olarak alınabileceği önerilmektedir [54].

Tablo 2.4 Ahşap birleşimleri için önerilen dayanım fazlalığı katsayısı [55]

Birleşim türü	Birleşimin dayanımı	Dayanım fazlalığı katsayısı	
		$\gamma_{Rd} = \gamma_{SC}$	$\gamma_{Rd} = \gamma_{an} \cdot \gamma_{SC}$
Kavela ile yapısal ahşap-ahşap	Kayma	1,4	1,6
Güçlendirilmiş L köşebent ile	Kayma ve çekme	1,3	-
Çelik köşebent ile		1,2	-
Vida ile	Çekme direnci*	1,4	-
Vida ile yapısal ahşap-ahşap	Kayma	1,7	-
Çivi ile	Çekme direnci*	1,8	2,0
Çivi ile yapısal ahşap-çelik	Kayma	1,4	2,0
Kavela ile yapısal ahşap-çelik		-	1,5

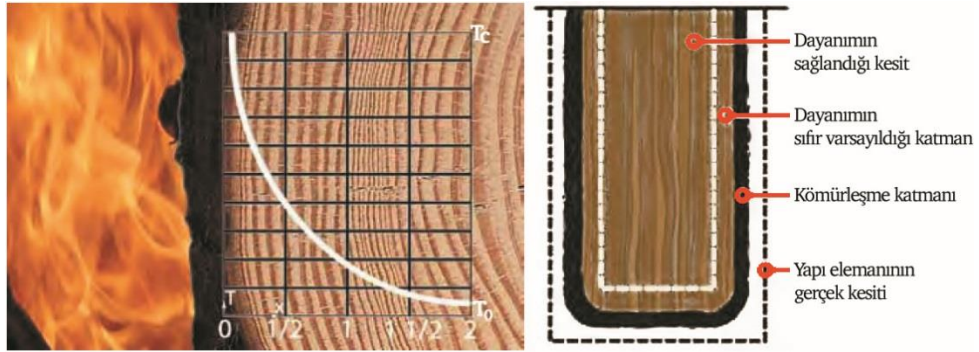
* Çivi/vidanın ahşap liflerinden çekme (*withdrawal*) direnci

CLT panel yapı sisteminin, deprem riski yüksek alanlarda kullanılmasını öneren birçok bilimsel yayın bulunmaktadır. 2000-2014 yılları arasında literatürde, panellerin deprem davranışı ile ilgili çalışmaların yanı sıra ahşap yüksek yapı uygulamalarında kullanımının incelendiği kapsamlı bir araştırma [56] gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, A.B.D.’nin özellikle deprem riskli bölgelerinde, 6-10 katlı ve daha yüksek ahşap yapılarda, CLT panellerin kullanılması önerilmektedir.

2.2.3 Yangın Dayanımı

Ahşap yapı elemanının yangın dayanımı; elemanın, kesit boyutları ve kömürleşme özelliği belirlemektedir. Yangın sırasında artan ısının etkisiyle ahşap, içindeki suyu, su buharı olarak ortama verir. Yanma süresinde, kömürleşme sıcaklığına kadar CO ve CH₄ gibi yanıcı gazların çıkışı devam eder; sonrasında dış odun kömürü katmanında CO₂ çıkışı gerçekleşir. Yangın ile etkileşen ahşap elemanın kesitinin azalması ile mekanik büyüklükleri değişir. Yanma olayı sürecinde, ahşap yüzeyinde oluşan ve alevin, ahşabın içine girmesini önleyen kömürleşen tabaka; CLT panelde boyutsal kararlılığın sürdürülebilmesini sağlar.

Yangın dayanımı hesaplamalarında; tutuşma sıcaklığı 200-300°C kabul edilse de kömürleşmenin gerçekleştiği yüzey sıcaklığının öngörülebilmesi oldukça zordur [57]. Kömürleşme tabakası hesapları; 300°C ısı eğrisi ilkesine göre yapılmaktadır. Buna göre; yangın ile etkileşen bağımsız bir tabakanın sıcaklığının 300°C'ye ulaşması ile bu tabakada kömürleşme başlar; hemen ardındaki tabakanın sıcaklığının tutuşma sıcaklığına ulaşması ile ilk tabakadaki kömürleşmenin sona erdiği varsayılmaktadır [58]. Şekil 2.8'de ahşap yapı elemanında zamana bağlı sıcaklık değişimi ile kömürleşme oluşumu görülmektedir.



Şekil 2.8 Ahşapta sıcaklık değişimi ve kömürleşme oluşumu [59]

Yoğunluğu 340-500 kg/m³ aralığında değişen, ladin (*picea abies*) kiriş ve döşeme elemanları ile yapılan yangın deneylerinde; ahşabın yoğunluğu ve kömürleşme oranı arasında anlamlı bir ilişkinin bulunamamasına [57] karşın; farklı ahşap türlerinde, yoğunluğa bağlı olarak kömürleşme hızının değiştiği görülmüştür [60]. Eurocode 5[61]'e göre; yoğunluğu 290 kg/m³'ten büyük olan glulam ve masif

ahşap için kömürleşme hızı 0,65 mm/dk'dır. İğne yapraklı ağaçlar ile üretilen CLT panelin yanma hızı; $\sim 0,7$ mm/dk [61] olup; bu değer, panelin 30 dk'lık yangın dayanımlı olduğunu göstermektedir [26].

CLT panelin yangın dayanımı (R); kalınlığı, bağımsız tabaka sayısı ve kullanılan tutkalin türüne bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kalın tabakalı panellerin, ince tabakalı olanlar ile karşılaştırıldığında yangın dayanımları daha yüksektir [58]. Çok tabakalı panellerin yangın dayanımı R90 ya da R120 düzeyindedir. Yalıtımsız, üç tabakalı bir duvar paneli R30; beş tabakalı bir döşeme paneli ise yeterli kesit kalınlığının sağlandığı durumda, R60'dan R90'a ulaşabilmektedir [12]. Panellerin boyutlandırma analizlerinde; R30 (21 mm), R60 (42 mm), R90 (63 mm) ve R120 (84 mm) için eklenecek kömürleşme tabakası alanları değerlendirilmektedir [26].

CLT panelin kömürleşen tabakası, düşmeden yerinde kalabilirse ısının, panelin içine doğru ilerlemesini engeller. Tabakalar arasındaki ısı geçişinin az olması, kömürleşmenin yavaş gerçekleşmesini ve öngörülebilir yanma oranının hesaplanabilmesini sağlar [13]. Döşeme panelleri ile karşılaştırıldığında; duvar panellerinin, kömürleşen tabakanın düşmeden, uzun süre yerinde kalabilmesi nedeniyle yangın davranışları daha iyidir. Şekil 2.9'da yangın deneylerinde; beş tabakalı bir duvar paneli ile üç tabakalı döşeme panelinde, yüzeyden ayrılmadan kalabilen kömürleşme katmanını açıkça görülmektedir.

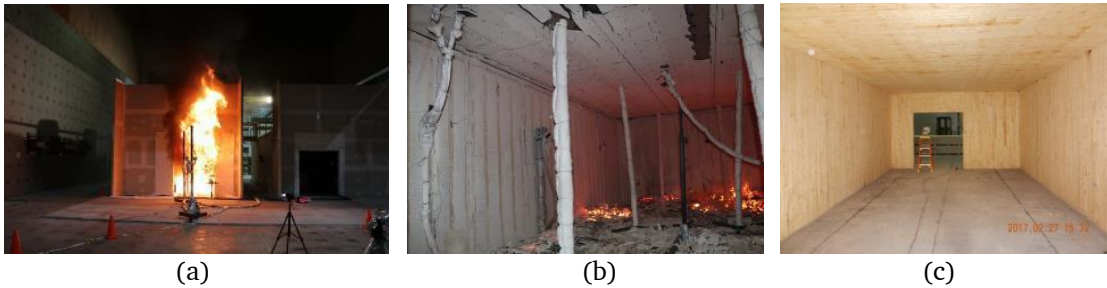


Şekil 2.9 CLT panellerin yangın öncesi ve sonrasındaki durumu [62, 63]

Panel üretiminde kullanılan tutkal türünün, yangın sırasında tabakaların düşme hızı ve durumu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bu amaçla yapılan deneylerde, PU tutkallı örneklerde, kömürleşen tabakanın panel yüzeyinden ayrılışı belirgin şekilde görülebilirken; MUF tutkallı örneklerde ise panel

yüzeyinde ayrılma gerçekleşmemiştir. Ayrıca PU tutkallı örneklerde, tabakalar arasındaki sıcaklığın kısa sürede 300°C'ye ulaştığı; MUF tutkallı olanlarda ise daha yavaş arttığı ve tutuşma sıcaklığını aşmadığı görülmüştür [58].

Panellerin büyük boyutlu ve masif olması, çerçeve yapım sistemindeki olası detay ve birleşim boşluklarını azaltmaktadır. Hafif ahşap çerçeve yapılar ile karşılaştırıldığında CLT panel yapı sisteminde, yangının yayılması riski daha azdır. Ahşap yüksek yapılarda yangın güvenliğinin sağlanması ile ilgili bir araştırma projesi kapsamında [64]; ladin-çam-gökmar ağaçlardan poliüretan tutkal ile üretilen 175 mm kalınlığında, beş tabakalı CLT paneller ile kapalı ortamlar⁹ oluşturulmuştur. Yangın deneyleri sonucunda elde edilen veriler; geniş kapsamlı teknik bir rapor olarak sunulmuştur. Sonuçta; seçilen tutkal türünün, yangın sırasında panelde oluşan kömürleşmiş katmanların, panel yüzeyinden ayrılmasını engellediği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, yangın sürecinde CLT panellerin gözlemleri Şekil 2.10'da yer almakta olup; 15.dk'da yangının büyümesi (a), 130.dk'da yangının sona ermesi (b) ile alçı panellerinin kaldırılması sonrasında duvar ve döşeme panellerinin durumu (c) görülmektedir. Panel yüzeylerinin, alçı paneller ile korunması, yangın güvenliğinin sağlanmasında etkili bir yöntemdir.

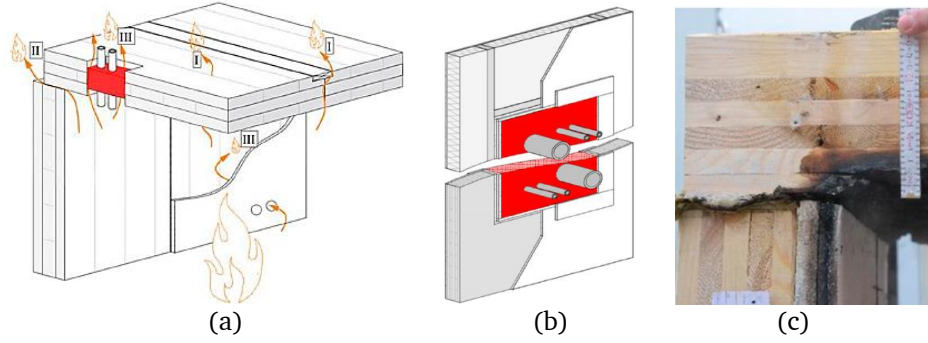


Şekil 2.10 CLT panel yapı sisteminde yangın sürecindeki gözlemler [64]

CLT panel yapı sisteminde yangının yayılımı, diğer yapı sistemleri ile benzer olup; panel birleşimleri, panel ile diğer yapı elemanlarının birleşimleri ve tesisat boşlukları nedeniyle gerçekleşmektedir. Şekil 2.11'de; yangının yayılma yolları (a), tesisat boşluklarında yangının ilerlemesini önleyebilecek yalıtım örneği (b) ve

⁹ Kapalı deney ortamları; 9,1mx4,6m boyutlarında ve 2,7m yüksekliğindedir.

taşıyıcı ile yalıtılan duvar-döşeme birleşiminin yangın sonrasındaki durumu (c) görülmektedir.



Şekil 2.11 CLT panel yapı sisteminde yangının yayılması [63]

CLT panelin yangın dayanımı; panel kalınlığı, bağımsız tabaka sayısı ve kullanılan tutkalın türüne bağlı olarak değişkenlik gösterse de bilimsel araştırmalar; taşıyıcı özellikteki CLT panelin, 90 dk. yangın dayanımı olduğunu göstermektedir [63]. Sistem tasarımında, doğru eleman kesitleri ve uygun koruma yöntemlerinin kullanılması ile daha uzun süre yangın dayanımı sağlanabilmektedir. Bu kapsamda özellikle çok katlı ahşap yapı uygulamalarında, CLT metal birleşimlerinin gizli yapılması önerilmektedir.

2.2.4 Isısal Özellikler

Ahşapta ısı iletkenliği; lif yönleri, nem oranı ve ahşabın yoğunluğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Doğu ladininden (*picea orientalis l.*) üretilen CLT, kontrplak, PSL, LVL panellerinin ısı iletkenliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmada; CLT panelin, en yüksek ısı iletkenlik değerine sahip olduğu görülmüştür [65]. Lif yönünün ısı iletkenliği üzerindeki etkisini inceleyen bir araştırmada; life paralel doğrultudaki ısı iletiminin, life dik doğrultu ile karşılaştırıldığında 2,25-2,75 kat daha fazla olduğunu göstermektedir [66].

Isı iletimini etkileyen en önemli özelliklerden biri, ısı iletim katsayısı (λ , W/mK)'dir. Yapısal ahşap üretiminde yumuşak odunlarının ısı iletkenliği; %12 nem düzeyinde 0,10-0,14 W/mK [2], nem oranının daha az olduğu koşullarda ise 0,11 W/mK 'dir [12]. EN 12524 [67] ve ISO 10456[40]'ya göre; CLT panelin ısı iletim katsayısı 0,13 W/mK 'dir. CLT paneller, diğer hafif yapım sistemleri ile

karşılaştırıldığında; daha homojen yapıda oldukları için yüzeyleri boyunca, eşit ısı dağılımı bölgeleri oluşmaktadır [12]. Isı yalıtımı ve ısıl kütle özelliklerini, paneli oluşturan ana ağacın özellikleri belirlemektedir [13]. CLT panel ile farklı yapı ürünlerinin ısı iletkenliği değerlerinin karşılaştırması Tablo 2.5'te görülmektedir.

Tablo 2.5 CLT panel ve farklı yapı ürünlerinin ısı iletkenliği değerleri [68]

Yapı ürünü	Isı iletim katsayısı (λ , W/mK)	Yoğunluk (ρ , kg/m ³)
Beton	1,51	2.000
Tuğla	0,56	1.500
Ahşap (Ladin, kızıl göknar, çam)	0,110±0,028	500±140
OSB	0,097	~580
CLT	0,104	~450

Isı geçişini etkileyen diğer önemli özellik, toplam ısı geçirme katsayısı (U , W/m²K)'dir. U katsayısı; iç ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkının 1°C olduğu koşulda, yapı kabuğunun birim alanından, birim zamanda geçen ısı miktarı olarak tanımlanır. Ortalama ısı geçirme katsayısının düşmesi ya da ısı geçirme direncinin artması, kabuktan ısı akışını azaltır. Yapı kabuğu özellikleri ve ortam koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte CLT panel yapı sistem uygulanan, enerji etkin konut tasarımlarında U katsayısının; döşemelerde 0,15 W/m²K, duvarlarda 0,12 W/m²K ve çatılar için 0,10 W/m²K'ni aşmaması önerilmektedir¹⁰. ISO 6946 [70] duvar ve çatı elemanlarının; EN 12524 [67] ise diğer yapı elemanlarının ısı iletkenliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. CLT panelin kesit kalınlığının fazla olması, ısısal konfor koşulları ve gereksinim duyulan ısı yalıtımının sağlanması üzerinde etkilidir.

Panel üretiminde bağımsız tabakalar arasında, büzülme sonucunda oluşan boşluklar, panelin ısı yalıtımı ve ısıl kütle özelliklerine olumlu katkı sağlamaktadır [1]. CLT paneller ile oluşturulan yapı kabuğunda, ısı köprülerinin oluşması engellenerek enerji kazanımı sağlanabilmektedir. Bununla birlikte iç ortamlarda duvar elemanı olarak kullanılan yeterli kalınlıktaki panellerin, gün içinde ısı

¹⁰ Belirtilen değerler, enerji etkin konut (*passive house*) uygulamaları için geçerlidir [69].

depolayan ve depoladığı ısıyı gece, iç ortama veren ısı kütlesi işlevi de bulunmaktadır. Böylelikle, ısıtma ve soğutma yükleri ile yapının toplam enerji kullanımını azaltılabilir ve kullanıcıların ısı konforu iyileştirilebilir [71]. CLT panel yapı sistemi ile ısı yalıtımlı yapı kabuğu oluşturma konusu Bölüm 3.2’de ayrıntılı olarak incelenecektir.

2.2.5 Akustik Özellikler

Akustik konforun sağlanmasında, kaynaktan çıkan ses dalgalarının izlediği doğrusal yolun belirlenmesinin yanı sıra yansıyan seslerin özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla ses yalıtımı hesaplamalarında, yapı kabuğunu oluşturan her katmanın özellikleri ayrı ayrı belirlenirken; aynı zamanda bir araya geldiklerinde sağladıkları yalıtımın etkinliği de ölçülmektedir. Döşeme ve duvar panellerinin arasında, uygun yalıtım ürünlerinin kullanılmasıyla CLT panel yapı sistemi; hava doğuşlu ve darbe seslerine karşı yalıtım sağlayarak gürültü denetiminde başarılı olabilmektedir. İyi akustik tasarım, ses yalıtımını sağlamasının yanı sıra titreşim kaynaklı sorunlara da çözüm üretebilmelidir. Bu kapsamda gerçekleştirilen akustik deneylerden elde edilen veriler ile uygulama aşamasında yerinde yapılacak ölçüm değerlerinin birlikte değerlendirilmesi sonucunda, etkin bir akustik tasarım sağlanabilmektedir [68].

CLT panel yapı sisteminde birleşimlerin, yapı akustiği üzerindeki etkisinin belirlenmesi kapsamında; ISO 10848[72]’e göre gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler, hesaplama yöntemlerine¹¹ göre belirlenmektedir. Ancak yaygın kullanılan ISO 12354 [73] yönteminin, uygulamalarda yetersiz kalabildiği belirtilerek, özellikle CLT panel birleşimleri ile yapı akustiği arasındaki ilişkiyi inceleyen kapsamlı bilimsel çalışmaların yapılması önerilmektedir [68].

Akustik hesaplama yönteminin tanımlanmasında; CLT panelin yalın durumdaki ses yalıtım değeri¹² ile sistemde uygulanacak yalıtım ürünlerinin özellikleri birlikte ele alınmaktadır. Hava doğuşlu seslerde; üç tabakalı CLT panel 32 dB; yedi

¹¹ EN 12354[73]’te yer alan yöntem: yapı elemanlarından doğrudan ses iletimin yanı sıra yanal iletimi ve var olan bir eleman için iyileştirme yöntemlerini açıklamaktadır.

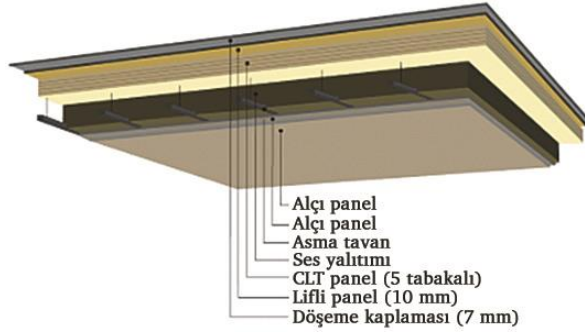
¹² Ses yalıtımlarının değerlendirilmesinde, ISO 10140 [74] ve ISO 717[75]’den yararlanılmaktadır.

tabakalı panel ise 45 dB yalıtım sağlamaktadır (Tablo 2.6). Betonarme, çelik ve ahşap yapım sistemleri için neredeyse aynı ses yalıtım ürünleri üretilmektedir [68]. Ancak akustik tasarımı oluşturan katmanların her birinin ses yalıtımı özelliği ile bir araya geldiklerinde oluşacak sistemin davranışının farklı olduğu göz önünde tutulmalıdır.

Tablo 2.6 CLT panelin yalın durumdaki ortalama ses geçiş kaybı değerleri [68]

Panel türü	Panel kalınlığı (mm)	Yüzey kütlesi (kg/m ²)	Hava doğuşlu ses (dB)	Darbe sesi (dB)
3 tabakalı	80-90	38-42	32	-
5 tabakalı	100-175	45-92	40	86
7 tabakalı	200-245	95-130	45	80

CLT panellerin yalıtım ürünleri ile kaplanmasıyla oluşturulan duvarlarda; hava doğuşlu seslerde, bir yüzeyde yalıtım ile 60 dB; panelin her iki yüzünün de yalıtım olması durumunda ise 70 dB ses yalıtımı sağlamaktadır. Duvar kalınlığının 250-350 mm'yi aştığı uygulamalarda, katman sayısı ve özelliklerinin farklılaşması nedeniyle yalıtım değerinin belirlenmesi karmaşık olabilmektedir. CLT döşeme paneli uygulamalarında da yakın değerler söz konusudur ancak döşeme kaplaması ürünlerinin çeşitliliği nedeniyle, özellikle darbe sesinin öngörülebilir değerlerinin tanımlanması oldukça zordur. Yüzer döşeme sistemi uygulaması ile darbe sesi düzeyi 46-48 dB'ye düşürülebilmektedir. Bununla birlikte döşeme sisteminde kullanılan panellerin kalınlıklarının fazla olması, ses yalıtımı üzerinde olumlu etki yaratır [68]. Yalıtım katmanı ve kesitinin değişmesi, sağlanan ses yalıtımı değerlerini de değiştirmektedir. 2006 yılında yapılan deney çalışmalarında; Şekil 2.12'de görülen döşeme kesiti ile tasarım aşamasında önerilen (50-55 dB) ses yalıtımı sağlanabilmiştir [2]. Akustik sorunlar ile ani titreşim hareketlerinin neden olacağı sorunların çözümünde; döşeme sisteminde düzeltme betonu uygulaması da yapılmaktadır.

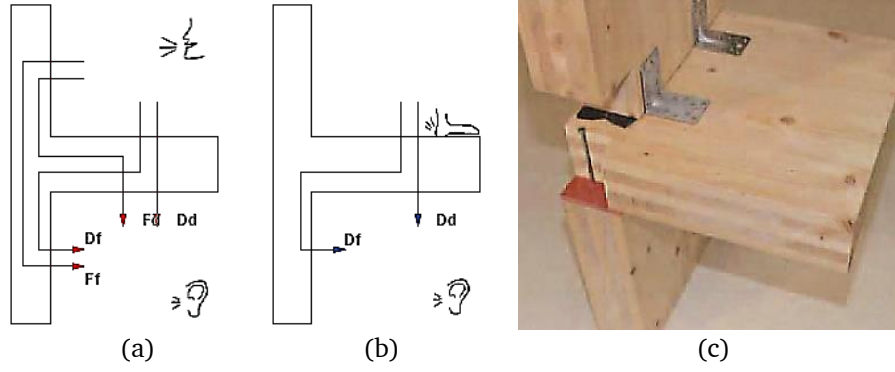


Şekil 2.12 CLT paneli ile oluşturulan döşeme sistemi katmanları [2]

CLT panel yapı sisteminde, ses yalıtımında kullanılan ürünlerinin incelendiği bir çalışmada; dört katlı bir konutun iç ortamlarında, hava doğuşlu ve darbe sesi ölçümleri yapılmıştır. Sonuçta, panel kullanımı ile özellikle hava doğuşlu seslerin yalıtımında 50-100 Hz¹³ gibi düşük ve 1250 Hz'den yüksek frekanslarda, yalıtım çeşitliliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Darbe sesi yalıtımında ise 400 Hz üstündeki frekanslarda, CLT panel yapı sisteminin, iyi davranış gösterdiği belirtilmektedir. Ayrıca çalışmada, akustik özellikleri öngörülebilir ve küçük değişiklikleri olan ses yalıtım ürünlerinin kullanılmasının, işçilik gereksinimi ile yapım maliyetini azaltacağına da değinilmiştir [76].

CLT yapım sisteminde, uygun birleşim türü ve yalıtım ürünlerinin seçilmesi ile doğru detay çözümlerinin uygulanması, akustik konforun sağlanmasında önemli etkenlerdir. Hava doğuşlu ve darbe seslerine karşı etkin ses yalıtımının sağlanabilmesi için duvar ve döşeme panellerinin birleşim yerlerinde esnek yalıtım ürünleri kullanılmaktadır. Şekil 2.13'de, CLT panel yapı sisteminde hava doğuşlu (a) ve darbe seslerinin iletim yolları (b) ile duvar-döşeme panellerinin birleşimlerinde ses yalıtımı uygulaması (c) görülmektedir. Metal parçalar ile sağlanan panel birleşimlerinde, çivi/vidaların yalıtım ürününe zarar vermeden uygulanması çok önemlidir. Birleşimlerin yanı sıra havalandırma, elektrik ve su tesisatı vb. boşluklarında da ses yalıtımı uygulanmalıdır.

¹³ Hz (Hertz); sesin saniyedeki titreşim sayısının birimidir.



Şekil 2.13 CLT panel yapı sisteminde sesin iletim yolları ve yalıtımı [12]

CLT panel ile sesin doğrudan iletimi konusunda birçok çalışma yapılmış olmasına karşın sistemde, titreşimin azaltılmasına ilişkin önerilen yöntemler [72] yetersiz kalmaktadır [68]. Sesin izlediği yanal iletim yollarını inceleyen bir araştırmada; titreşim sorunlarının en önemli kaynağının çelik köşebent, çivi ve vidalar ile sağlanan birleşimler olduğu belirtilmektedir [77]. Bir diğer araştırma projesinde; metal birleşimlerin, sesin yanal iletimi ile titreşim hareketi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda farklı üreticilerden elde edilen CLT paneller; çelik köşebent, levha, çivi/vidalar ile esnek özellikteki ses yalıtımı ürünleri kullanılarak birleştirilmiştir. Elde edilen değerler, panellerin akustik özelliklerinin, üreticisine göre oldukça fazla değişkenlik gösterdiğini doğrulamaktadır [78].

Gelişen teknoloji ile birlikte, CLT panel yapı sistemi ile inşa edilen yapıların akustik tasarımlarında; diğer disiplinler ile birlikte eş zamanlı ve bütünleşik çalışma olanağı veren Yapı Bilgi Modellemesi (BIM) sistemi kullanılabilmektedir. Bu sistemden elde edilen sonuçların güvenilirliği, alan ölçümleri ile doğrulanarak sağlanmaktadır [79].

2.2.6 Görsel Özellikler

Ahşabın doğal yapısı ile özel bir dokusu, rengi, görünümü ve kokusu vardır. Yoğunluğunun değişkenlik göstermesi, ışığı farklı yansıtmasına ve böylelikle renginin değişik algılanmasına neden olmaktadır. İçeriğindeki uçucu maddeler ise kokusu üzerinde etkilidir [80].

Üretim sürecinde CLT panellerin yüzeyleri, ahşap rende ya da zımparalar ile düzeltilir ve sonunda, yüzey niteliklerine göre sınıflandırılır. Bu aşamada, budak

vb. istenmeyen yerleri kesilerek atılır ya da panel içerisinde, fiziksel ve mekanik özellikleri olumsuz etkilemeyecek uygun biçimde düzenlenir. Estetik görünümü sağlayabilmek için panelin dış yüzeyini oluşturan tabakaların, yüksek görsel nitelikli olması istenmektedir. CLT paneller yüzeylerine göre; bir ya da iki yüzeyi görünen ve görünmez nitelikte sınıflandırılır¹⁴. Görünmez nitelikteki CLT paneller, taşıyıcı olarak uygulanırken; görünür nitelikteki yüzeyler, iç ortamlarda estetik olarak göz önünde olması istenen tavan ya da duvarlarda kullanılır (Şekil 2.14). Uygulama alanında, paneller üzerinde oluşan leke ya da kirin, zaman geçmeden temizlenmesi ve yüzeye astar yapılması önerilmektedir [12].



Şekil 2.14 İç ortamdaki CLT duvar ve döşeme elemanlarının görünümü [26]

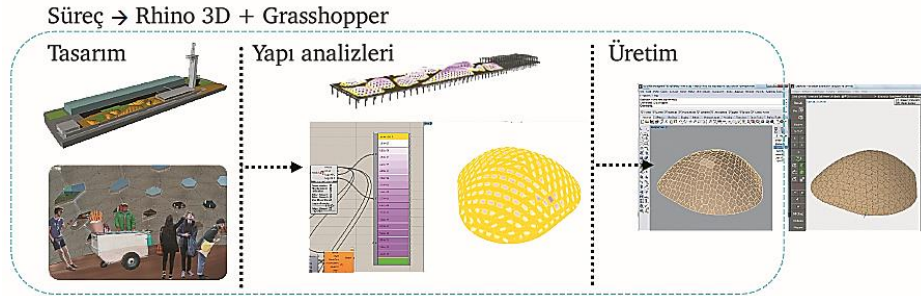
2.2.7 Mimari Tasarımda Esneklik

CLT panel yapı sistemi, yapının kullanım ömrü boyunca yeniden işlevlendirilmesi ve düzenlenmesine olanak veren tasarım esnekliği sağlamaktadır. Bununla birlikte betonarme, çelik ve prefabrik yapım sistemleri ile bütünleşik tasarım ve uygulama olanağı sağlayan paneller ile çatı, cephe vb. yapı detayları da kolaylıkla çözümlenebilmektedir.

Panel elemanların yanı sıra; eğrisel, eğimli ve katlanmış geometrilerde CLT paneller ile serbest biçimli yüzeyler de üretilebilmektedir. Serbest biçimli yüzeylerin, parametrik yazılım programları ile tasarımı, üretimi ve uygulanmasında kullanılacak CLT panel yapı sistemlerinin araştırıldığı bir

¹⁴ CLT panellerin yüzey özellikleri, EN 13017[81]'ye göre belirlenmektedir.

çalışmada [82]; proje kapsamında üretilen bal peteği biçimindeki elemanlar ile bir kabuk sistem elde edilmiştir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 CLT yüzeylerin parametrik programlama ile üretim süreci [82]

2.2.8 Yapım Süresi ve Yapım Maliyeti

Yapılaşmanın yoğun ve şehir içi ulaşımın sorun olduğu yerleşim yerlerindeki yapı üretimi sürecinde, yapı elemanlarının taşınması ve saklanması konusunda büyük sorunlar yaşanabilmektedir. CLT panellerin ön üretilmiş ve hafif olması, uygulama alanına hazır biçimde getirilmesi ve kısa sürede birleştirilebilmesi yapım süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır. CLT yapım sisteminde; dört usta ile dokuz haftada, dokuz katlı bir yapı inşa edilebilir. Bu durum, betonarme sistem ile 72 haftada bitirilebilen yapının, panel yapı sistemi ile 49 haftada tamamlanabileceğini göstermektedir [13]. Avustralya'daki ilk 10 katlı ahşap yapının tasarımı sürecinde; yapının panel yapı sistemi ve eşdeğer betonarme sistem ile yapıma durumu karşılaştırılmıştır. Sonuçta; CLT paneller ile altı çalışanın 38 günde bitirebildiği yapıyı, betonarme sistemde 30 çalışanın ancak 20 haftada tamamlayabildiği görülmüştür [83]. Yapım sürecinin kısalması, ahşap yapı uygulamalarında tüm yapım maliyetinin azaltılması üzerinde oldukça etkilidir.

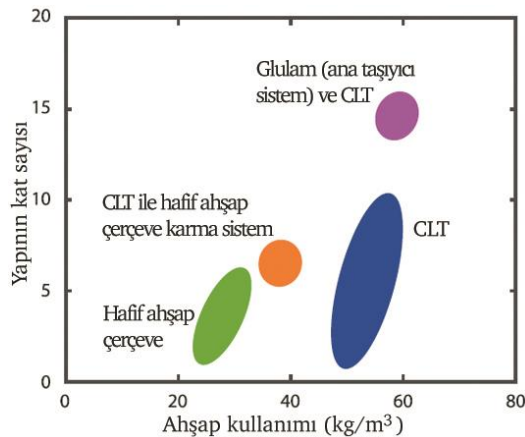
Betonarme sistem ile karşılaştırıldığında, ilk yatırım maliyetinin yüksek olduğu belirtilse de özellikle orta (5-9 katlı) ve yüksek katlı ahşap yapım sistemlerinin yapım maliyeti konusunda; CLT yapım sistemi, betonarme ve çelik sistemler ile yarışabilir durumdadır [2, 84]. Kanada'da yapılan bir araştırmanın sonucuna göre; betonarme sistem ile karşılaştırıldığında CLT panel kullanımı, 12 katlı yapılarda %1,4; 20 katlı yapılarda ise %0,6 ekonomik bir yapım sistemi sağlamaktadır.

Geniş açıklıklı ticari yapılarda, çelik sistem ile karşılaştırıldığında; CLT panel yapı sisteminin uygulanması, taşıyıcı sistem maliyetinde %43 azalma sağlamıştır [84]. 4-8 katlı yapılar için önerilen CLT panel yapı sistemi [18], arazi koşullarının el vermediği çok engebeli vb. yerlerde yapım kolaylığı sağlar. Avusturya’da, 2.400 m yükseklikteki bir vadinin tepesinde, 2007 yılında tamamlanan otel yapısında; 350 CLT panel, üç günde helikopter ile yapım alanına taşınmıştır (Şekil 2.16) [85]. Yapım süresinin kısalması, özellikle şehir merkezlerinin en önemli sorunlarından biri olan yapımdan kaynaklı gürültünün de azaltılmasını sağlamaktadır [86].



Şekil 2.16 CLT panellerin helikopter ve teleferik ile taşınması [2,85]

Çok katlı ahşap yapım sistemlerinde, kat sayısına bağlı olarak değişen yapısal ahşap kullanımı incelendiğinde (Şekil 2.17); yüksekliği 1-6 kat yapılarda, CLT panellerin kullanımının, hafif ahşap çerçeve yapım sistemi ile yarışabilir düzeyde olduğu görülmektedir. Ayrıca 10 katın üstündeki yapılarda; glulam ve paneller ile birlikte oluşturulan karma sistemlerin kullanılabilirliği önerilmektedir [87]. CLT panel yapı sistemi uygulamalarında, birim alanda yaklaşık 0,75 m³ ahşap kullanılması, yapı ürününün verimliliğinin yüksek olduğunu göstermektedir [18].



Şekil 2.17 Çok katlı ahşap yapım sistemlerinde yapısal ahşap kullanımı [87]

CLT panellerin kullanımı ile çok katlı ahşap yapı uygulamalarının hız kazanması, ahşap yüksek yapı tasarımlarının (Şekil 2.18) da geliştirilmesinin önünü açmıştır. Bu kapsamda paneller ile birlikte yapısal ahşap, betonarme, çelik ve prefabrik sistemlerin birlikte kullanıldığı yenilikçi uygulamalar geliştirilmeye devam edilmektedir. Yapılan bir çalışmada [88]; endüstriyel ahşap ürünler ile yüksekliği 20 m'yi aşan, 25 çok katlı ahşap yapı incelenerek; yapıların toplam inşaat alanı, kullanılan ahşap miktarı ile taşıyıcı sistem özelliklerinin, yapım süresine etkisi araştırılmıştır.



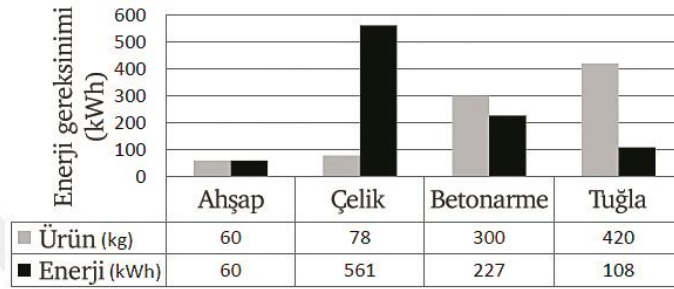
Şekil 2.18 2017-2020 yılları arasında ahşap yüksek yapı uygulamaları [89]

2.2.9 Sürdürülebilir Yapım Sistemi

Ağaç, büyüme döneminde atmosferdeki CO₂'yi tutar; kök, gövde ve yapraklarında saklar ve yaşam döngüsünün sonunda karbonu, atmosfere bırakır. CO₂ tutma hızı; ağacın türü, orman sisteminin niteliği, sıcaklık, su ve besin durumuna göre değişkenlik gösterir. Genç ağaçlar, yaşlı ağaçlar ile karşılaştırıldığında yapılarında, daha yüksek oranda karbon tutar ancak daha az karbonu saklayabilir. Ağaç yaşlandıkça solunumu artar, karbon tutumu azalır ve yapısında daha fazla karbon tutabilir [90]. Bu nedenle araştırmacılar, sürdürülebilir orman yönetimi ile yapısal ahşap elde edilmesinde; kısa sürede büyüyen ağaçların, büyüme dönemlerindeki etkinliklerini yitirmeden kesilmelerini önermektedir [91].

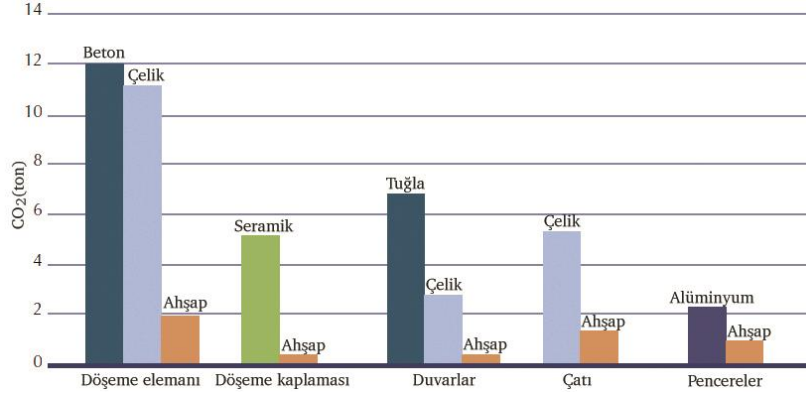
Karbonu uzun süre ve büyük ölçüde saklayabilmesinin yanı sıra ahşap, doğal ve kaynağı sürdürülebilir niteliktedir [18]. Yapım sistemlerinde kullanılan beton ve çelik, üretim süreçlerinde ahşap ile karşılaştırıldığında, daha fazla enerji tüketir. Şekil 2.19'da, 3 m yüksekliğindeki bir yapı elemanının betonarme, çelik, tuğla ve ahşap ile üretimi sürecindeki enerji tüketimi görülmektedir. Üretim sürecinde ortaya çıkan ve atmosfere salınan CO₂ gömülü karbon; üretim süreçlerinde

tüketilen enerji ise gömülü enerji olarak tanımlanır. 1 m³ ahşapta ~0,8 ton; CLT panelde ise ~2,314 ton gömülü CO₂ bulunmaktadır. Bu değer, 56-80 m³ panel kullanılan bir sistemde, 45-64 ton gömülü CO₂ olduğunu gösterir. CLT yapım sistemi, ahşap çerçeve sistem ile karşılaştırıldığında dört kat daha fazla karbonu yapısında saklayabilmektedir. İngiltere’de yapılan bir araştırmanın sonucuna göre; beton ve çelikte 1,984 ton/m³ gömülü CO₂ bulunurken; eşdeğer bir CLT panel yapı sisteminde bu değer 727 ton/m³ CO₂’dir [26, 92].



Şekil 2.19 Yapım sistemlerinde enerji tüketimlerinin karşılaştırılması [25]

Ahşap ile karşılaştırıldığında, enerji tüketimi çelikte dokuz; betonarmede ise üç kat daha fazladır [25]. Enerji tüketiminin artması, atmosfere salınan karbonun diğer bir deyişle sera gazlarının artması anlamına gelir. Ahşap, düşük sera gazı salınımı özelliği ile negatif karbon ayak izlidir. Şekil 2.20’de bir katlı konutta kullanılan farklı yapı ürünlerinin, üretimleri sürecindeki sera gazı yayılımı değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir. A.B.D.’de iğne yapraklı ağaçlar ile yapılan araştırmalar, ahşap elemanların üretim sürecinde en fazla enerji tüketiminin; fırınlarda gerçekleştirilen kurutma işlemlerinden kaynaklandığını göstermektedir [87]. Sürdürülebilir orman yönetimi ile ahşap elde edilmesi sürecinde sağlanan çevresel ve ekonomik katkı, harcanan enerji ile karşılaştırılmayacak değerdedir. Kentsel alanların tasarımında, CLT panel yapı sisteminin kullanılması, sürdürülebilir yaşam alanlarının uygulanmasında önem taşımaktadır. Bu kapsamda özellikle 10 ve daha fazla katlı yapılar için bu sistemin kullanılması önerilmektedir [18].



Şekil 2.20 Yapı ürünlerinin üretimleri sürecindeki sera gazı yayılımları [93]

CLT panellerin üretiminde; yeterli mekanik özelliklerinin sağlanabilmesi koşulu ile fiziksel yapısı etkilenmiş (böceklenme vb.) ağaçlar ve yeterince kullanılmamış orman kaynakları hammadde olarak değerlendirilebilmektedir [94]. Bu yaklaşım ile hammaddenin sağlanması sürecinde; etkin, sürdürülebilir ve ekonomik orman yönetimi sistemi geliştirebilir. Günümüzde CLT panellerin üretiminde kullanılan keresteler, çoğunlukla Kuzey Avrupa ve İskandinavya'nın sürdürülebilir orman yönetimi uygulanan çam ormanlarından sağlanmaktadır. Sera gazı yönetiminin küresel bir boyut kazanması ile ülkelerin (Çin vb.), dünyadaki en büyük orman alanlarını oluşturabilmek için eyleme geçecekleri düşünülmektedir [95].

Hammadde olarak yerel orman kaynaklarının kullanımı, sürdürülebilirliğin yanı sıra ülke ekonomisine de olumlu katkı sağlamaktadır. İtalya'da, yapısal ahşap üretiminde az kullanılan sert ağaç türlerinin, CLT panel üretiminde kullanılabilirliği üzerine yapılan araştırmalar [96]; hammaddenin yerel odun kaynaklarından sağlanmasının, odun endüstrisinin gelişmesine önemli katkı sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte hammaddenin, yasal olmayan uygulamalar ile yaşlı ormanlardan kesilerek elde edilmesinin önlenmesi ve kerestenin uygun biçimde yönetilen sürdürülebilir kaynaklardan toplanmasını sağlamak amacıyla; FSC ve PEFC sertifikaları kullanılmaktadır. Bu kapsamda TRADA, üretimden kullanıma kadar süreçte, diğer aşamaların belgelendirilmesini sağlamaktadır [31].

Yapım uygulamalarında, çevreye zarar veren en önemli etkenlerden biri; yapısal atık oluşumu ve bu atıkların yeniden kullanılamamasıdır. İngiltere'de bir yılda

üretilen, ~11 milyon ton kereste atığının %80'i çöpe atılmaktadır [31]. Ahşap yapım sisteminde; kereste atıklarının yaklaşık yarısı, yapının uygulama ve yıkımı sürecinde açığa çıkmaktadır [18]. Bu nedenle mekanik dayanımı yüksek, olabildiğince ısı işlem görmemiş ahşap atık ürünlerden elde edilebilecek CLT paneller ile ilgili araştırmalara öncelik verilmesi önemlidir. CLT üretiminde kullanım olanaklarının incelendiği bir araştırmada; ısı işlem uygulamalarının, masif (ısı işlemli) olanlar ile karşılaştırıldığında, panelin mekanik özelliklerini düşürdüğü belirlenmiştir [97]. Ahşap atıklarının azaltılabilmesinin bir diğer yolu ise uygulamada; CLT panel boyutlarına uygun yapı elemanlarının seçilmesinin sağlanmasıdır.

Mimari tasarım ve taşıyıcı sistem gereksinimlerine uygun tasarlanmış, üretilmiş ve uygulanmış CLT panel yapı sisteminin; doğru koruma ve bakım yöntemlerinin uygulanması koşuluyla diğer yapım sistemleri ile karşılaştırıldığında, kullanım ömrünün daha uzun olduğu belirtilmektedir. Bununla birlikte paneller, yeniden kullanım için kolaylıkla sökülebilir, yeniden kurulabilir ya da yapı ömrünün sonunda, biyoyakıt olarak kullanılabilir. Japonya'da, SOFIE Project kapsamında deneyleri tamamlanan yedi katlı, CLT panellerden oluşan yapı, sökülerek İtalya'ya gönderilmiştir. Burada birkaç yıl saklanan paneller; sürdürülebilir özellikli bir konut projesinin taşıyıcı elemanları olarak yeniden kullanılmıştır [13].

Sürdürülebilir bir yapım sistemi olmasının yanı sıra ahşap kullanımının, yapı içi hava niteliği üzerinde olumlu katkıları olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda Norveç'te ahşap bir yapıda, yapı içi hava niteliği ile kullanıcıların psikofizyolojik durumları arasındaki olumlu ilişki incelenmiştir. Sonuçta; eğitim gören çocukların kalp atışı hızlarında azalma olduğu görülmüştür [26].

2.3 Dünyada CLT Panel Üretimi ve Uygulamaları

1990'lı yıllarda Orta Avrupa'da geliştirilen CLT paneller, 2000'lerin ikinci yarısıyla birlikte İtalya, Yeni Zelanda, Japonya ve Kanada gibi deprem riskinin yüksek olduğu yerlerde kullanılmaya başlanmıştır. Panellerin konut üretimi dışında kamu yapıları, eğitim kampüsleri, havaalanları, endüstriyel üretim alanları ve kapalı spor merkezleri gibi birçok büyük ölçekli yapılarda, köprülerde ve güçlendirme

projelerinde, özellikle taşıyıcı duvar ve döşeme elemanı olarak kullanımı, dünyada yaygın olarak devam etmektedir. Ülkemizde, özel kurumların az katlı yapı uygulamaları dışında CLT panel yapı sisteminin kullanımı kısıtlıdır (Şekil 2.21). Buna karşın panellerin, Türkiye koşullarında üretim olanaklarını inceleyen araştırmaların son zamanlarda hız kazanması umut vericidir. Bu kapsamda; 2017 yılında; “Karadeniz Bölgesi Yerli Ağaç Türlerinden Çapraz Lamine Kereste (CLT) Üretimi ve Optimizasyonu” projesi başlatılmıştır [98]. Ayrıca Karadeniz Bölgesi’nde yetişen sarıçam, doğu ladini ve göknar ile üretilen CLT panellerin, depreme dayanıklı ahşap yapı tasarımında, duvar paneli olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı tez çalışması sonucunda; yerli ağaç türlerinden üretilen CLT panellerin mekanik özelliklerinin Eurocode’a uygun nitelikte olduğu belirtilmektedir [99].



Şekil 2.21 Türkiye’de CLT panel yapı sistemi uygulamalarına örnekler [100]

CLT panel üretiminde Avrupa ülkeleri, dünyadaki toplam üretimin %60 (700.000 m³)’ünü karşılayarak ilk sırada yer almaktadır. Tablo 2.7’de Avrupa’da CLT panel üretimi yapan önemli kurumlar ve üretim hacimleri görülmektedir. Bununla birlikte UNECE raporlarına göre, 2018 yılında Avusturya’da üretilen panelleri, en fazla ithal eden ülkeler sırasıyla; İtalya, Almanya ve İsviçre’dir. 2017 yılında, küresel pazar değeri 603 milyon dolar olan CLT endüstrisinin; 2024 yılında 1.606 milyon dolara ulaşması beklenmektedir [101]. CLT panellerin, diğer ülkelerden ithal edilebilmesinin yanı sıra ülkelerin, kendi yerel ağaç türleri ile üretimlerini gerçekleştirebilmelerinin sağlanması çok önemlidir. Avrupa’da geliştirilen ve giderek dünyaya yayılan CLT teknolojisi ile ilgili bilimsel araştırmalar, yayınlar ve uygulamalar hız kazanarak devam etmektedir.

Tablo 2.7 Avrupa’da CLT üretimi yapan önemli kurumlar ve üretim hacimleri

Kurum, Kuruluş yılı	Üretim yapılan ülkeler	Üretim hacmi* (m ³)	CLT özellikleri
Binderholz, 1950	Avusturya, Almanya ve	195.000	ETA-06/0009
Hasslacher Norica Timber, 1901	İsveç (sadece Binderholz)	55.000	ETA-12/0281
Stora Enso, 1998	Avusturya	170.000	ETA-14/0349
KLH Massivholz, 1999		120.000	ETA-06/0138
Mayr Melnhof Holz, 1850		75.000	ETA-09/0036
Holzbau Unterrainer, 2006		10.000	ETA-16/0055
Züblin Timber, 1898	Almanya	30.000	ETA-10/0241
Lignotrend, 1991		26.000	ETA-09/0211
Eugen Decker, 1983		25.000	ETA-12/0327
W.u.J. Derix, 1925		12.500	ETA-11/0189
Martinsons, 1929	İsveç	22.000	ETA-13/0684
XLam Dolomiti, 2010	İtalya	15.500	ETA-12/0347
Schilliger Holz, 1861	İsviçre	13.000	ETA-08/0238

*CLT üretim hacmi değerlerinde, 2018 yılı verileri ile ≥ 10.000 m³/yıl alınmıştır [101].

2.3.1 Avrupa Ülkeleri

Avrupa’da, CLT panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri ile uygulama alanlarının ortak bir dille tanımlanması amacıyla ilk çalışmalar, 2000’li yılların başlarında gerçekleşmiştir. 2004 yılında, ahşap yapı tasarımında ana ilkeler Eurocode 5 kapsamına alınmış; 2015’de yayımlanan EN 16351 [20] ile panel üretimi ve uygulamaları yeniden düzenlenmiştir.

CLT panellerin Avrupa’daki ilk kullanım alanı, çoğunlukla bir ya da iki katlı ahşap konut yapım sistemleriydi. Son 20 yılda, panel üretiminde kısa sürede gelişme görülmekle birlikte; özellikle 4-10 katlı konut yapılarının birçoğunun CLT panel yapı sistemi ile yapılmasının yaygınlaştığı görülmektedir [18, 102].

2.3.2 A.B.D. ve Kanada

Kuzey Amerika’da ahşap çerçeve yapım sistemi ile en fazla 12 m yüksekliğinde yapılar yapılabilirken; masif ahşap sistem ile 23 m yüksekliğinde yapılar uygulanabilmekteydi. Kanada’da 1941 yılında yayımlanan yönetmelikte; yangın dayanımı nedeniyle ahşap yapım sistemi ile en fazla dört katlı yapılara izin verilmekteydi. Bu soruna çözüm olabilmesi ve altı kata kadar yapıların, ahşap çerçeve sistem ile yapılabilmesi için yapı yönetmeliği değiştirilmiştir [86]. Kanada’da, 1-6 katlı yapıların ahşap sistem ile yapılabilmesi için geçerli

yönetmelik kullanılabilirken; 7-9 katlı yapılarda yönetmelik koşullarının uyarlanması, 10 ve daha yüksek katlı yapılarda ise kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir [84].

A.B.D.'de ilk CLT panel kullanımı, endüstriyel ve madencilik alanında; çalışma yüzeylerinin oluşturulması amacıyla gerçekleşmiş olup, özellikle son yıllarda konutlardan büyük ölçekli kamu yapılarına kadar birçok alanda kullanımı yaygınlaşmaya devam etmektedir [101]. 2005 yılında, Kanada'da FPInnovations, CLT paneller ile ilgili çok disiplinli bir araştırma programı başlatmıştır [103]. Yapılan araştırmaların sonuçları ve Avrupa'daki CLT panel uygulamalarından elde edilen bilgiler derlenerek; biri 2010 yılında Kanada'da [1], diğeri ise 2013'te A.B.D.'de [2] olmak üzere kılavuz niteliğinde, iki el kitabı yayımlanmıştır. CLT panel yapı sisteminin uygulanmasını zorlaştıran yönetmelik engellerini ortadan kaldırabilmek amacıyla bir kurul (*Canadian CLT Standard Committee*) kurularak; 2012'de ANSI, CLT'nin üretimi, niteliği ve teknik özellikleri ile ilgili APA PRG 320 Standardı'nı uygulamaya başlamıştır [3]. Bu standart, Kanada ve A.B.D. için hazırlanmış olup; panelin fiziksel ve mekanik özellikleri, dayanımı ve uygulanması konularındaki gereksinimler ile deney yöntemlerini kapsamaktadır. Bu gelişmelerle birlikte 2015 yılında, CLT teknolojisi IBC kapsamına girmiştir. A.B.D.'de, taşıyıcı olmayan panellerin üretimine 2010'da; taşıyıcı panellerin üretimine ise 2015 yılında başlanmıştır [104]. 2018'de panel üretimi için Kuzey Amerika ve Kanada'da, 10 fabrika çalışmaya başlamış olup; iki fabrikanın yapım çalışmaları devam etmektedir [101].

A.B.D.'de özellikle CLT paneller ile yapısal ahşap ürünlerin birlikte kullanıldığı karma yapım sistemlerinin kullanımı özendirilmektedir. CLT teknolojisine büyük ilgi duyulmasına karşın, benimsenme hızının diğeri ülkeler ile karşılaştırıldığında daha yavaş olduğu belirtilmekte olup konuyla ilgili ayrıntılı çalışmalar yapılmaktadır [104,105]. Yapı ve yapım yönetmeliklerinin, bilimsel araştırmaların sonuçları göz önüne alınarak güncellenmemesi, A.B.D.'de CLT panel endüstrisinin gelişmesini engelleyen etkenlerin başında gelmektedir.

2.3.3 Japonya

Japonya'da, CLT teknolojisi ile ilgili önemli gelişmeler yaşanmakta olup; bu kapsamda 2014 yılında, üç fabrika yapılmıştır [104]. UNECE raporlarına göre; 2018 yılında Avrupa dışında, Avusturya'dan en fazla CLT ithalatı yapan ülke Japonya'dır. 2017 yılında, 68.000 m³'ün üzerinde panel üretimi gerçekleştirmiş olup, ulusal ekonomik planlamasına göre; 2024 yılına kadar, yerli CLT üretimi hacmini 500.000 m³'e çıkarmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte panel üretiminde yeni kurulacak olan fabrikaların yatırım maliyetlerinin yarısının, devlet desteği ile karşılanması ve üretim maliyetlerinin de yarısına düşürülmesi konusunda çalışmaları devam etmektedir. Ayrıca dört kata kadar olan yapıların, en az %6'sında CLT panellerin kullanılması koşulunun, yapı yönetmelikleri ile uygulama planlamalarında yer alması için düzenlemeler yapılmaktadır [101].

2.3.4 Avustralya ve Yeni Zelanda

Avustralya'da, CLT panel üretiminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla iki fabrika planlanmakta olup [104]; birinin yapım çalışmalarına 2018 yılında başlanılmıştır. Yeni Zelanda, 2011 yılında panel üretmeye; 2013'te ise üretiminden ticari olarak gelir elde etmeye başlamıştır [18, 101].

2.3.5 Diğer Ülkeler

CLT panel yapı sistemi, hızlı yapım özelliği ile nüfus yoğunluğunun fazla olduğu Çin gibi Asya-Pasifik ülkelerinde yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte özellikle yerli ağaç türlerinden panel üretimi ile ilgili çalışmalar da devam etmektedir. Rusya'da ilk panel üretiminin gerçekleştirileceği fabrikanın yapım çalışmalarının, 2020 yılı sonunda bitirilmesi amaçlanmaktadır [18, 101].

CLT PANEL YAPI ELEMANLARI VE YAPI KABUĞU

3.1 CLT Panel Yapı Elemanları

CLT paneller; ahşap yapım sistemlerinin yanı sıra betonarme, çelik ve prefabrik taşıyıcı sistemler ile kolaylıkla bütünleştirilebilir. Yapısal ahşap uygulamalarında; panellerin, özellikle ahşap platform çerçeve ve balon çerçeve sistemlerinde yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Platform çerçeve sistemde; yapının her katında döşeme panelleri, doğrudan duvar elemanlarının üzerine yerleştirilir (Şekil 3.1). Balon çerçeve sistemde ise; yapı yüksekliği boyunca kesintisiz devam eden duvarlar, her katta döşeme panelleri ile birleştirilir [1]. Platform çerçeve sistem, Avrupa'daki çok katlı yapı uygulamalarında yaygın kullanılır ve birleşimleri, balon çerçeve sistem ile karşılaştırıldığında daha kolaydır. Balon çerçeve sistem, az katlı ticari ya da endüstriyel yapı uygulamalarında kullanılmaktadır.



Şekil 3.1 CLT paneller ile platform çerçeve sistemin oluşturulması [1,106]

CLT paneli oluşturan bağımsız tabakaların çapraz yerleştirilmesi, bitişik tabakalarda olası genişleme ve büzülme etkilerini kısıtlayarak, yüksek boyutsal kararlılık ve rijitlik sağlamaktadır. Böylece; düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ile iki yönlü eğilme dayanımı olan ve rijit diyafram davranışı gösterebilen döşeme sistemi elde edilebilmektedir. CLT panel yapı sistemi, taşıyıcı ya da taşıyıcı

olmayan duvar panelleri ve döşeme elemanları ile oluşturulmaktadır. Paneller, çatı ya da merdiven döşemesi olarak da kullanılabilir.

3.1.1 Duvar Elemanı

CLT duvar panellerinin yerleşimi, birleşimleri ve detayları; mimari ve taşıyıcı sistem tasarımlarına uygun biçimde yapılır. Duvarların, betonarme döşeme ile birleşiminde öncelikle; projede ve uygulama alanında alınan ölçüler karşılaştırılarak, duvar-döşeme birleşim yeri belirlenir. Duvarların başlangıç, bitiş ve köşe yerleri ile duvar izlerinin belirlenebilmesi amacıyla çelik köşebentler, döşemeye birleştirilir. CLT duvar panellerinin betonarme döşeme ile birleşiminde, duvar panelinin yaklaşık kalınlığı kadar boyutta çelik köşebentler kullanılmaktadır. Köşebentler arasındaki uzaklık, taşıyıcı sistem hesaplamaları ile belirlenir ve çoğunlukla 100-150 cm olarak uygulanır. Köşebent birleşimleri yapıldıktan sonra, yapı kabuğu tasarımına göre duvarlarda, gereksinim duyulan nem yalıtımı uygulamaları gerçekleştirilir (Şekil 3.2). Uygulama projelerinde yer alan duvar ve döşeme kotlarına göre birleşimlerde, gerekli düzenlemeler yapılır. Bu kapsamda, CLT panel duvar-döşeme birleşimleri ile temel yerleşiminin, zamanla şişen harç ile doldurulduğu ya da duvar panelinin, nemli bir harcın üzerine yerleştirildiği uygulamalar yapılabilmektedir [12].



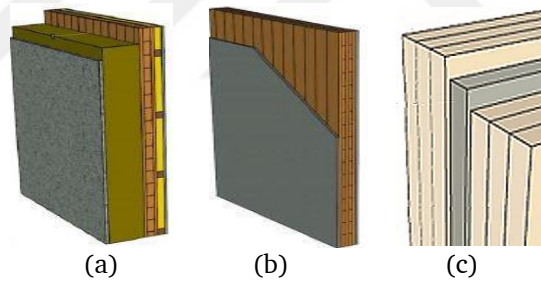
Şekil 3.2 CLT duvar panellerinin yerleşimi ve yalıtım uygulaması [106]

Duvar panelleri taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan nitelikte üretilmektedir. Taşıyıcı duvar panellerinin kalınlığı daha fazladır ve uygulamalarda, çoğunlukla üç ya da beş katmanlı seçilmektedir. Bununla birlikte duvar elemanları geniş ve bir parça olabileceği gibi gereksinimlere göre parçalı olarak da üretilmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Tek parça ve parçalı CLT duvar panelleri [2,106]

Ahşap yapıda CLT paneller, ahşap çerçeve sistem ile birlikte kullanılabilir ya da duvarlar, sadece paneller ile oluşturulabilir. CLT paneller, yapıda iç ve dış duvarın yanı sıra asansör/merdiven boşluğu uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bu kapsamda Şekil 3.4'te; üç tabakalı duvar panelleri ile yalıtımlı dış duvar (a), üç ve beş tabakalı paneller ile asansör boşluğu duvarının uygulaması (b) görülmektedir. Mimari gereksinimler ile yapı kabuğu tasarımına göre değişmekle birlikte, CLT panellerin yalıtımında farklı detaylar uygulanabilir. Dokuz katlı bir konutun, asansör ve merdiven alanlarında; yalıtım katmanları, yangın güvenliği ve ses yalıtımının sağlanabilmesi amacıyla Şekil 3.4 (c)'de görüldüğü gibi üç tabakalı iki duvar paneli arasına yerleştirilmiştir.



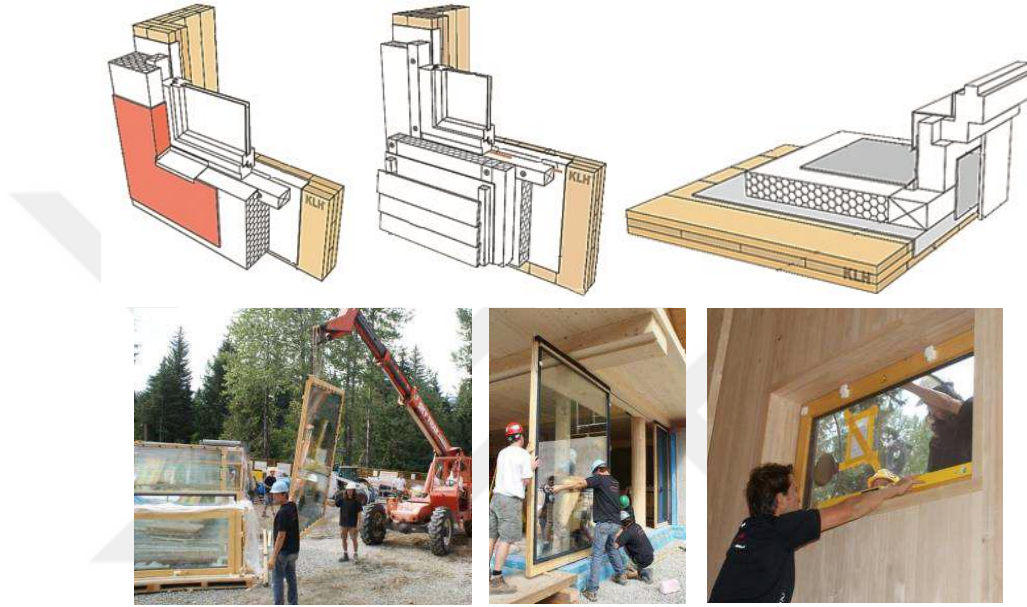
Şekil 3.4 CLT duvar panelleri uygulamaları [107,108]

Duvar panelleri, eğimli olarak da uygulanabilmektedir. Almanya'da Müritz Doğal Parkı için tasarlanan ziyaretçi merkezinde; üç tabakalı taşıyıcı CLT dış duvar panelleri, 60° açı yerleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 CLT paneller ile eğimli duvar oluşturma [109]

Panellerin üzerindeki pencere ve kapı boşlukları, fabrika ortamında mimari uygulama projelerine uygun biçimde, CNC teknolojisi ile açılmakta ve uygulama alanına diğer yapı elemanları ile birleşime hazır olarak getirilmektedir (Şekil 3.6). Geniş kapı/pencere boşlukları olan duvar panellerinde, yatay yükler altında gerçekleşecek yerdeğiştirmenin sınırlandırılması amacıyla çekme donatısı da kullanılabilir [12]. Bununla birlikte kapı boşluklarında, köşebent yerleşiminin yapılmamasına özen gösterilmelidir.



Şekil 3.6 CLT duvar panelleri ile pencere uygulaması [12,28]

Yenileme projesi kapsamında, bir okul yapısının asansör boşluğu, CLT paneller ile fabrikada, bir parça olarak üretilmiş ve yapım alanına getirildikten birkaç saat sonra uygulama tamamlanmıştır (Şekil 3.7). CLT panellerin yanı sıra, merdiven, baca vb. elemanların ön üretilmiş seçilmesi, yapım süresini oldukça kısaltmaktadır.



Şekil 3.7 CLT paneller ile üretilen asansör boşlukları [2,109]

Elektrik ve mekanik tesisatı boşlukları, panel üretimi sürecinde fabrikada ya da uygulama alanında yerinde oluşturulabilmektedir. Uygulama yerinde oluşturulacak boşluklarda; boşluk alanı, duvar panelinin önünde yer almalıdır (Şekil 3.8). Tesisat boşluğu ile panel yüzeyi arasında, açığı olması gereken uygulamalarda; panelin rijitliğinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Tesisat kanallarının, duvardaki yalıtım katmanlarının arasından geçtiği uygulamalarda; uygun ve etkin yalıtımın sağlanması önemlidir.



Şekil 3.8 CLT paneller ile tesisat boşluklarının oluşturulması [12,109]

Tesisat boşlukları, görünür nitelikteki panellerde, panelin arka yüzeyinde oluşturulur. Görünür nitelikte olmayan panellerde ise kanallar, alçı panel ile kapatılabilmektedir (Şekil 3.9). Tesisat kanallarının, CLT panelin lif yönünde oluşturulması ve kanal derinliğinin, panel kalınlığının 4/5'ni aşmayacak şekilde tasarlanması önerilmektedir [12].

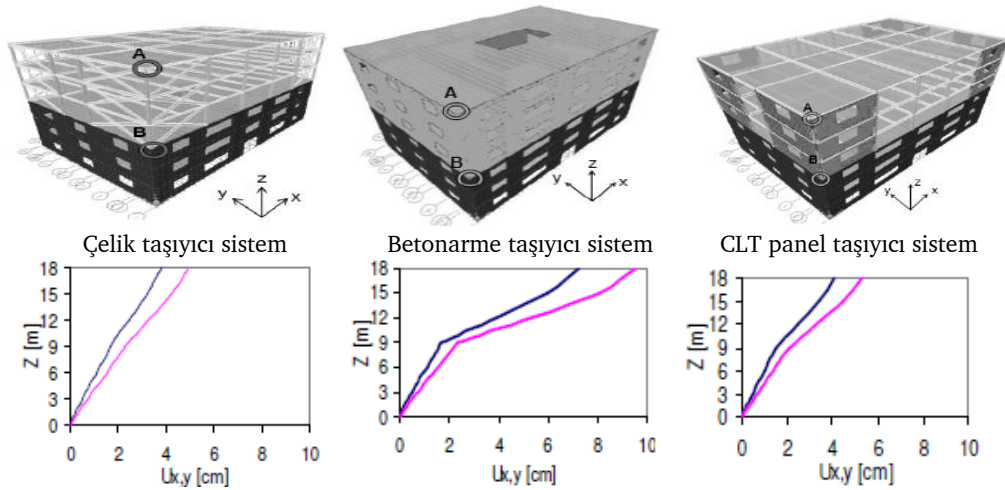


Şekil 3.9 Tesisat kanallarının oluşturulması [12]

Mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar, CLT panellerin; farklı taşıyıcı sistemli tarihi yapıların restorasyonu ve güçlendirme projelerinde kullanılabileceklerini

göstermektedir. Yapılan bir araştırmada; betonarme yapıların güçlendirilmesinde, CLT paneller ile perde duvar oluşturulmasının, deprem kuvvetlerine karşı, yapının yanal rijitliğinin artırılmasında oldukça etkili olduğu belirtilmektedir [110]. Deprem sonrasında önemli hasar almış yapıların, paneller ile güçlendirilmesi sonucunda yapının, depremden önceki rijitliğine dönmesi sağlanabilmektedir. Bu kapsamda yapılan bir çalışmanın sonucuna göre; yığma yapı sisteminde, dış duvarlarda CLT panellerin kullanılması ile yapı dayanımı, %40 artış göstererek süneklik iki katına çıkmıştır [111].

Kent merkezlerinde, artan yoğunluk ve alan yetersizliği nedeniyle az katlı var olan yapıların yeniden işlevlendirilmesi ve yapılara, yeni katların eklenmesine gereksinim duyulabilmektedir. Bu kapsamda, var olan üç katlı betonarme bir yapıya eklenecek ve üç kattan oluşacak, farklı taşıyıcı sistemlerin deprem davranışının belirlenmesi amacıyla bir araştırma gerçekleştirilmiştir [112]. Bu çalışmada, betonarme döşeme elemanları olan çelik çerçeve sistem, CLT panel yapı sistemi ve CLT döşeme ve duvar panelleri olan çelik çerçeve sistemin, deprem kuvvetleri altındaki davranışı karşılaştırılmıştır. Yük-yerdeğiştirme ilişkisi incelendiğinde (Şekil 3.10); paneller ile oluşturulan taşıyıcı sistemin, yapının deprem davranışı üzerinde olumlu etki sağladığı görülmektedir.



Şekil 3.10 Betonarme yapıya farklı taşıyıcı sistemler ile kat eklenmesi [112]

3.1.2 Döşeme Elemanı

CLT döşeme elemanları ile iki yönlü eğilme dayanımı olan ve yatay yüklere karşı rijit diyafram davranışı gösterebilen döşeme sistemi elde edilebilmektedir. Bu davranışın oluşmasında, panelleri bir araya getiren ve birlikte çalışmalarını sağlayan birleşimlerin, yük aktarımındaki etkinliği söz konusudur. Yük aktarımının sağlanabilmesi için birleşimlerin, doğru tasarlanması ve uygulanması oldukça önemlidir. Kayma dayanımı yüksek olan CLT döşeme paneller ile yapıda, balkon, teras vb. çıkıntılar da uygulanabilmektedir (Şekil 3.11). Döşeme panelleri, kat döşemesi ya da çatı döşemesi olarak uygulanmaktadır.

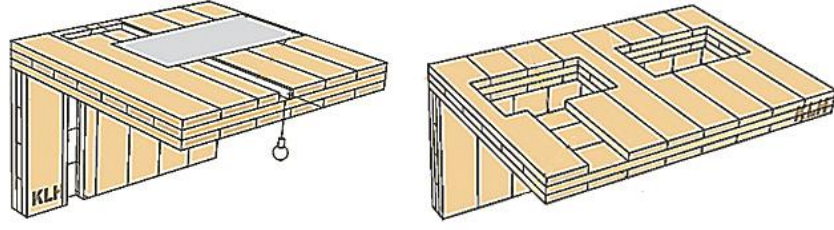


Şekil 3.11 CLT panel yapı sistemi ile balkon oluşturulması [1]

3.1.2.1 Kat Döşemesi

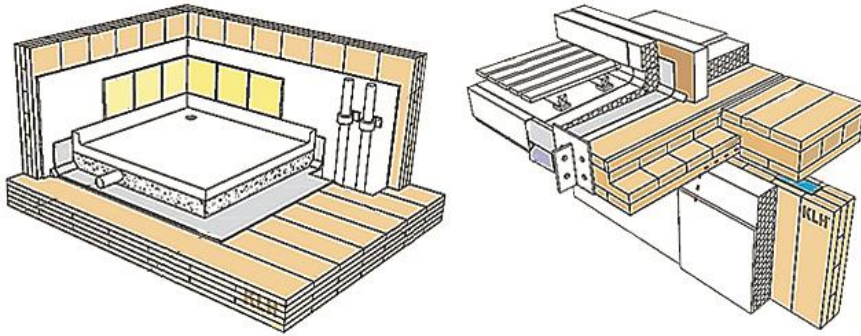
Mimari ve taşıyıcı sistem gereksinimlerine göre değişmekle birlikte, CLT döşeme panelleri çoğunlukla beş ya da daha çok katmanlı seçilmektedir. Mesnet açıklığına göre yeterli panel dayanımının ve kalınlığının sağlanabildiği koşullarda, üç tabakalı döşeme panelleri de kullanılabilir. Çok katlı ahşap yapılar ve geniş açıklıklı tasarımlarda, CLT paneller ile nervürlü döşeme sistemi uygulamaları da yapılabilmektedir.

Döşeme panelleri üzerindeki tesisat, merdiven ve asansör boşlukları, mimari ve taşıyıcı sistem projelerine uygun biçimde, fabrika ortamında CNC teknolojisi ile oluşturulmaktadır (Şekil 3.12). Açılan boşluk boyutlarının değiştirilmesi gereken durumlarda, uygulama öncesinde, taşıyıcı sistem analizleri gözden geçirilmelidir.



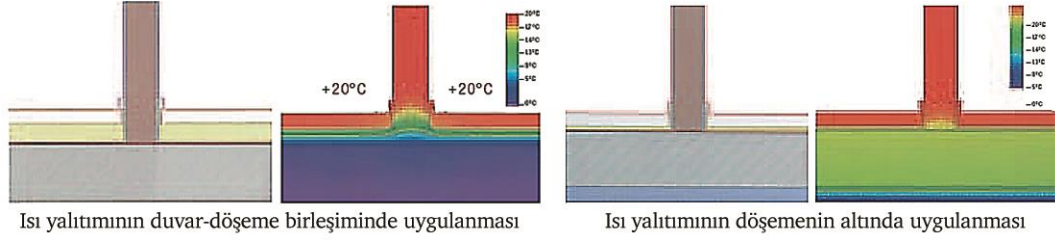
Şekil 3.12 CLT döşeme panellerinde boşluk oluşturma [12]

CLT panel yapı sisteminde, tesisat kanalları çoğunlukla döşeme kesiti ya da cephe kaplaması içinden geçmektedir. Panelin fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumsuz etkilenmemesi için uygun bakım ve koruma yöntemlerinin kullanılması ile su, ısı ve nem yalıtımının sağlanması çok önemlidir. CLT döşeme panellerinin yalıtımı, iç ya da dış ortamdan yapılabildiği gibi; her iki yöntemin birlikte kullanıldığı uygulamalar da yapılmaktadır. Mimari tasarım projeleri ile yerinde uygulamalarda, ıslak hacimler ya da balkon, teras vb. gibi dış hava koşullarından etkilenen ortamların yalıtımına özen gösterilmelidir (Şekil 3.13).



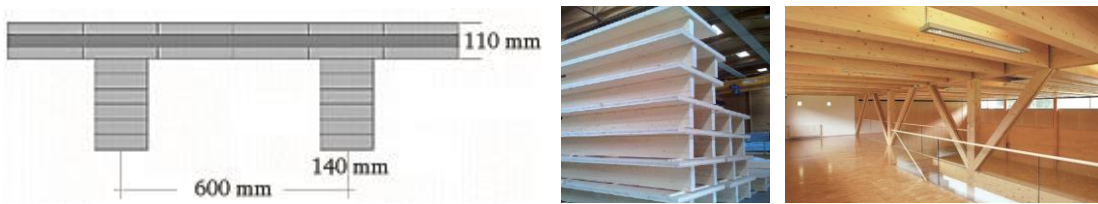
Şekil 3.13 CLT döşeme elemanları ile ıslak hacim ve balkon detayları [12]

CLT duvar paneli ile betonarme döşeme birleşimlerinde; özellikle ısı köprüsü oluşumu ve yoğuşma riskine karşı önlem alınmadır. Bu kapsamda yapılan bir araştırmada; ısı yalıtımının, döşemenin üzerinde olduğu uygulamada, yoğuşma ve küf oluşumunun uç değeri olan 10-12°C ısı eğrilerinin, birleşim bölgesinden geçtiği ve risk oluşturduğu görülmüştür [12]. Buna karşın yalıtımın, betonarme döşemeyi alttan sardığı uygulamada, risk oluşturacak ısı eğrilerinin olmadığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 CLT panel duvar-betonarme döşeme birleşiminde ısı yalıtımı [12]

Ahşap kolon-kiriş ya da kafes taşıyıcı sistemlerden bağımsız olarak, geniş açıklıklı tasarımlarda kullanılan nervürlü ahşap elemanlar; CLT döşeme paneli ile birbirinden bağımsız glulam kirişlerin birlikte düzenlendiği, ön üretimli döşeme sistemlerdir. CLT paneller, çoğunlukla nervürlü elemanların üzerinde uygulansa da gereksinime göre, panellerin altta olduğu sistemler ile karşılaşılabilmektedir [113]. Glulam elemanların (GL28c) üretiminde ve paneller ile birleştirilmesinde EN 14080[114]'den yararlanılmaktadır. Nervürlü döşeme elemanları, uygulama alanına hazır ve bitmiş bir ürün olarak gelir. Bu elemanların boyutları ve kalınlıkları için bir kısıtlama olmasa da kullanılan panelin ölçülerine uyulması önerilmektedir. Yapının açıklıkları, nervürlerin arasındaki uzaklık ve yükleme türü (tekil yük, yayılı yük vb.) gibi değişkenler, panelin genişliğini belirlemektedir. Taşıyıcı sistemin, ekonomik boyutlandırılabilmesi için nervürler arasındaki uzaklığın, kat döşemelerinde 40-60 cm, çatı döşemelerinde ise 60-120 cm olarak düzenlenmesi ve elemanın, en az iki nervürden oluşması önerilmektedir [113]. 6m ve daha büyük açıklıklarda, nervürlü döşeme sistemi ile panellerin birlikte kullanılması, ekonomik bir yapım sistemi sunmaktadır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 CLT panel ile oluşturulan nervürlü döşeme sistemi [113]

Glulam nervür ile CLT döşeme paneli birleşimi, rijit özelliktedir. Döşeme birleşimleri; yarım bindirme yöntemi ile ahşap kompozitleri kullanılarak yapılmaktadır. T-kirişli sistem, geniş açıklıklı ve çok katlı ahşap yapıların döşeme sistemlerinin yanı sıra ahşap köprülerde de kullanılmaktadır [109]. Çivi/vida

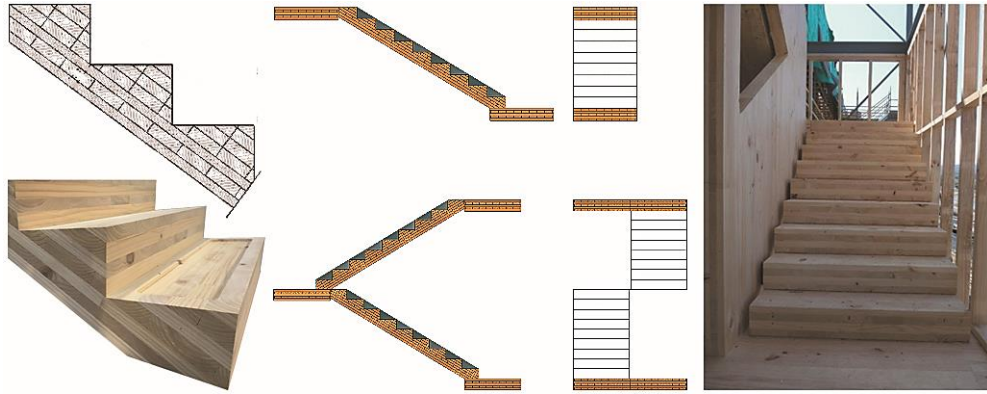
kullanılan döşeme birleşimlerinin, kayma dayanımı yüksektir [113]. Düşey yüklerin farklılık gösterdiği durumda, yapı davranışına katkı sağlayabilmek ve dayanımı güçlendirebilmek için her iki yönden, açılı çivi/vida uygulaması yapılabilmektedir (Şekil 3.16).



Şekil 3.16 Nervürlü döşeme sistemi ile açılı çivi/vida uygulaması [113]

Detay tasarımında, birleşimin mekanik özellikleri; büyük yatay yükler altında oluşabilecek kayma gerilmelerini karşılayabilecek dayanımda olmalıdır. Bu kapsamda, nervürlü elemanlara doğrudan dayanak oluşturabilecek birleşimler de tasarlanabilmektedir. Bu birleşimlerde; nervürlü eleman doğrudan, kalın bir CLT duvar paneli üzerine yerleştirilebilir ya da nervürler kısa kenarlarından, duvar paneline metal levhalar ile birleştirilebilir.

CLT elemanlar, duvar ve döşeme paneli olarak kullanımlarının yanı sıra merdiven uygulamalarında da kullanılabilir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 CLT panel ile merdiven uygulamaları [115,116]

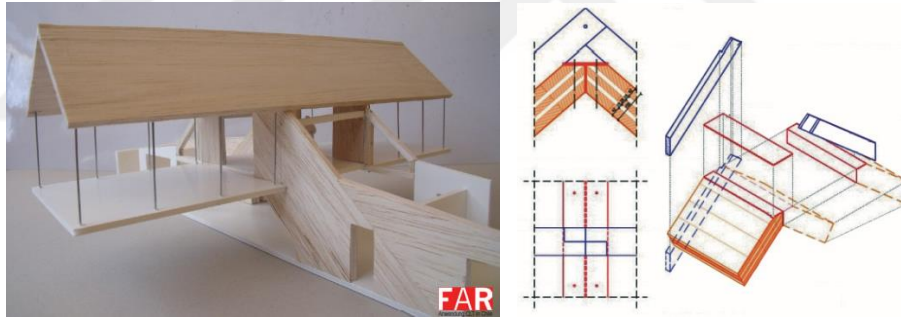
3.1.2.2 Çatı Döşemesi

CLT döşeme panelleri, kat döşemesinin yanı sıra çatı döşemesi olarak kullanılabilir. CLT paneller ile düz, eğimli ya da Şekil 3.18'de görüldüğü gibi eğrisel çatı uygulamaları yapılabilmektedir.



Şekil 3.18 CLT paneller ile eğrisel çatı uygulaması [109]

Geniş açıklı yapı tasarımında; CLT döşeme panelleri ile dayanımı yüksek ve hafif yapım sistemi elde edilebilmek amacıyla katlanmış plak ya da kaset sistem uygulamaları yapılabilmektedir. Katlanmış plak CLT panel, çatı elemanı olarak kullanıldığında 15-20 m açıklık geçilebilmektedir. Bir konut yapısında, her iki yönden, yaklaşık 7 m konsolu bulunan çatı sistemi, katlanmış plak paneller ile çözümlenmiştir [117]. Bu kapsamda, sonlu elemanlar yöntemi ile birleşimlerin rijitliği analiz edilmiş ve panel bitişlerinde soğuk-şekillendirilen, ince çelik levhaların kullanılması ile dayanımın artırılacağı görülmüştür (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Katlanmış plak CLT paneller ile konsollu çatı uygulaması [117]

Glulam kirişler ve CLT döşeme panelinin birlikte kullanılması ile elde edilen kaset sistemin (Şekil 3.20) kayma dayanımının, panelden daha yüksek olduğu [118] ve 9-15 m açıklığın geçilmesinde kullanılabileceği önerilmektedir [119].



Şekil 3.20 Glulam ve CLT panelin birlikte kullanıldığı kaset sistem [118]

3.2 CLT Panel ile Yapı Kabuğu

Yapıda, kullanıcı sağlığı ve konforu ile ısısal, işitsel ve görsel gereksinmelerini karşılayan yapı kabuğu; yapının iç ve dış çevresini birbirinden ayıran, yatay, düşey ve eğimli yapı elemanlarından oluşmaktadır. Taşıyıcı sistem elemanları, duvarlar, kapı ve pencereler ile çatı ve yapının, toprak ile etkileşen kat döşemesi yapı kabuğunu oluşturur. Tez çalışmasının bu bölümünde; CLT duvar ve döşeme panelleri ile oluşturulan, ısı yalıtımlı yapı kabuğu ve katmanları incelenecektir.

Yapı kabuğunda sürekli ısı alışverişi gerçekleşmektedir. Soğuk hava koşullarında yapı içinden, yapı dışına doğru (sıcaktan soğuğa doğru) ısı akışı diğer bir deyişle ısı kaybı söz konusudur. Bu ısı kaybının azaltılabilmesi için yapı kabuğunun ısısal direncinin yüksek olması gerekir [120]. Yapı kabuğunu oluşturan katmanların; kalınlıkları, ısı iletkenlikleri, özgül ısıları ve yoğunluk özellikleri, kabuğun birim alanından geçen ısıyı, diğer bir deyişle yapı kabuğunun ısısal direncini etkilemektedir.

Isı geçişini etkileyen önemli özelliklerden biri, toplam ısı geçirme katsayısıdır (U , W/m^2K). U katsayısı; iç ortam ve dış ortam arasındaki sıcaklık farkının $1^\circ C$ olduğu koşulda, yapı kabuğunun birim alanından, birim zamanda geçen ısı miktarı olarak tanımlanır. U katsayısının düşmesi ya da ısı geçirme direncinin artması, kabuktan ısı akışını azaltır. Isı yalıtım uygulamalarında amaç; ısısal direncin artırılması ile U katsayısının olabildiğince azaltılmasının sağlanmasıdır. Bu amaçla yapı kabuğu katmanlarında, ısı iletkenlikleri düşük ve kalınlıkları fazla olan yapı ürünleri seçilmektedir. Isı iletkenliğini belirleyen ana özellik, ısı iletim katsayısıdır (λ , W/mK). Isı iletim katsayısı; gözeneklilik durumuna, gözeneklerin büyüklüğü ile dağılım özelliğine ve nem miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yapı ürününün nem oranı artarsa diğer bir deyişle gözeneklerindeki havanın yerini su alırsa, ısı yalıtımının etkinliği hızla azalır [120].

CLT panelin ısı yalıtımı ve ısı kütle özelliklerini, paneli oluşturan ana ağacın özellikleri belirlemektedir [13]. Panelin oluşturan ahşap tabakaların lif yönleri; liflere dik (enine ya da teğet) ya da liflere paralel yönde olmak üzere değişkenlik göstermekte; panelin ısı iletimi özelliğini, tabakalarının lif yönleri belirlemektedir.

Asıl tabakaları, karaçam türünden üretilen CLT panel ile yapılan çalışmalarda (Şekil 3.21) ısı iletimi katsayısının; enine yönde 0,104 W/mK, teğet yönde 0,111 W/mK ve liflere paralel yönde 0,122 W/mK olduğu görülmüştür [16].



Şekil 3.21 CLT panelin ısı iletkenliğinin ölçümü [16]

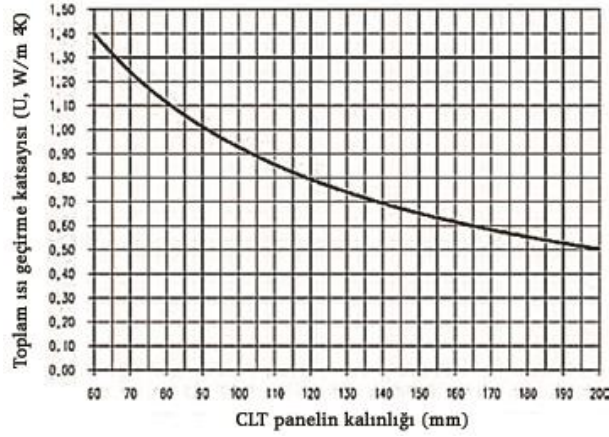
CLT panelin ısı iletim katsayısı 0,13 W/mK'dir [67, 40]. Düşük ısı iletkenliği özellikleri ile yapı kabuğu tasarımlarında, panel üzerinde uygulanacak ek ısı yalıtımının kalınlığının azaltılabilmesi sağlanmaktadır (Tablo 3.1). Paneller, diğer hafif yapım sistemleri ile karşılaştırıldığında; daha homojen yapıda oldukları için yüzeyleri boyunca, eşit ısı dağılımı bölgeleri oluşmaktadır [12].

Tablo 3.1 CLT panel ile oluşturulan yapı kabuğunun ısısal direnç özellikleri [1]

Yapı kabuğunda gereksinim duyulan *ısısal direnç değeri	CLT panel özellikleri		Gereksinim duyulan yalıtımın kalınlığı, mm
	Kalınlığı, mm	*Isısal direnci	
2,11	50	0,42	64
	89	0,74	51
	140	1,16	38
3,52	50	0,42	114
	89	0,74	102
	140	1,16	89
4,93	50	0,42	165
	89	0,74	152
	140	1,16	140

*RSI; ısısal direnç değeridir.

CLT panelin kalınlığının fazla olması, ısısal konfor koşulları ve gereksinim duyulan ısı yalıtımının sağlanması üzerinde etkilidir. Şekil 3.22'de görülebileceği gibi panel kalınlığının artması ile birim panel alanından, birim zamanda geçen ısı miktarı azalmaktadır.



Şekil 3.22 CLT panel kalınlığı ile U katsayısı arasındaki ilişki [12]

CLT paneller ile yapı kabuğu tasarımına uygun yalıtım katmanlarının birlikte kullanıldığı uygulamalarda, iç ortamdaki havanın sıcaklığı korunarak, ısıtma ve soğutma enerjisinden kazanım sağlanabilmektedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen enerji etkin yapı uygulamalarında [26]; iç ortamdaki bağıl nem ve sıcaklık dengesinin sağlanabilmesi amacıyla çok tabakalı ve kalınlığı fazla duvar ve paneller kullanılmaktadır.

3.2.1 Yapı Kabuğu Katmanları ve Yerleşimleri

İklim verileri ile yapının bulunduğu çevre koşullarına bağlı olarak, CLT panel yapı sistemi ile yapı kabuğunu oluşturan katmanların özellikleri ve uygulanan sistem detayları farklılık göstermektedir. Bu sistemde yapı kabuğu; ısı, su ve nem yalıtımı katmanları ile yangına karşı dayanıklılık sağlayan yalıtımları içermektedir.

Isı yalıtımında; inorganik (cam yünü, taş yünü, perlit vb.), organik (pamuk keçesi, tahta lifli hafif levha vb.) ve sentetik asıllı plastik köpükler (ekspande polistren, eps), poliüretan ve ekstrude polistren (xps) kullanılmaktadır. Bu ürünlerin seçiminde; ısı iletkenliğinin az olmasının yanı sıra yangına dayanıklı, kullanım süresi uzun, hafif, ekonomik ve kolay uygulanabilen özellikte olması önemlidir. Uygulamalarda, üretimi ve kullanımı sürecinde insan sağlığı ve çevreyi olumsuz etkilemeyen yalıtım ürünlerinin seçilmesi sağlanmalıdır [120]. Tablo 3.2'de ısı yalıtımı uygulamalarında kullanılan ürünler ve özellikleri görülmektedir. Isı yalıtımlarının karşılaştırıldığı bir çalışmada; en iyi yalıtımı sağlayan ürünün taş yünü olduğu görülmüştür. Taş yünüyle, xps ve eps izlenmektedir [121].

A.B.D. ulusal iklim sınıflandırmasına göre; yapı kabuğunun dış ortam yalıtımında xps, tüm iklim türlerinde uygulanabilirken; eps'nin sıcak ve nemli iklim bölgelerinde kullanılmaması; taş yününün ise soğuk, soğuk ve ılıman bölgelerde kullanılması önerilmektedir [122]. Bununla birlikte arojel ısı yalıtımı kullanımı ile ekonomik çözümler de geliştirilebilmektedir [123].

Tablo 3.2 Isı yalıtım ürünleri ve özellikleri [38, 124, 125]

Isı yalıtımı	Yoğunluk, kg/m ³	Isı iletkenlik katsayısı, W/mK	Su buharı geçirgenliği direnci, μ	Yangına karşı dayanıklılık
Ahşap yünü/lifli panel	110-460	0,035-0,090	2-5	-
EPS panel	$15 \geq D \geq 30$	0,035-0,040	20-100	E ve B1 sınıfı
XPS panel	≥ 25	0,030-0,040	80-250	E sınıfı
Poliüretan (PUR)	≥ 30	0,025-0,040	30-100	B1 ve B2 sınıfı
Cam köpüğü	120-150	0,052-0,079	-	A1 sınıfı
Cam yünü	8-500	0,035-0,050	1	*A1 ve A2 sınıfı
Taş yünü	80-500	0,045-0,055	5-10	B2 sınıfı
Mantar	60-80	0,017-0,020	5	C sınıfı
Arojel	210	$\leq 0,0053$	-	-





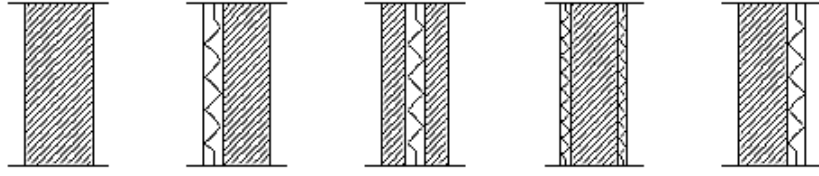






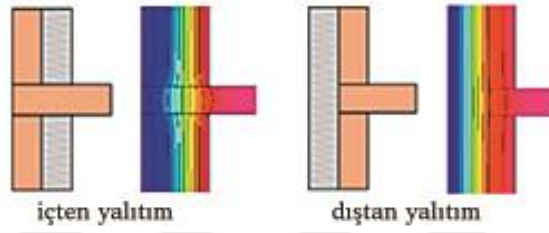
*Yaşam alanlarında, alçı levhalar ile kaplanarak kullanılması önerilmektedir.

Yapı kabuğu tasarımında; ısı yalıtımının yeri, türü ve kalınlığının belirlenmesi ile doğru uygulama detaylarının geliştirilmesi önemlidir. Yapı kabuğunda ısı yalıtımı; dışta, içte ya da ortada uygulanabilir (Şekil 3.23). Kabuğun çok katmanlı olması durumunda yalıtım, katmanların arasına da yerleştirilebilmektedir. Dışarıdan yalıtım yönteminde; yapı elemanının gövdesi ısınır ve ısıtmaya ara verildiği dönemde eleman, iç ortama doğru ısı vermeye devam eder. Bu durumda; yapı kabuğu içinde yoğuşma riski ve ısı köprüleri oluşma durumu ortadan kalkar. Dışarıdan yalıtımın yapılamadığı uygulamalarda kullanılan içeriden yalıtım yönteminde; yapı elemanının gövdesi ısıtılmadığından, ısıdan yararlanma etkisi ortadan kalkar. Bu durumda, döşeme elemanlarında yalıtımın sürekliliği sağlanamadığı için ısı köprüleri gerçekleşir ve döşeme kesiti içinde yoğuşma riski oluşur. Bu nedenle iç ortamda buhar direnci yüksek, buhar kesici işlevini görecektir yalıtım ürünleri seçilmelidir [120].



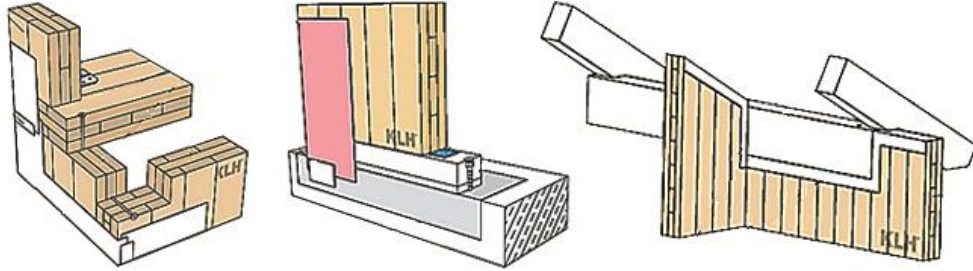
Şekil 3.23 Yapı kabuğunda ısı yalıtımı uygulamaları [123]

CLT paneller ile oluşturulan yapı kabuğunda, ısı geçişinin en fazla yapı birleşimleri nedeniyle gerçekleştiği belirtilmektedir [16]. Şekil 3.24'te duvar ve döşeme elemanlarının iç ve dıştan yalıtımında, sıcaklık eğrilerinin dağılımı görülmektedir. Etkin ısı yalıtımının sağlanabilmesi için paneller, dıştan yalıtılmalıdır.



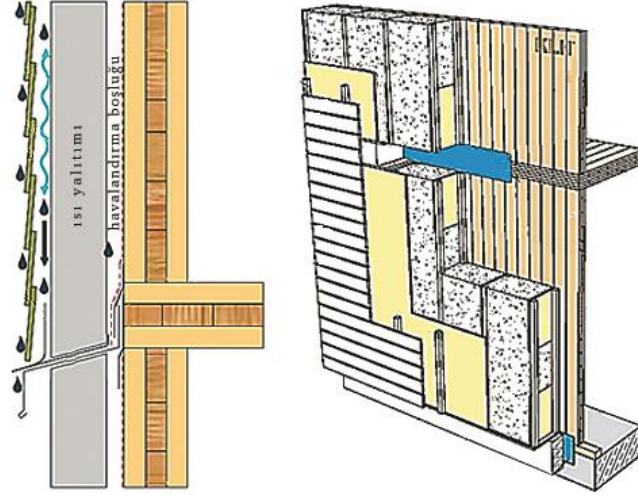
Şekil 3.24 CLT panellerin iç ve dıştan yalıtımının karşılaştırması [16]

Panel kalınlıklarının fazla olmadığı uygulamalarda, dış ortam ile etkileşen tüm yüzeyler, bağımsız tabakalardan oluşan ısı, su ve nem/su buharı yalıtımları ile kaplanmaktadır (Şekil 3.25).



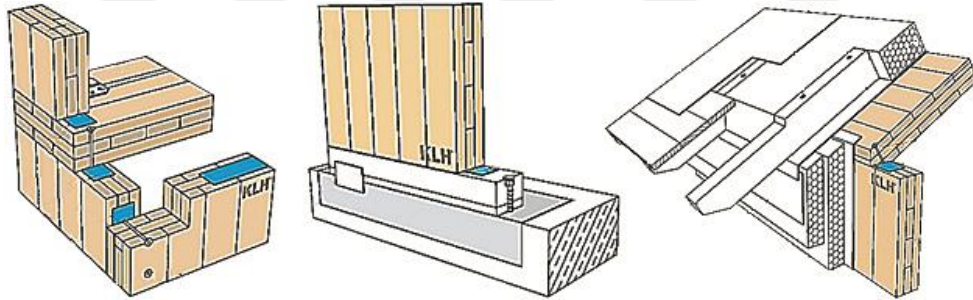
Şekil 3.25 CLT panel yapı sisteminde yalıtım uygulamaları [12]

Nem ve küf oluşumunun önlenmesi için yapının cephesinde, havalandırma boşluğunun tasarlanması ya da nem geçirgenliği uygun yalıtım katmanlarının kullanılması sağlanmalıdır. Duvar panelinin fiziksel ve mekanik özelliklerinin korunabilmesi amacıyla; panelin, dış ortama bakan yüzeyinin tümüyle buhar yalıtımı ile kaplanması önemlidir. Şekil 3.26'da CLT duvar panelleri ile oluşturulan yapı kabuğu katmanları görülmektedir.



Şekil 3.26 CLT panel ile yapı kabuğu oluşturma [2,12]

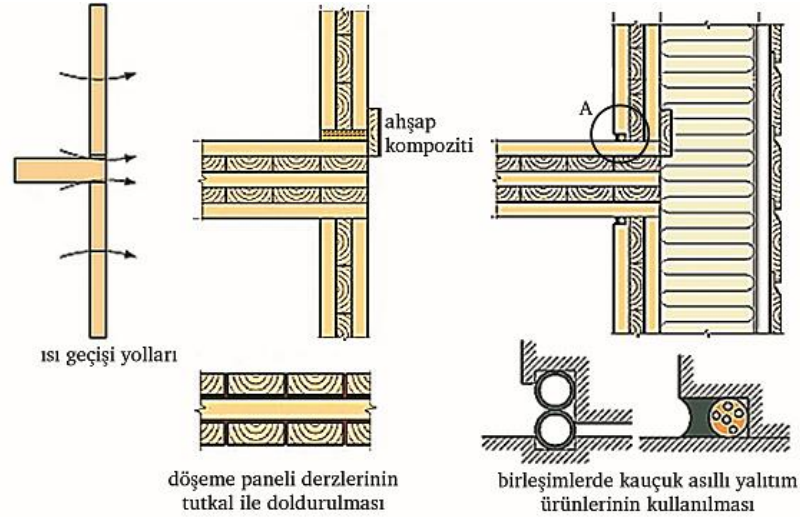
Panel kalınlıklarının, yapı kabuğu gereksinimlerini karşılayabildiği durumlarda, panellerin, tüm köşeleri ile duvar-döşeme birleşimi yerlerinde, yalıtım bantları ya da kauçuk asıllı, esnek yalıtım ürünleri kullanılmaktadır (Şekil 3.27). Etkin ısı yalıtımının sağlanabilmesi için yalıtım bandının, panel kalınlığının merkezine gelecek şekilde uygulanmasına özen gösterilmelidir.



Şekil 3.27 CLT panel birleşimlerinde ısı yalıtımı bandı uygulamaları [12]

CLT panellerin birleşimlerinde, ısı köprüsü oluşumunun önlenmesi amacıyla; yalıtım katmanının sürekliliğinin sağlanması ve kesintiye uğradığı kapı, pencere, baca, tesisat boşluğu vb. alanlarının risk yaratmayacak biçimde detaylandırılması sağlanmalıdır. Panel birleşimlerinde gerçekleşen ısı geçişinin incelendiği bir araştırmada [126]; panel tabakalarının derzlerinin, tutkal ile doldurulması, duvar-döşeme birleşimde esnek yalıtım ürünü ya da ahşap kompozitlerin kullanılması ve birleşim bölgesinin, ahşap kompozit parça ile korunması yöntemlerinin, ısı geçişini önemli ölçüde azalttığı belirtilmektedir (Şekil 3.28). Panel birleşimlerinde

oluşabilecek ısı köprüleri, ayrıntılı hesaplamaları ve alınabilecek önlemlere ilişkin bilgiler, ISO 6946 [70] ve ISO 10211[127]'de yer almaktadır. Ayrıca enerji etkin yapı tasarımı kapsamında; uygulama sonrasında, birleşimlerdeki yalıtımların sızdırmazlık etkinliğini ölçen deneyler de gerçekleştirilmektedir [12].



Şekil 3.28 CLT panel birleşimlerinde ısı yalıtımı uygulamaları [126]

CLT panel birleşimlerinde oluşan ısı köprüsünün incelendiği bir çalışmada; birleşimlerde, düşük ısı iletkenliği ile vida kullanımının, ısı köprüsünün doğrusal yolunda farklılık yaratarak, yalıtıma katkı sağladığı belirtilmektedir [16].

3.2.2 İç ve Dış Ortam Koruma Yöntemleri

Ahşap elemanların korunmasında; ağacın, ısısal ya da kimyasal işlemler ile hücre duvarı yapısının değiştirilmesi, emprenye uygulaması ve ahşabın kaplanması olmak üzere üç yöntem kullanılmaktadır [87]. Ahşabın korunmasında kullanılan kimyasal maddelerin ve bileşiklerinin, insan sağlığı üzerinde olumsuz etki yaratmayacak ve çevresel sorunlara neden olmayacak nitelikte seçilmeleri çok önemlidir. Mimari ve taşıyıcı sistem gereksinimlerine uygun seçilen ahşap yapı elemanları ile oluşturulan yapılar; doğru detay uygulamaları ve etkin koruma yöntemlerinin sağlanması ile yüzyıllardır ayakta kalmayı başarabilmektedir.

Ahşabın su emiciliği, su buharı geçirgenliği ile karşılaştırıldığında, nem oranını daha kısa sürede yükseltir. CLT panel yapı sistemi uygulamalarında ana ilke;

panelin su ve nem ile etkileşiminin önlenmesidir. Panelin ıslanması, kuruması ve ardından yeniden ıslanarak kuruması döngüsü sonucunda, nem oranının kısa sürede değişmesi ile ahşapta genleşme ve büzülme gerçekleşir. Bu durum, CLT panelin fiziksel ve mekanik özelliklerini değiştirir ve panel birleşimlerinde sorunlar yaratır [2]. Uygulama alanına taşınmadan önce fabrikada, koruyucu kaplamalar ile sarılan paneller; kamyon, tır vb. araçlar ile taşınması sürecinde de korunmalıdır (Şekil 3.29). CLT panellerin, yapım alanına taşınması, saklanması ve yerinde uygulanması ile yapıda kullanılmaları sürecinde, aşırı ıslanma durumundan korunmaları çok önemlidir.

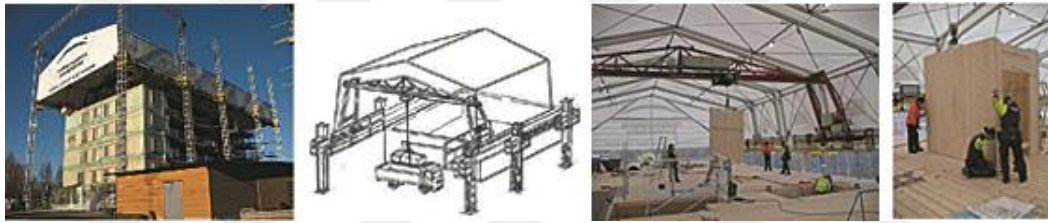


Şekil 3.29 CLT panellerin dış ortam koşullarından korunması [2]

Tabakalarının birleşim yerleri ve panel bitişleri ile yüzeyindeki açıklıklardan, CLT panel içerisine su girişi olabilir. Su girişinin en kolay olduğu panel bitişlerinde, ince kesitli su yalıtımının kullanılması, ıslanan panelin kuruma süresini uzatabilmektedir. CLT paneller, diğer ahşap kompozitleri ile karşılaştırıldığında; kalınlığı ve kütesinin fazla olması nedeniyle daha uzun sürede kuruyabilmektedir. Bu nedenle su yalıtımında, ıslanan panelin kuruyabilmesini sağlayacak, buhar geçirgenliği olan ürünler kullanılmalıdır. Düşük buhar geçirgenliği olan bir katmanın seçilmesi durumunda; yalıtımın uygulanmasından önce, panellerin kuru olması gerekmektedir. Islanan panel üzerine uygulanan yalıtım katmanının, elemana, tam olarak yapışamayacağı göz önüne alınmalıdır. Farklı ağaç türlerinden üretilen duvar panellerinin, nemli iklim bölgesindeki uzun dönem kuruma etkinliğinin belirlenmesi amacıyla; paneller, yüzey nemi %30'a ulaşacak biçimde ıslatıldıktan sonra, su yalıtımı uygulaması yapılmış ve bir yıl boyunca dış ortam koşullarında bekletilmiştir. Sıcaklık ve nem değişiminin izlendiği deney

çalışmalarının sonucunda; panellerin çoğunun bir ay içerisinde %26 nem oranına ulaşacak düzeyde kuruyabildiği gözlemlenmiştir [128].

Yalıtımların uygulanması öncesinde, ıslanan çatı panellerinin kuruyabilmesi için yapıda, geçici bir örtü oluşturulabilmektedir [2]. Aynı zamanda vinç işlevi görecektir şekilde tasarlanabilen koruyucu örtü, yapım süresi ve maliyetini de azaltmaktadır. Bu kapsamda Limnologen Projesi'nde, panellerin ağırlığının en fazla 2 ton olduğu hesaplanarak; koruyucu örtü, 3,3 ton'luk bir vinç sistemini taşıyabilecek özellikte yapılmıştır [108]. Bir diğer örnek olan İsveç'te, CLT panel yapı sistemi kullanılan sekiz katlı yapının koruyucu örtüsü, düşeyde hareket edebilen bir sistem olarak düşünülmüştür [129]. Şekil 3.30'da vinç işlevi gören koruyucu örtü ile düşeyde hareket edebilen sistem görülmektedir. Bununla birlikte yapım çalışmalarının tasarlanan süre içerisinde bitirilmesi, CLT panellerin korunması üzerinde etkilidir.



Şekil 3.30 CLT yapım sisteminde koruyucu örtü uygulamaları [2,108,129]

Düşük emicilikte püskürtme ve daldırma yöntemi ile kısa süreli basınçlı işlemler uygulanan yapısal ahşapta, koruyucu maddenin panel içerisine kolaylıkla girebilmesi için uygun ısı ve nem koşullarında saklanması çok önemlidir. Bununla birlikte geleneksel basınçlı koruma yöntemlerinin, CLT paneller için uygun olmadığı da bilinmektedir [2]. Kısa süreli su etkileşiminin, panelin dayanıklılığı üzerinde, uzun süreli bir etkiye neden olmayacağı belirtilse de [13]; su ve nem etkileşimine karşı, yüzey koruma yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir. Yüzey koruma yöntemleri, termitlere ve ahşapta çürüme oluşumu karşı etkili olamasa da yüzey küfünün gelişmesini engelleyebilmektedir.

Glulam elemanların üretiminde kullanılan su bazlı koruyucular, CLT panel üretiminde de kullanılabilir; ancak içeriğindeki koruyucu maddelerin, tutkalın dayanımı üzerinde olumsuz etki yaratmaması sağlanmalıdır. Genleşmeye karşı dayanıklı yağ bazlı koruyucuların, insan sağlığını olumsuz etkilemesi nedeniyle

panellerde kullanılmamaları önerilmektedir. CLT panelde küf oluşturabilecek nem kaynağına karşı, borat-glikol yüzey işlemleri uygulanmış bor ya da bor-bakır çubuklar da kullanılabilir [2].

CLT panellerde, yüzey koruma işlemlerinin etkinliğinin araştırıldığı bir çalışmada; yüzey düzeltme işlemleri yapılmayan ahşap tabakalara, boran katkılı koruyucu sürülerek üretilen panel ile daldırma yöntemi uygulanan örnek karşılaştırılmıştır. Sonuçta; daldırma yönteminin, panelin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkileyen biyolojik etkenlere karşı etkili olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte ahşap tabakalarda, boran katkılı koruyucu uygulanmasının yapışma direncini azalttığı da belirtilmektedir [130]. CLT üretiminde, ısı işlem görmüş ahşabın çekme ve eğilme dayanımının incelendiği çalışmaların sonucunda; masif (ısı işlem görmemiş) örnekler ile karşılaştırıldığında, ısı işlem görmüş ahşap ile üretilen deney örneklerinin, mekanik özelliklerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte poliüretan tutkalla ek olarak, silan yüzey koşullandırıcı astar kullanımının, tutkalın yapışmasını arttırdığı ve CLT panelin mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [97, 131].

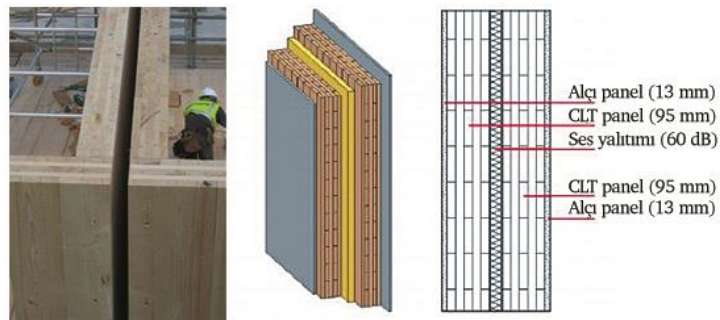
Farklı iklim özellikleri ve çevresel koşullarda gerçekleştirilen uygulamalarda, ahşabın dayanıklılığını olumsuz etkileyen biyolojik etkenlerin, önem sıralaması değişebilmektedir. Örneğin A.B.D.'de, böcek ve termitler ile karşılaştırıldığında mantarlar, ahşapta daha fazla sorun yaratmaktadır [2]. Termit varlığının risk oluşturduğu uygulamalarda, ahşap yapı elemanları; temel sisteminde, taş ya da paslanmaz çelik fiziksel engellerin oluşturulması ya da toprağa, koruyucu kimyasal maddelerin karıştırılması yöntemleri ile korunabilmektedir [132].

CLT panellerin, yoğunlaşma riskine karşı soğuk yüzeyler (betonarme bodrum kat tavanları, temele yakın döşemeler vb.) ile doğrudan etkileşiminin önlenmesi gerekmektedir. Temel uygulamalarında, su ve nem etkileşiminin önlenmesi amacıyla karaçam travers kullanılabilir [12]. Ayrıca panellerin, bitmiş döşeme kotundan en az 15 cm yukarıda olacak biçimde yerleştirilmesi sağlanmalıdır. Bununla birlikte nemli ve yağışlı iklim bölgelerinde tasarlanan yapılar ile termit riski olan uygulamalarda eşik yapılması önerilmektedir. Islak hacimlerde, döşeme

panellerinin yalıtımlarının yanı sıra su akışı hızı ile sıçrama olasılığının fazla olduğu yerlerde (duş, küvet vb.); döşemeden gelen su yalıtımı, duvar boyunca kesintiye uğramadan devam etmelidir. Su tesisatında oluşabilecek sorunlarda, drenajın nasıl yapılabileceği tasarım aşamasında düşünülmeli ve uygulama sürecinde gerekli önlemler alınmış olmalıdır. Döşeme kaplamalarının birleşimlerinden geçerek, panele ulaşan su, CLT panelin fiziksel ve mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Su ile etkileşimde olan döşeme kaplamalarının, doğrudan, panel üzerine yerleştirilmemesi; panel ile kaplama arasında, koruyucu panel (lif yonga, alçı, çimento asıllı vb.) kullanılması önerilmektedir [2, 12].

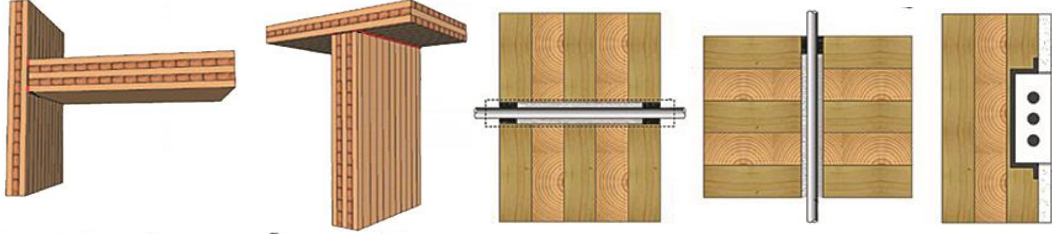
3.2.3 Yangına Dayanıklı Yapı Kabuğu

CLT panelin yangın dayanımı özellikleri Bölüm 2.2.3'te ayrıntılı incelenmiştir. Yangına karşı dayanıklılığın artırılması amacıyla CLT paneller, koruyucu paneller (alçı panel vb.) ile kaplanmakta ya da elemanın yangın ile etkileşimde bulunacağı yüzeyine, koruyucu ürünler sürülmektedir. CLT panelin yalıtımla kaplanmadığı, görünür olduğu uygulamalarda; yüzeyine bor/antimon katkılı yangın geciktirici ürünler sürülmektedir. Bor katkılı yangın geciktiriciler, ahşapta çürüme oluşumu ile termit sorunlarına karşı önlem alınmasında da kullanılmaktadır [2]. Antimon oksit katkılı alev geciktirici boyalar, ateş ile etkileşimde yanıcı olmayan gazlar yayar. Ahşap yapıların yangından koruma yöntemleri Eurocode 5[61]'te; iç ve dış ortam koşullarında uygulanması önerilen yangın geciktirici yöntemler ise EN 15912[133]'de yer almaktadır. CLT panel yapı sisteminde, yangın duvarı (kompartımanı) uygulamaları yapılabilmekte olup; Şekil 3.31'de paneller ile oluşturulan R90 yangın dayanımlı uygulama görülmektedir.



Şekil 3.31 CLT paneller ile yangın duvarı uygulaması [106]

CLT panellerin birleşimleri, yapım sistemine göre değişebilmekle birlikte, birçok farklı birleşim türü ile sağlanmaktadır. Yangın güvenli tasarımda, özellikle gizli birleşimlerin kullanılması önerilmektedir. Ayrıca birleşimlerde yangının yayılımını önleyerek, yanmayı durdurabilen yalıtımlar da kullanılmaktadır (Şekil 3.32).



Şekil 3.32 Birleşimlerde yangın durdurucu yalıtım uygulamaları [106]

Yangına karşı dayanıklılığın sağlanması amacıyla, CLT panellerin alçı panel ile kaplanması ve yüzeyine, alçı sıva uygulamasının yapılması çoğunlukla kullanılan yöntemlerdir. Özellikle CLT taşıyıcı duvarların, her iki yüzeyinde de yangına karşı dayanıklı yalıtım uygulamalarının yapılması önemlidir. Bununla birlikte yapıda, mekanik ve elektrik tesisatı boşluklarının yalıtılması ile yangın güvenli pencere ve kapı sistemlerinin seçilmesi sağlanmalıdır.

CLT panel yapı sisteminin yangın davranışı ile ilgili kapsamlı araştırmalar [1,134,135] yapılmaktadır (Şekil 3.33). İtalya’da yürütülen deneyler kapsamında [136]; CLT paneller ile 1:1 ölçekte uygulanan, üç katlı ahşap yapının birinci katında, bir yangın odası tasarlanmış ve bu odanın döşeme ve duvar panelleri, bir/iki katlı, yangına dayanıklı alçı paneller ile kaplanmıştır. Sonuçta; yangının yayılma hızının azaltılması ile diğer odalara yayılımının engellenmesinde, alçı panel kullanımı ve alçı sıva uygulanmasının oldukça etkili olduğu görülmüştür.



Şekil 3.33 CLT panel yapı sistemlerinin yangın deneyleri [134-136]

CLT PANEL YAPI BİRLEŞİMLERİ VE DENEYSEL İNCELENMESİ

4.1 CLT Panel Yapı Birleşimleri

Mimari ve taşıyıcı sistem tasarımına uygun seçilen CLT panellerin, fiziksel ve mekanik özellikleri ile doğru birleşimler kullanılarak bir araya getirilmeleri; yapıya etkiyen kuvvetler altında davranışı belirlemektedir. Yapı birleşimleri, yapım sistemine (ahşap, betonarme, çelik, prefabrike vb.) göre farklı özellikteki birçok birleşim türü ile sağlanmaktadır.

CLT paneller; diğer yapısal ahşap elemanlarda olduğu gibi, metal ürünler (çelik köşebent, birleşim levhaları vb. ile çivi/vida/kavela vb.) kullanılarak birleştirilir. Birleşim ürünlerinin teknik özellikleri ve uygulamada kullanılacak birleşim türü, taşıyıcı sistem hesaplamaları sonucunda belirlenmektedir.

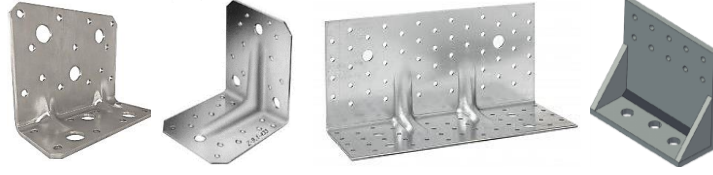
4.1.1 Birleşim Ürünleri

CLT panel birleşimleri; yönetmeliklere uygun üretilen çelik köşebent, güçlendirilmiş L köşebent ve metal birleşim levhaları ile uygun çivi, vida, bulon ve kavela vb. kullanılarak sağlanabilmektedir.

4.1.1.1 Çelik Köşebentler

Duvar-döşeme ve çatı-duvar paneli birleşimlerinde kullanılan çelik köşebentler; eşit kollu ya da kayma dayanımının artırabilmesi amacıyla bir boyutu diğerinden daha uzun biçimde üretilmektedir. Duvar panellerinin betonarme döşeme ile birleşiminde, panelin yaklaşık kalınlığı kadar boyutta çelik köşebentler kullanılmaktadır [64]. Çivi, vida vb. ile birleştirilebilmeleri için köşebent üzerinde, tasarlanan birleşim türüne uygun boyutta ve sayıda delikler bulunur. Bu deliklerden büyük boyutlu olanlar vidalı, küçük olanlar ise çivili birleşimler için üretilmiştir. Kalınlıkları, 2-4 mm arasında değişebilen çelik köşebentlerin

dayanımının artırılabilmesi amacıyla; ortasında, güçlendirilmiş alanlar oluşturulabilir ya da köşebentin her iki yanında üçgen biçimli güçlendirme parçaları kullanılabilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 CLT panel birleşimlerinde kullanılan çelik köşebentler

Yapının, düşey ve yatay yüklere karşı davranışına uygun özellikte seçilmiş, uygun sayıda ve biçimde yerleştirilmiş çelik köşebentler ile yüksek dayanımlı ve enerji sönmüleyebilen CLT birleşimler elde edilebilmektedir. Çelik köşebentler arasındaki uzaklık, taşıyıcı sistem hesaplamaları ile belirlenmekte olup; çoğunlukla 100-150 cm olarak uygulanmaktadır [12].

Kayma dayanımının artırılması amacıyla L köşebentlerin iki yanında, üçgen biçimli güçlendirme parçaları bulunur (Şekil 4.2). Yatay kuvvetler altında, duvar panelinin yukarıya doğru hareketi ile oluşabilecek devrilme riskini azaltmak amacıyla; duvar bitişleri ile kapı boşluğunun yakınlarında uygulanmaktadır. Güçlendirilmiş L köşebentin kalınlığı 2-4 mm olmakla birlikte gereksinimlerine göre döşeme ile birleşimini sağlayan parçası, daha kalın üretilmektedir.



Şekil 4.2 CLT panel birleşimlerinde kullanılan güçlendirilmiş L köşebentler

4.1.1.2 Metal Birleşim Levhaları

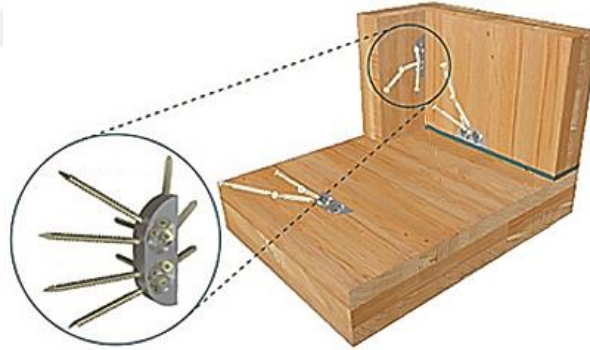
Duvar-duvar ve duvar-döşeme panellerinin birleşiminde kullanılan ve kalınlığı 6-12 mm aralığında değişen metal birleşim levhaları; bir yüzeyden oluşabileceği gibi U ve T biçimlerinde de üretilmektedir (Şekil 4.3). Levha boyutları, yapım

sistemi ve birleşimin türüne göre değişkenlik göstermektedir. Üzerindeki delikler, birleşim levhasının fabrikada üretimi sırasında açılacağı gibi; deliksiz levhaların uygulama yerinde çivi ya da vidalar ile delinerek birleştirilmesi de yapılabilmektedir. Kayma dayanımı yüksek T biçimli parçalar ile gizli birleşimler yapılmaktadır. Yangına dayanıklı yapı tasarımında, özellikle gizli birleşimlerin kullanılması önerilmektedir.



Şekil 4.3 Metal birleşim levhaları ile uygulanan CLT panel birleşimleri

Son yıllarda depreme dayanıklı ahşap yapı uygulamaları kapsamında, CLT panel birleşimlerinin geliştirilmesi amacıyla; farklı açılarda çivi/vida uygulamasının yapılmasını sağlayan metal ürünler tasarlanmaktadır (Şekil 4.4). Bu ürünler aynı zamanda uygulamada kolaylık da sağlamaktadır.



Şekil 4.4 CLT panel birleşimlerinde farklı açıda çivi/vida uygulaması [137]

Duvar panelleri ile lentoların birleşiminde, çivi/vida ile birleştirilen iki parçalı metal ürünler de kullanılabilir. Şekil 4.5'te iki parçalı birleşim ürününün; (a) birleşim öncesindeki görünümü, (b) CLT duvar-duvar paneli birleşimi ile (c) lento birleşimi görülmektedir. Ancak metal parçanın, birleşimdeki yerleştirilme yönüne karşı gelebilecek yapı yükleri altında iyi davranış gösteremeyeceğinden; bu birleşimin yatay yükler altındaki CLT panel uygulamalarında kullanılmaması önerilmektedir [138].



Şekil 4.5 İki parçalı metal birleşim ürünü [137,138]

4.1.1.3 Çiviler ve Vidalar

Mimari ve taşıyıcı sistem gereksinimleri ile birleşimin türüne göre değişmekle birlikte CLT paneller; çoğunlukla çivi ya da vida ile birleştirilmektedir. Farklı fiziksel ve mekanik özellikleri ile çivi ve vidalar, birleşimlerin yapı yükleri altında davranışının sağlanması üzerinde etkilidir. Farklı gereçlerden üretilen, baş ve uç yapısı ile gövde özellikleri (boyut, kaplama vb.) ile CLT panel yapı sistemi için tasarlanmış birçok çivi/vida türü bulunmaktadır (Şekil 4.6). Diğer vidalar ile karşılaştırıldığında maliyeti yüksek olsa da paslanmaz çelik vidalar, yapım süresini kısalttıkları ve dış çevre koşullarına karşı daha dayanıklı oldukları için yaygın kullanılmaktadır.



Şekil 4.6 CLT panel birleşimlerinde kullanılan çivi/vida örnekleri

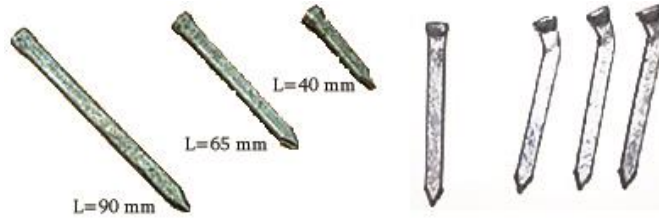
Vida adları, üreticisine göre değişebilmekle birlikte CLT birleşimleri için tasarlanmış özel vidalar (STS) kullanılmaktadır. Diğer vidalar ile benzer görünümde olsa da STS'nin gövdesindeki diş yapısı ile vida ucu biçimi, ahşap vidalarından farklıdır. Sert metalden yapılan sivri ucu ile uygulama sırasında ahşap liflerini delerek, panel içerisinde kolaylıkla ilerleyebilmeyi sağlamaktadır. Böylelikle CLT panelde önceden bir delik açılmasına gerek kalmadan uygulama yapılabilmektedir. Diş yapısı ile vidanın, çekme kuvveti uygulanarak CLT panelden

çıkarılması oldukça zordur. Panel birleşimlerinde çivi ve vidalar, yüksek basınçlı taşınabilir çivi/vida tabancaları kullanılarak uygulanır. Vidanın sıkıştırılması için somun gibi ek bir parçaya gereksinim duyulmamaktadır.

4.1.1.4 Perçin, Bulon ve Kavelalar

Panellerin birleşiminde çelik köşebentler, perçinler kullanılarak da birleştirilebilir [139]. 1960 yılında geliştirilen ve daha çok glulam elemanların birleşimlerinde kullanılan perçinler; yassılaştırılmış oval gövdeli, konik başlı ve yüksek mukavemetli çelik çivilerdir. Vida ile karşılaştırıldığında perçin, yassı gövdesi ile panel içinde ilerlerken; lifleri kesmeden, sadece iterek ahşap içine yerleşmektedir. Konik biçimli başı, yükleme altında birleşimde perçinin dönmesini engelleyerek; birleşimin rijitliği ve dayanımının artmasını sağlamaktadır.

Perçinlerin uzunlukları, 40-90 mm arasında değişebilmektedir. Birleşimlerde; en az 6,4 mm kalınlığında, yumuşak çelik birleşim levhası ile kullanılan sıcak daldırma galvanizli perçinin, sertliği (Rc) 32-39 aralığında; çekme dayanımı ise en az 1.000 MPa olmalıdır [140]. Şekil 4.7'de birleşimlerde kullanılan perçin ile birleşim deneyleri sonrasında, perçinlerde oluşan akma şekil değişimi görülmektedir.



Şekil 4.7 Birleşimlerde kullanılan perçinler ve şekil değişimi [140,141]

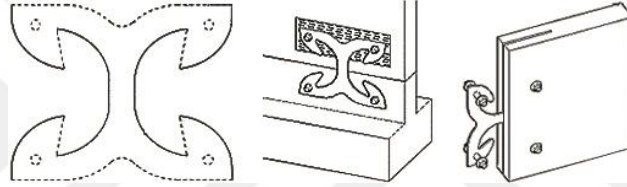
Ahşap çerçeve sistem birleşimlerinde yaygın kullanılan bulon ve kavelalar, yatay yüklere karşı dayanımın sağlanabilmesi amacıyla CLT panellerin birleşimlerinde de uygulanmaktadır. Bulonlar, mekanik dayanımları yüksek vidalar olarak tanımlanır ve panelin, betonarme ve çelik ile birleşimlerinde kullanılır. CLT panellerin, çelik yapı elemanları ile gizli birleşimlerinde özel üretilmiş çelik kavelalar kullanılabilir (Şekil 4.8). Bununla birlikte ahşap yapım sisteminde, ahşap kavela kullanılan birleşimlerle de karşılaşmaktadır.



Şekil 4.8 CLT panel birleşimlerinde bulon ve kavela uygulamaları [12,142]

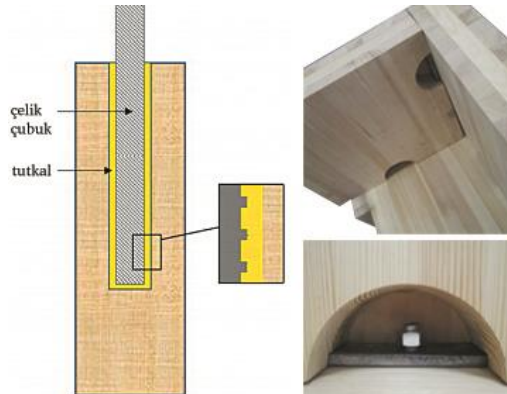
4.1.1.5 Yenilikçi Birleşimler

Büyük boyutlu duvar panellerinin yatay birleşimlerinde; yatay yükler altında, kayma dayanımının artırılması amacıyla yeni birleşim ürünleri geliştirilmektedir. Bu kapsamda üretilen X biçimli çelik köşebent (Şekil 4.9) ile gerçekleştirilen CLT duvar-temel birleşimlerinin, çevrimsel yükler altındaki davranışı, diğer çelik köşebentler ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta; üretilen yeni birleşimin, sünek davranış gösterdiği ve önemli ölçüde enerji sönmüleyebildiği görülmüştür [143].



Şekil 4.9 Çelik X köşebent ile CLT panel birleşimleri [143]

Düşey yükler ile eğilme momentine karşı dayanımın artırılması amacıyla CLT panelin kenar birleşimlerinde, çelik tutkallı çubuklar kullanılmaktadır [144]. Tutkallı çubuklar ile sağlanan birleşimler (Şekil 4.10), panel kesiti alanının küçülmesi sorununa da çözüm oluşturmaktadır. Çivi ve vidalı birleşimler ile karşılaştırıldığında tutkalın kullanılması; geniş yüzey alanının birleştirilmesini sağlar.



Şekil 4.10 CLT birleşimlerinde tutkallı çelik çubuk kullanımı [144]

Deprem riski fazla olan Yeni Zelanda ve Japonya’da, CLT panel yapı sistemi uygulamalarında; ardgermeli duvar sistemi ile enerji sönümleyici çelik donatıların birlikte kullanıldığı görülmektedir. Geniş kapı ve pencere boşlukları olan duvar panellerinde, yatay yükler altında yerdeğiştirmenin sınırlandırılması amacıyla çekme donatısı da kullanılabilir [12].

4.1.2 Birleşim Türleri

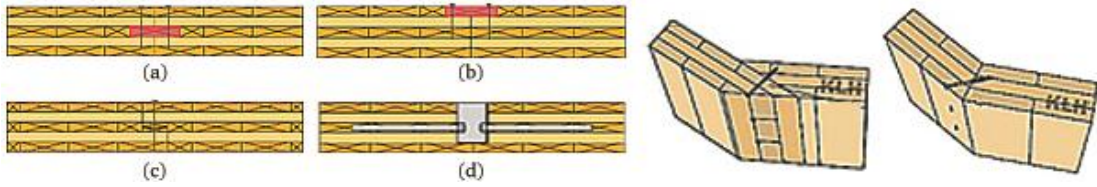
Ahşap yapım sisteminde, yatay yüklerle karşı yapı davranışının belirlenmesini, birleşimler sağlar. CLT panel birleşimlerinde, çelik eşit kollu köşebent, güçlendirilmiş L köşebent ve ahşap vidaların birlikte kullanılması ile yapının, yatay yüklerle karşı dayanımının artırılabilir belirlenmektedir [13]. Deprem sonrasında, hasar gören panel birleşimlerinin onarılması kolay olup bu durum, yapım ve işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

CLT panellerin birleşimleri, yapım sistemine (ahşap, betonarme, çelik, prefabrike vb.) göre değişebilmekle birlikte, görünür ya da gizli olmak üzere farklı birleşim türleri ile sağlanmaktadır. Tezin bu bölümünde birleşimler; CLT panel-CLT panel birleşimleri, CLT panel-yapısal ahşap sistem birleşimleri, CLT panel-betonarme sistem birleşimleri ve CLT panel-çelik sistem birleşimleri başlıkları altında incelenecektir.

4.1.2.1 CLT Panel-CLT Panel Birleşimleri

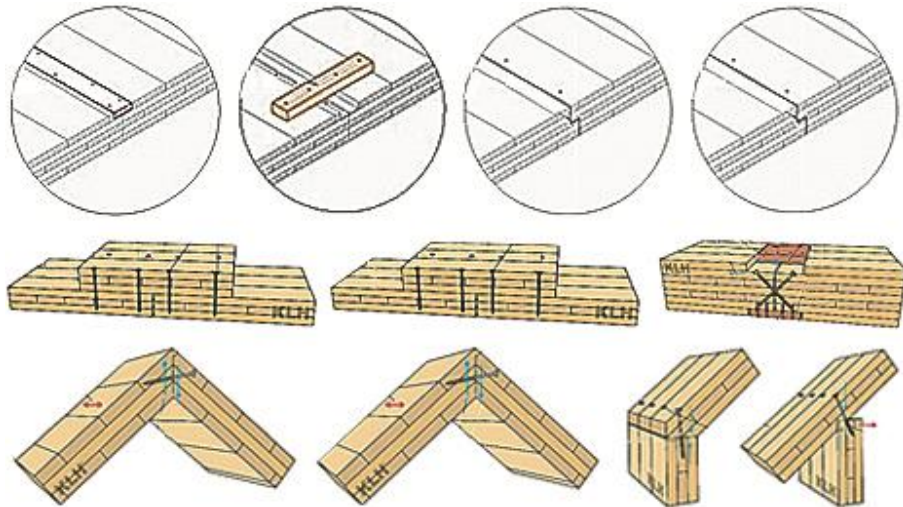
CLT duvar panellerinin birleşimleri; Şekil 4.11’de görülebildiği gibi panel içerisinde/yüzeyinde oyuk açılarak (a, b), yarım bindirme yöntemiyle (c) ya da panel içerisinde tüp sistem uygulanarak (d) yapılabilir. Panel içerisinde ya da yüzeyinde açılan oyuk, bir ya da iki tane olabilir. Uygulamada bu boşluğa, uygun boyutlarda ahşap kompozitleri (CLT, LVL, kontrplak vb.) yerleştirilerek, çivi ve vidalar ile birleşim sağlanır. Ahşap kompozitlerinin kullanılması, panelin düzlem dışı hareketi ile oluşacak iki yönlü eğilme dayanımının sağlanmasını ve moment aktarabilen birleşimlerin elde edilebilmesini sağlar [144]. Uygulama kolaylığı sağlanmasına karşın, duvar panelinin yüzeyinde açılan oyuk ile birleştirme, bir yönde kayma dayanımı sağlamaktadır. Panel yüzeyinde iki oyuk açılması ve birleşimde iki vidanın kullanılması ile rijitlik ve dayanım artırılabilir [13].

Plan düzleminde, uzun duvar elde edebilmek amacıyla; panellerin, birbirine birleştirilmesini sağlayan ve çoğunlukla metal levhalar ile oluşturulan birleşimler de kullanılmaktadır. Yarım bindirme yöntemiyle yapılan birleşimlerde, yeterli uzunlukta vida kullanılmalıdır. Tüp ile birleşimde; duvar paneli içine yerleştirilen çelik çubuklar ile birleşimi sağlayan metal parça kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemin, panel kesitinde azalmaya neden olduğu göz önüne alınmalıdır.



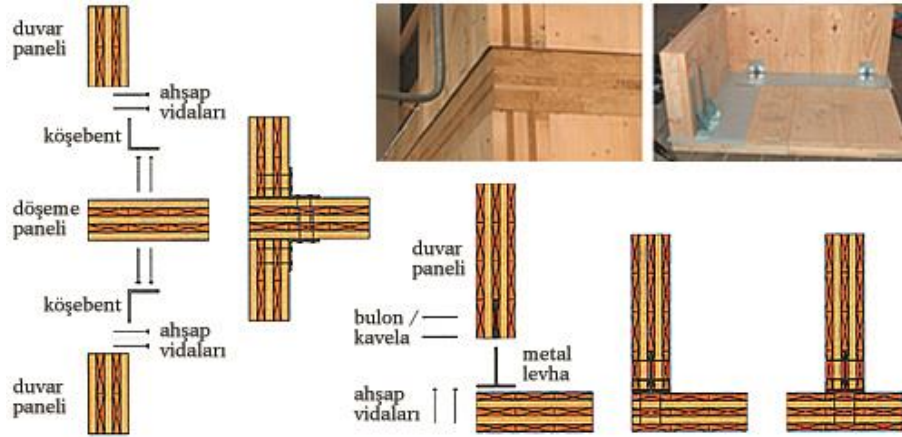
Şekil 4.11 CLT duvar paneli birleşimleri [2,12]

Döşeme panelleri ile iki yönlü eğilme dayanımı olan ve yatay yüklere karşı, rijit diyafram davranışı gösterebilen döşeme sistemi elde edilebilmektedir. Bu davranışın oluşmasında, panelleri bir araya getiren ve birlikte çalışmalarını sağlayan birleşimlerin, yük aktarımındaki etkinliği söz konusudur. CLT döşeme panelleri, duvar panelleri ile benzer yöntemler ile birleştirilmektedir. Panel birleşimlerinde eğilme dayanımının artırılabilmesi amacıyla ahşap kompozitleri ile açılı çivi/vida uygulamaları yapılabilmektedir. Asma tavan uygulamalarında, metal askı parçalarının doğrudan panele birleştirilmemesi, birleşim yerinin korunabilmesi için döşeme paneli ile arasında ahşap kompozit yerleştirilmesi gerekmektedir (Şekil 4.12).



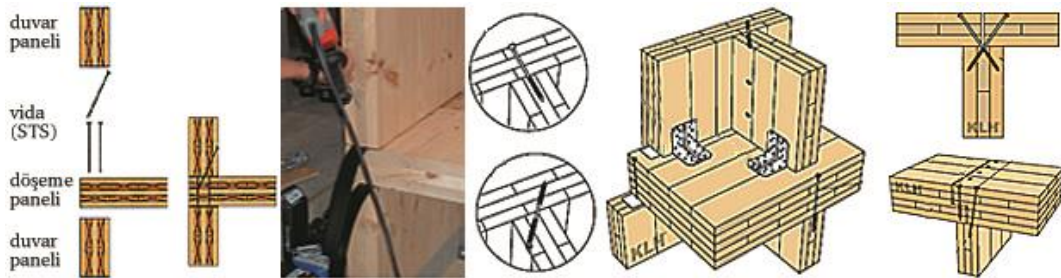
Şekil 4.12 CLT döşeme ve çatı panellerinin birleşimleri [12]

CLT duvar-döşeme paneli birleşimleri (Şekil 4.13); çelik köşebent, güçlendirilmiş L köşebent ve metal birleşim levhaları ile uygun özellikteki çivi, vida, bulon ve kavela kullanılarak sağlanabilmektedir.



Şekil 4.13 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri [1,12,26]

Birleşimi sağlayan çivi/vidalar; panellerin dar kenarını birleştirecek biçimde, döşeme panelinin yüzeyine dik ya da döşeme elemanı ile 45° açı oluşturacak biçimde uygulanmaktadır (Şekil 4.14). Kullanılan çivi ya da vida, uzunluğu ve yatayda döşeme ile arasındaki uygulama açısına bağlı olarak, döşeme elemanı altındaki duvar paneline de ulaşabilir.

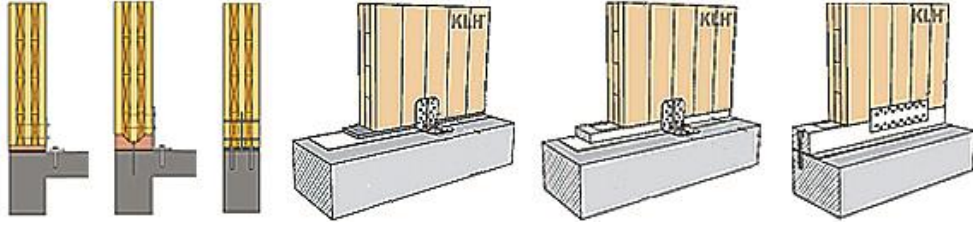


Şekil 4.14 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri [2,12,26]

4.1.2.2 CLT Panel-Betonarme Sistem Birleşimleri

Çelik köşebentler ve birleşim levhaları ile ahşap kompozitleri kullanılarak uygulanabilen CLT panel duvar-betonarme birleşimleri, görünür ya da gizli olabilir (Şekil 4.15). Görünür birleşimlerin, dış çevre koşullarına karşı korunması amacıyla galvaniz kaplama ya da paslanmaz çelik olması gerekmektedir. Uygulamada, metal birleşim levhası ve paneli aynı anda delebilen özel vidalar

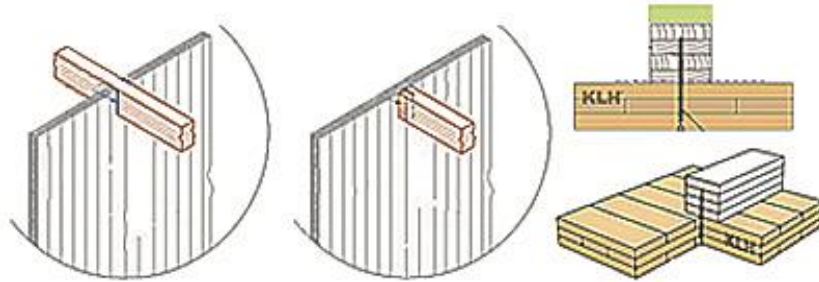
kullanılabilmektedir. Metal levhanın betonarme ile birleşimi, barutlu tabancalarla çakılabilen çivi/ahşap vidaları ile; CLT panel birleşimi ise çivi, vida ya da STS kullanılarak yapılabilmektedir [13].



Şekil 4.15 CLT panel duvar-betonarme döşeme birleşimleri [2,12]

4.1.2.3 CLT Panel-Yapısal Ahşap Sistem Birleşimleri

Depreme dayanıklı ahşap yapı tasarımında, CLT panellerin kullanıldığı karma sistem uygulamalarının yaygın olduğu görülmektedir. Şekil 4.16'da glulam kirişler ile panel birleşimleri görülmektedir.



Şekil 4.16 Glulam kiriş-CLT panel birleşimleri [12]

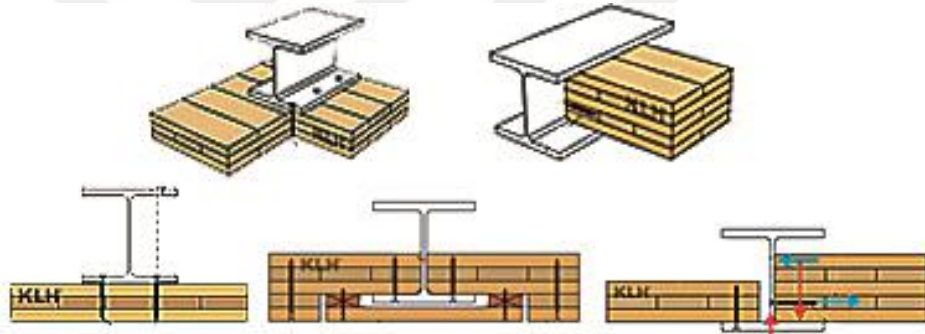
Deprem riski fazla bölgelerde duvar paneli birleşimleri, çelik enerji sönümleyiciler ve U biçimli esnek plakalar ile yapılabilmektedir. Bu parçaların, ardgermeli CLT duvar panelleri ile birlikte kullanıldığı birleşimlerin, monotonik ve çevrimsel yükler altında davranışını ölçen çalışmaların sonucunda; enerji sönümleyici çeliklerde akma ve burkulma olduğu gözlemlenmiştir. Böylelikle yatay ötelenmenin %2,5'u aştığı durumda, döşeme birleşimlerinde oluşacak hasarın sınırlandırılabilirdiği görülmüştür [145]. Şekil 4.17'de deneyler sonucunda; ardgermeli CLT panel birleşiminde gerçekleşen sınırlı hasar oluşumu ile enerji sönümleyici çeliklerde oluşan akma ve burkulma durumu görülmektedir.



Şekil 4.17 Ardgermeli CLT panel birleşimleri ve enerji sönümleyiciler [145]

4.1.2.4 CLT Panel-Çelik Sistem Birleşimleri

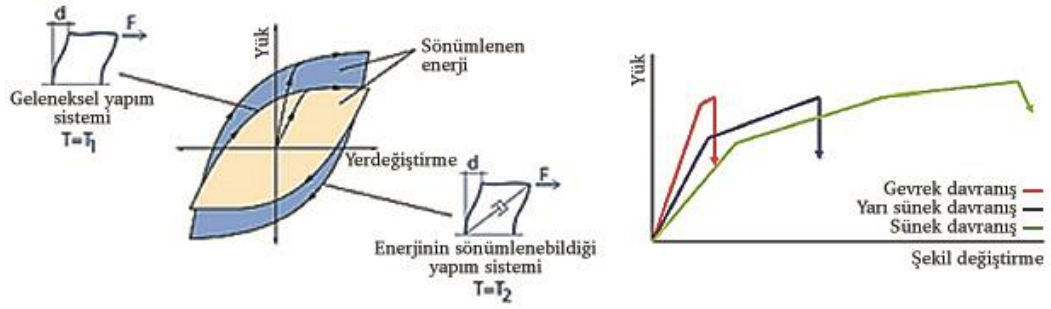
CLT duvar ve döşeme panelleri, çok katlı yapım sistemlerinde çelik taşıyıcı sistem ile bir arada kullanıldığı, karma taşıyıcı sistemli yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Çelik yapım sistemi ile CLT panel birleşimleri [12]

4.2 CLT Panel Yapı Birleşimlerinin Deneysel İncelenmesi

Ahşap yapım sisteminde deprem davranışını, yapı birleşimleri belirlemektedir. Birleşimlerin, yapıya etkileyen yükler altındaki davranışı, yük-yerdeğiştirme ve yük-sekil değiştirme zarf eğrileri ile değerlendirilmektedir (Şekil 4.19). CLT paneller, gevrek özellikte yapı elemanlarıdır ve yapım sisteminde süneklik, panel birleşimleri ile sağlanır. Panel birleşimlerinin yapı davranışı üzerindeki etkisi ile yatay yüklere karşı dayanımı yüksek, enerji yutabilen birleşimler elde edilebilmektedir.



Şekil 4.19 Yapı birleşimlerinin yük-yerdeğiştirme ve yük-şekil değiştirme zarf eğrileri [146,147]

Birleşimin etkinliğini ölçen deney çalışmaları; birleşim deneyleri ve taşıyıcı duvar deneyleri olmak üzere iki alanda yoğunlaşmaktadır. Panel davranışının incelenebilmesi kapsamında, 1:1 ölçekli yapı deneyleri de gerçekleştirilmektedir. Taşıyıcı duvar deneyleri; CLT döşeme, çelik profil ya da betonarme temele birleştirilen, gerçek boyutlu duvar panellerinin, tek yönlü/çevrimsel yükleme çalışmalarını içerir. Birleşim deneyleri ise yapının duvar-duvar ve duvar-döşeme birleşimlerinin etkinliğinin araştırılmasına öncelik verir. Birleşim deneyleri; duvar deneyleri ile karşılaştırıldığında, küçük ölçekli ve düşük maliyetli olup, birleşimin davranışının belirlenebilmesi açısından uygun, öncü niteliktedir. Tezin bu bölümünde; kapsamlı bir literatür araştırması gerçekleştirilerek CLT panel yapı sistemi deney çalışmaları ile elde edilen sonuçlar irdelenmiştir. Bu araştırmalar, birleşimlerde kullanılan çivi/vidanın çekme direnci deneyleri, CLT panel birleşimi deneyleri ve 1:1 ölçekli yapı deneyleri başlıkları altında incelenecektir.

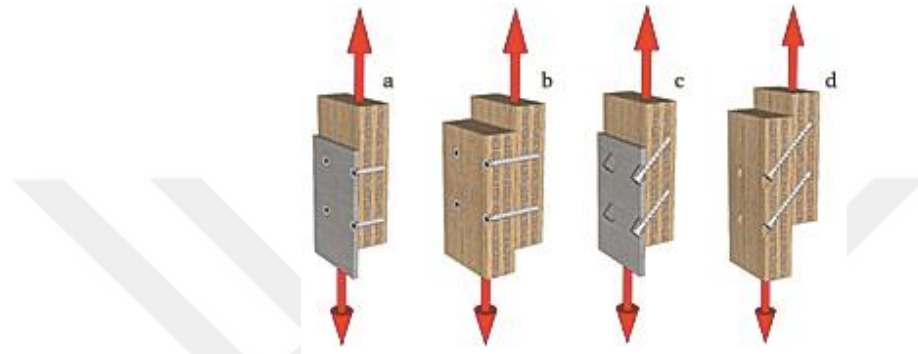
4.2.1 Çivi/Vidanın Çekme Direnci Deneyleri

Yapıya etkiyen yükler altında, birleşimin davranışının belirlenebilmesi için; panel birleşimini sağlayan çivi/vidanın çekme direncinin bilinmesi gerekmektedir. Bu kapsamda araştırmaların, vida (STS) üzerinde yoğunlaştığı; galvaniz kaplamalı halkalı çiviler konusunda, az sayıda çalışma olduğu görülmektedir [148-151].

Panel tabakalarında bulunan boşluk ve oyuklar, çekme direnci ile çivi/vidanın gömülme mukavemetini etkilemektedir [152]. Deney örneklerinin hazırlanması sürecinde, çivi/vida uygulaması ile panelde parçalanma ve tabakaların ayrılması vb. durumlarında, hasar gören örnek ile deney yapılmamalıdır. Bununla birlikte

çekme kuvvetine karşı direnç gösteren vida/çivi başının, panel yüzeyine gömülmemiş olmasına özen gösterilmelidir [54].

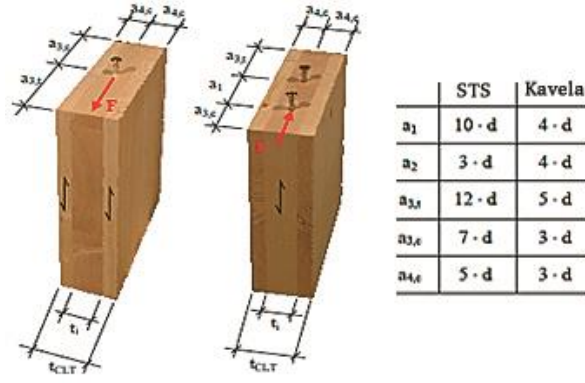
Sünek yapı birleşimlerinde çivi/vida/kavela, yüklemeye doğrultusuna dik biçimde yerleştirilmelidir. Bununla birlikte yüklemeye doğrultusunda yerleştirilen çivi ve vidalar ile sadece tek yönlü yük aktarımının sağlanabildiği göz önüne alınmalıdır [55]. Şekil 4.20 incelendiğinde; (c) ve (d) birleşimleri ile karşılaştırıldığında, (a) ve (b) birleşimlerinin enerji sönmüleyebildiği görülmektedir.



Şekil 4.20 CLT panel birleşimlerinde yük doğrultusuna göre yük aktarımı [55]

Duvar-döşeme birleşimini sağlayan çivi/vidalar; döşeme ve duvar panelinin dar kenarını birleştirecek biçimde, döşeme paneline dik ya da 45° açı oluşturacak biçimde uygulanmaktadır. Yapım sistemi ve birleşim türüne göre, uygulama açısı değişebilmektedir. Vidanın uygulama açısının, 90°'ye yaklaşması ile çekme direncinin artış gösterdiği görülebilmektedir [153].

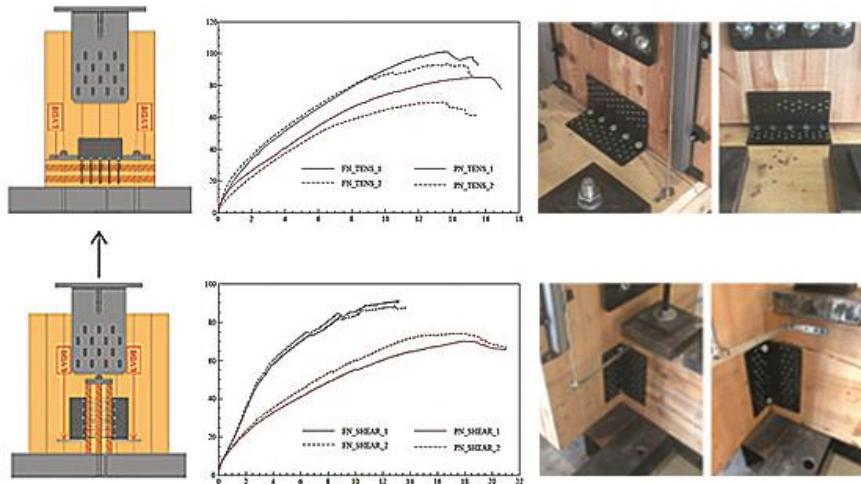
Birleşimlerde kullanılan çivi/vidanın fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra birleşim türü de önemlidir. Bununla birlikte CLT panellerin uzun ya da kısa kenarları ile sağlanan birleşimlerin dayanım ve rijitlik özellikleri birbirinden farklıdır. Uibel ve Blaß çalışmalarında [152,154]; çivi/vida/kavela çekme direnci deney çalışmalarının yanı sıra panellerin dar kenarlarının birleşimlerinde; ahşap liflerinde kırılma ve ezilme yaratmadan; yüksek dayanımlı birleşimlerin elde edilebilmesi için gerekli olan uygulama uzaklıkları belirlenmiştir (Şekil 4.21). Çalışmada ayrıca, birleşim dayanımının belirlenebilmesi için bir hesaplama yöntemi de önermişlerdir. Elde edilen sayısal verilerin değerlendirilmesinde; önerilen yöntemlerin, 400 kg/m³ yoğunluklu ladin için geçerli olduğu belirtilmektedir.



Şekil 4.21 CLT panel birleşiminde çivi/vida/kavela yerleşimi [152]

CLT panelin, kısa kenarına uygulanan vidanın, çekme direncinin araştırıldığı bir diğer çalışmada [153]; ahşabın yoğunluğu ve lif açıları ile ilişkili, çok değişkenli bir olasılık yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca farklı lif yönlerine göre yerleştirilen vidanın, çekme kuvveti altında gerçekleştireceği hasar düzlemleri de belirlenmiştir.

Çelik köşebentli birleşimlerin, çekme ve kayma dayanımının belirlenmesi amacıyla deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.22). Bu kapsamda çivili birleşimin, çekme yönündeki rijitliğini artırabilmek ve köşebent, çivilerde erken, gevrek kırılmaya neden olmasını önleyebilmek amacıyla; döşeme birleşiminde, vidalar kullanılmıştır. Sonuçta, vida uygulaması ile birleşimin dayanımının artırılabilirdiği görülmüştür [155]. Çalışmada ayrıca, çelik köşebent üzerindeki tüm deliklerin çivilenmesi ile bir kısmının çivilenmesinin, birleşimin davranışı üzerindeki etkisi de karşılaştırılmıştır.

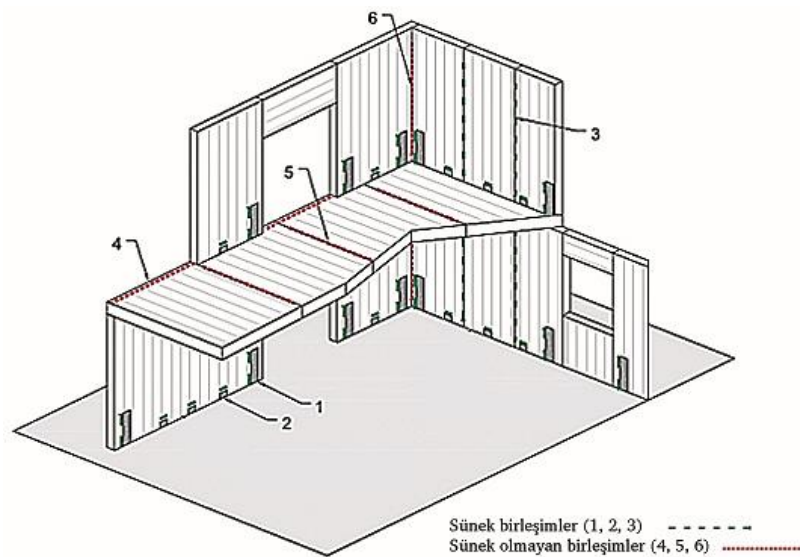


Şekil 4.22 CLT birleşimlerin çekme ve kayma dayanımı deneyleri [155]

Deney çalışmaları ile elde edilen veriler, yönetmelik ve standartlarda yer alan sayısal analiz yöntemlerinin sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Sonuçların değerlendirilmesinde, önemli bilimsel katkılar sunan araştırmacıların önerdikleri hesaplama yöntemleri de kullanılabilir. Farklı özellikteki vidaların, çekme ve kayma dayanımının incelendiği bir çalışmada [53] elde edilen sonuçlar; Eurocode 5, Uibel ve Blaß yöntemi [152,154] ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, vida boyunun artmasının, çekme direncinin artmasına olumlu etki yarattığı; buna karşın birleşimin sünekliğini ise azalttığı sonucuna varılmıştır. Düşey ve yatay yükler altında, CLT panel birleşimlerinde gerçekleşecek hasar durumlarının bilinmesi, yapı davranışının belirlenebilmesinde önemlidir.

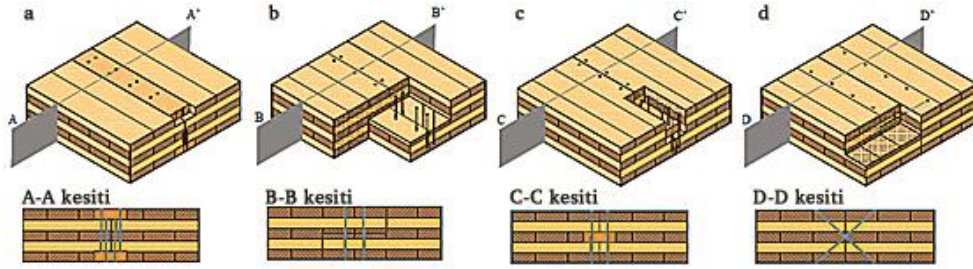
4.2.2 CLT Panel Birleşimi Deneyleri

CLT birleşimlerinin, yatay yükler altında davranışının belirlenebilmesi ve enerji sönümleyebilen birleşimlerin (Şekil 4.23) geliştirilebilmesi amacıyla birçok araştırma yürütülmektedir. Bu kapsamda yapılan deney çalışmaları, yönetmeliklerde yer alan yöntemlere göre; panel birleşimlerinin monotonik/çevrimsel yükler altında davranışını incelemektedir. Bununla birlikte 1:1 ölçekli yapıların sarsma tablası deneyleri de gerçekleştirilmektedir. Deney çalışmaları ile sayısal analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, CLT panel yapım sistemi kılavuzları ve yönetmelikleri güncellenmektedir.



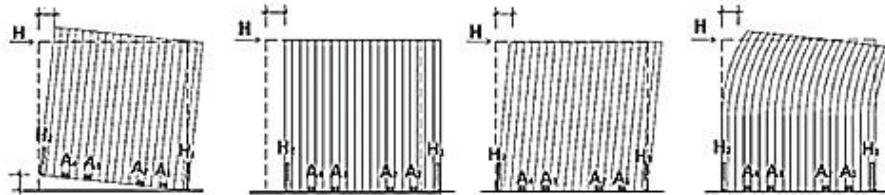
Şekil 4.23 Enerji sönümleyebilen ve sönümleyemeyen panel birleşimleri [55]

CLT birleşimlerde; çivi/vidanın, panel içindeki yerleşimi ile ahşap liflerine göre konumu ve uygulanma açısı, birleşimin dayanımı önemli ölçüde etkilemektedir. Vidalar ile oluşturulan farklı CLT birleşimlerinin, düzlem içi kayma dayanımının incelendiği araştırmada [156]; Şekil 4.24'te görülen (a) ve (b) birleşimlerinin döşeme birleşiminde süneklik sağladığı, (c) ve (d) birleşimlerinin ise sağladıkları yüksek rijitlik ile diyafram davranışının sağlanmasında etkili olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4.24 Vida ile CLT döşeme paneli birleşimleri [156]

Yatay yükler altında, CLT duvar panelinde; eğilme, kesme, kayma ve kaldırarak dönme olmak üzere dört hareket gerçekleşmektedir (Şekil 4.25). Eğilme ve kesme kuvvetleri ile hareket, panelin mekanik özelliklerine; kayma ve kaldırarak dönme hareketleri ise CLT panel birleşimlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir [138].



Şekil 4.25 Düzlem içi yatay yükler altında duvar panelinin hareketleri [157]

Duvar panellerinin, deprem kuvvetleri altında, yapı davranışına etkisini inceleyen bir araştırma kapsamında [158]; panel birleşimlerinin¹⁵ monotonik ve çevrimsel deneyleri ile 1:1 ölçekli iki duvar örneğinin sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.26). En büyük yer ivmesinin 0,5-0,6g olduğu deneylerde; vidalı duvar-temel birleşimleri ile duvar panellerinin düşey birleşimlerinde, enerjinin önemli ölçüde sönmülenebildiği görülmüştür. Tek

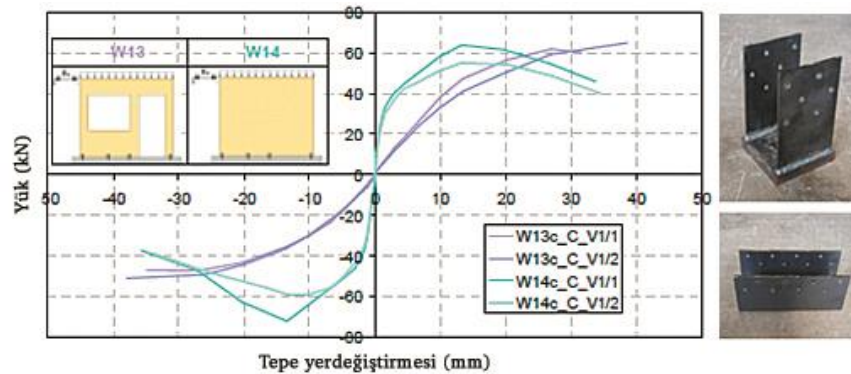
¹⁵ 244cmx272cmx9,4cm boyutlarında duvar panelleri, 60 cm aralıklarla yerleştirilen, 105 mm boyutunda eşit kollu çelik köşebentler ve 4mmx60mm halkalı çiviler ile birleştirilmiştir.

parçalı duvar paneli, düşeyde vidalar ile birleştirilmiş iki parçalı duvar ile karşılaştırıldığında; yatay yükler altındaki tepe yerdeğiştirmesi %18 daha fazladır.



Şekil 4.26 Duvar paneli deney örnekleri ile birleşim detayı [158]

Boşluksuz ve kapı/pencere boşlukları olan duvar panellerinin, kayma dayanımlarının aynı olmasına karşın; kayma rijitliği, boşluksuz CLT duvar panellerinde daha azdır. Bu kapsamda gerçekleştirilen bir araştırmada [159]; boşluklu ve boşluk açılmamış panellerin, rijitliği ve kayma dayanımının arasındaki ilişkinin, matematiksel bir yöntem ile açıklanabileceği önerilmektedir. Çalışmada ayrıca, duvar-betonarme temel birleşiminin, deprem enerjisinin sönümlenmesinde oldukça etkili olduğu ve zemin büyütme etkisini azalttığı belirtilmektedir. Konuyla ilgili bir diğeri araştırmada [160]; boşluklu duvar panelleri ile çelik köşebent yerleşimi simetrik olmayan duvarlarda, yük-yerdeğiştirme zarf eğrisinin simetrisinin bozulduğu görülmüştür (Şekil 4.27). Duvar paneli ile boşluk alanı arasındaki farkın artmasının, panelin gevreklik ve rijitlik özelliklerini artırdığı ancak; geniş boşluklu panellerin, köşelerinde oluşan gerilme yığılımları nedeniyle hasarların gerçekleşebildiği belirtilmektedir [161].



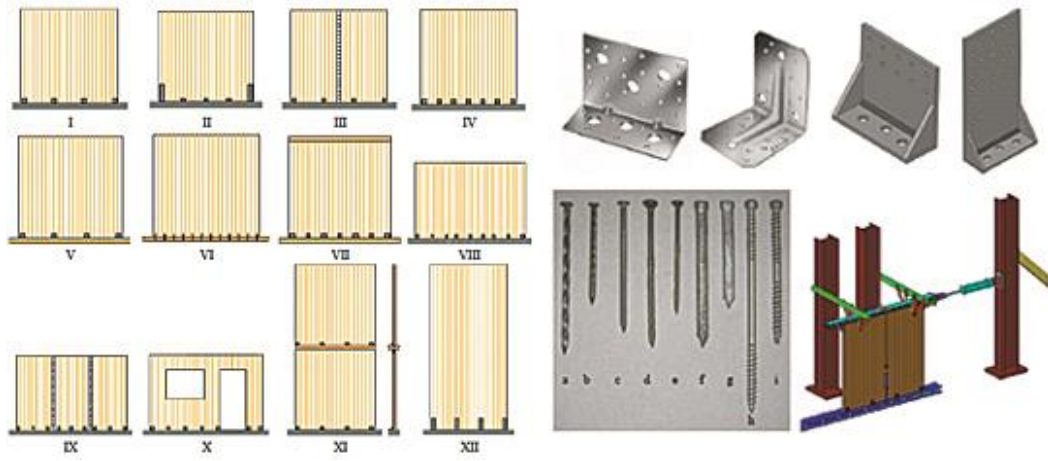
Şekil 4.27 Duvar panellerinin yük-yerdeğiştirme ilişkisi ile birleşim detayları [160,161]

Duvar panelleri¹⁶ ile yapılan deney çalışmalarında, düzlem içi eğilme davranışı ve hasar türleri incelenmiştir. Paneller, önce ikiye bölünmüş; sonrasında iki farklı birleşim ile bir araya getirilmiştir. Birleşimlerden biri, panelde açılan oyuya C24 dayanımlı ahşap kompoziti yerleştirilerek; diğeri ise panel yüzeyinde, metal bir levha kullanılarak oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar; metal levhalı birleşim ile karşılaştırıldığında, panel içinde oyuk oluşturularak sağlanan geçmeli birleşimin rijitliği ve dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür [162].

Kuzey Amerika'da CLT panel birleşimleri konusunda, çok disiplinli ve kapsamlı çalışmaların çoğu, bir araştırma enstitüsü olan FPInnovations önderliğinde yürütülmektedir. Bu kapsamda duvar panelleri ile farklı birleşimlerin¹⁷, deprem kuvvetleri altında yapı davranışına etkisinin incelendiği monotonik ve çevrimsel deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.28). Sonuçta; eşit kollu köşebent ile güçlendirilmiş L köşebentin birlikte kullanıldığı birleşimlerin, yapı davranışının belirlenmesinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca deprem riskli yerlerde uygulanacak duvar-döşeme birleşimlerinde; duvar paneli davranışını olumsuz etkilemesi nedeniyle uzun vidaların, çapraz biçimde uygulanması önerilmemektedir. Plan düzleminde, uzun bir duvar elde edebilmek amacıyla panellerin, birleştirilmesini sağlayan ve çoğunlukla metal levhalar ile oluşturulan birleşimler; yatay kuvvetler altında, panellerin karşı karşıya kalacağı deprem yükünü de azaltmaktadır [139]. Çalışmada ayrıca perçin ile özel bir köşebentin birlikte kullanımının, birleşimin davranışına olumlu katkı sağladığı ve gelecek çalışmalarda, bu birleşimin incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır.

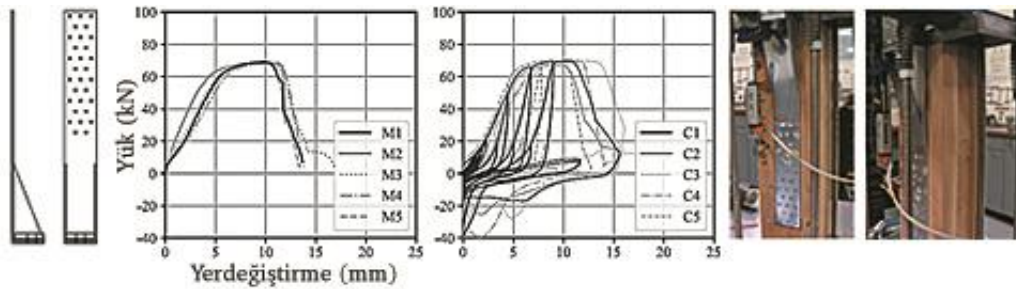
¹⁶ 495cmx125cm boyutlarında, beş tabakalı CLT duvar panelleri kullanılmıştır.

¹⁷ Üç tabakalı tek parça duvar paneli, birbirine yatayda birleştirilmiş parçalı duvar panelleri ve iki katlı yapılarda kullanılacak yüksek duvar panelleri; farklı çivi/vida/perçin ile birleştirilmiştir.



Şekil 4.28 Duvar paneli birleşimleri ile deney düzeneğinin görünümü [139]

Güçlendirilmiş L köşebentli duvar panellerinin, monotonik ve çevrimsel yükler altındaki davranışını inceleyen bir çalışmada [163]; taşıyıcı sistem hesaplamalarına uygun çivi kullanımı ile çelik köşebentlerde, olası kırılma hasarının önlenebildiği ve böylelikle birleşimin sünekliğinin artabileceği görülmüştür. Deneylerde, güçlendirilmiş L köşebent ile 3 mm kalınlığındaki çelik köşebentlerin birlikte kullanıldığı birleşimlerde, sünekliğin 2,7-4,3 aralığında olduğu belirtilmektedir. Buna karşın L köşebent ile 10 mm kalınlığındaki çelik levhalar ve daha uzun çivilerin birlikte kullanılması durumunda ise sünekliğin 4,7-6,3 aralığında olduğu görülmüştür. Çalışmada, çivili L köşebent birleşimlerinin akma dayanımının, her iki yükleme altında benzer olduğu da gözlemlenmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4.29 Güçlendirilmiş L köşebent birleşimlerinde akma hasarı [53]

A.B.D.'de deprem riskli bölgelerde, kat sayısı 1-10 ve kat yüksekliği 2,44-4m arasında değişen konutlar ve orta katlı ticari yapılar ile gerçekleştirilen deney çalışmaları sonucunda; yatay yükler altında çelik köşebentler ile birleştirilen CLT

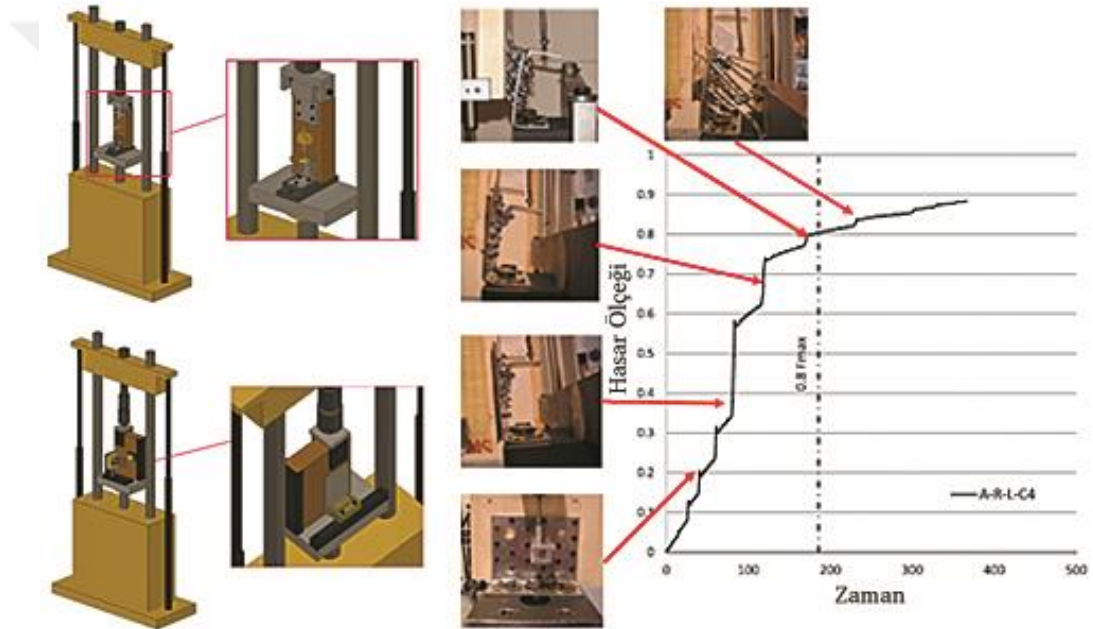
duvar panellerinin, etkin enerji sönümleyebilme davranışı sağladığı görülmüştür. Buna karşın depreme dayanıklı yapı tasarımında, CLT panel yapı sistemi ile ilgili kapsamlı ve güncel bir yönetmeliğin olmayışı eleştirilerek; sadece var olan yönetmeliklerin uyarlanması ile panellerin mekanik özelliklerinin tam olarak kullanılmadığı belirtilmiştir [164]. Duvar panellerinin, yatay yükler altında düzlem içi davranışının belirlenmesinde; uygun yazılımlar ile analitik tasarım modellerinden elde edilen veriler [165], iki katlı CLT paneller ile oluşturulan bir yapının deprem davranışı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta; iki doğrultulu yükleme altında oluşan kayma-kaldırma hareketine karşı, panel birleşimlerinin etkinliğini ölçen, en uygun değerlendirme yöntemi belirlenebilmiştir [166].

Birleşim deneylerinde, en fazla karşılaşılan hasar türleri; çelik köşebentin ya da çivi/vidanın, dayanımını yitirerek akmasıdır. Birleşim bölgesinde plastik mafsallı oluştuğunu gösteren bu durum, enerjinin başarılı biçimde sönümlenebildiğini göstermektedir [167]. Panel birleşimleri dışında, CLT duvar panelinin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyecek bir hasarın gerçekleşmemesi istenir [168]. Şekil 4.30'da CLT panel-betonarme temel birleşimi deneylerinde karşılaşılan; çivilerin sıyrılması ve kırılması ile duvar panelinde oluşan hasar, panel tabakalarının birbirinden ayrılması ve çelik köşebentte oluşan hasar türleri görülmektedir.



Şekil 4.30 Panel birleşimi deneylerinde gerçekleşen hasar türleri [167]

CLT duvar-temel birleşimlerinin¹⁸ davranışını inceleyen deney çalışmasında; deprem yükleri altında oluşacak hasarın, sayısal olarak değerlendirilebilmesini sağlayan, hasar indisi (D) ile oluşan fiziksel hasar arasındaki ilişki tanımlanmıştır. Sonuçta, duvar panellerinin birleşimleri için kullanılabilir bir hasar ölçeği önerilmiştir. Deneyler sırasında yapılan hasar gözlemleri ile doğrulanan bu ölçeğe göre; $20 \leq D \leq 35$ onarılabılır küçük hasar, $65 \leq D \leq 75$ önemli ve büyük hasar oluşumu, D değerinin 0,80'e ulaşması ile birleşimin, tamamen göçmüş olduğu kabul edilmektedir (Şekil 4.31). Depreme dayanıklı yapı tasarımı kapsamında, CLT panel birleşimlerinin dayanımı ile enerji sönümleyebilme yeteneğinin artırılabilmesi amacıyla hasar indisinin belirlenmesi oldukça önemlidir [167,168].



Şekil 4.31 CLT duvar-temel birleşimi deneylerinde hasar ölçeği [167,168]

4.2.3 CLT Panel Yapı Deneyleri

Ahşap yapım sistemlerinde, deprem kuvvetleri altında yapı davranışı, yönetmeliklerde yer alan yöntemler ile belirlenmektedir. Depreme dayanıklı tasarımında yapı davranışı; IBC [169] ve ASCE [170] kodlarında R katsayısı¹⁹;

¹⁸ Birleşimlerde; üç tabakalı CLT paneller, farklı özelliklerde beş çivi ve vida ile iki çelik köşebent kullanılmıştır.

¹⁹ R katsayısı; deprem yükleri altında yapının karşılayacağı kuvvetleri, yapım sisteminin süneklik tasarımına göre azaltan katsayıdır.

Eurocode 8[5]'de ise davranış katsayısı (q) ile yapılmaktadır. Ancak CLT panellerin mekanik özellikleri ve enerji sönümlenmesi ile yükleme altında zamana bağlı dayanımının azalması konularında, Eurocode 8'in yetersiz kaldığı bilinmektedir [13]. Davranış katsayısı üç olan yapıları, sünek olarak değerlendiren yönetmelikte; CLT panel yapı sistemi, bir taşıyıcı sistem olarak tanımlanmamış olup sadece tutkallı tabakalı duvar panelleri başlığı altında değerlendirilmektedir. Bu nedenle paneller, düşük sünek davranışlı ($q=2$) olarak sınıflandırılır [143].

CLT panel yapı sisteminde, yapı davranışı katsayısının belirlenebilmesi amacıyla birçok araştırma yürütülmektedir. Bu kapsamda, FPInnovations tarafından gerçekleştirilen araştırmaların sonucunda, NBCC'ye göre; çivi ve küçük boyutlu vidalar ile sağlanan sünek birleşimli CLT panel yapı sistemlerinin, ön hesaplamalarında, $R=1,5-2$ alınabileceği önerilmektedir [171]. Çok katlı CLT panel yapıların büyük paneller ile oluşturulan taşıyıcı sistemlerinde; düşey panel-panel birleşimlerinin fazla olmadığı uygulamalarda, standartlarda belirtilen davranış katsayısı ($q<2$) ile benzer değerlerin sağlandığı görülmüştür. Ayrıca duvar panellerinin, düşeyde birleştirilmesi ile oluşturan sistemlerde $q=2,6-3,5$; düşey birleşim olmadan, her katta bağımsız panellerin kullanılması durumunda ise $q=2,2-2,8$ aralığında alınabileceği belirtilmektedir. Önerilen değerlendirme modelinin; çelik-ahşap ve ahşap-ahşap yapı birleşimlerine de uyarlanabileceği varsayılmaktadır [172]. Dört katlı CLT panel yapının deprem davranışının, sonlu elemanlar yöntemi ile incelendiği bir çalışmada; birleşimlerde uygun çelik köşebentlerin kullanılmasının, davranış katsayısını arttırdığı görülmüştür [173].

CLT panel yapı sistemi ile ilgili kapsamlı ve güncel bir yönetmeliğin olmadığı, yapı standartlarında tanımlanan yöntemlerin ise yatay kuvvetler altında, yapı davranışının değerlendirilmesinde yetersiz kaldığı bilinmektedir. Bu kapsamda literatür çalışmaları incelendiğinde, CLT paneller için farklı davranış katsayılarının kullanıldığı görülmektedir. Araştırmalarda önerilen değerlere bakıldığında (Tablo 4.1); tek parça duvar paneli ile karşılaştırıldığında, düşeyde birleştirilen ve birden çok panel ile oluşturulan duvarlarda, q katsayısının yüksek olduğu görülmektedir. Duvar panellerinin düşey birleşimlerinin türü (metal levha, ahşap kompoziti vb.

kullanımı ile çivi/vida özellikleri); enerjinin sönmünebilme yeteneği ile davranış katsayısının değişmesine neden olmaktadır [55].

Tablo 4.1 CLT panel yapılar için önerilen q katsayısı değerleri [55]

CLT panel yapı özellikleri	Değerlendirme yöntemi	q katsayısı	Kaynak
Dar paneller ile üç katlı yapı	Sarsma tablası	3,4	[174]
Dar paneller ile yedi katlı yapı		3,0	[169]
Geniş paneller ile üç katlı yapı		2,8	[175]
Dar paneller ile 1:1 ölçekli yapı	Yapı modellemeleri	3,0-4,5	[176,177]
Geniş paneller ile 1:1 ölçekli yapı		2,0	[178]
Panel birleşimleri ve duvar panelleri	Eleman deneyleri	3,0	[179]

CLT paneller ile oluşturulan, 1:1 yapı ölçeğinde gerçekleştirilen, en kapsamlı deney çalışmalarından biri olan SOFIE Project; deprem kuvvetleri altında, çok katlı ahşap yapıların davranışının araştırılması²⁰ amacıyla 2005 yılında, İtalya ve Japonya'da bulunan önemli üniversiteler ile araştırma enstitülerinin iş birliği ile yürütülmüştür. Proje kapsamında; duvar ve döşeme panellerinin farklı birleşimleri ile bir, üç ve yedi katlı CLT panel yapılar²¹ uygulanmıştır (Şekil 4.32). Proje kapsamında, panel birleşimlerinin²², düzlem içi kayma dayanımı ile vidanın çekme direncini inceleyen çalışmalar gerçekleştirilmiştir [54]. Deneyler sürecinde, panelin tabakalarının birbirinden ayrılması nedeniyle gevrek göçme gerçekleşmiş olsa da panel yüzeyine oyuk açılarak yapılan birleşimler ile karşılaştırıldığında; panelin düşey birleşimlerinin, daha rijit davranış gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte tabakaların yönlenmesine göre değişen, tabakalar arasındaki kayma dayanımının, panelin genel davranışı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı belirtilmektedir.

²⁰ Proje kapsamında; deprem kuvvetleri altında yapı davranışın yanı sıra panellerin, yangın dayanımı ve ısısal özellikleri ile akustik etkinliği de araştırılmıştır.

²¹ 24 m yüksekliğindeki yedi katlı yapının taban alanı, 15m x 7,7m boyutlarındadır.

²² Panel birleşimlerinde; kalınlığı 85 mm, 125 mm ve 142 mm duvar panelleri ve 142 mm döşeme elemanları ile çelik köşebent, halkalı çivi ve vida kullanılmıştır [180].



Şekil 4.32 SOFIE Project kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar [181-183]

Proje kapsamında yapılan deneylerde; güçlendirilmiş L köşebent'in çekme kuvveti yönünde, yüksek dayanım ve rijitlik göstermesine karşın; gövdesinde oluşan burkulma nedeniyle kesme kuvvetine karşı yeterli dayanımı gösteremediği görülmüştür (Şekil 4.33). Her iki doğrultuda iyi davranış gösteren, eşit kollu çelik köşebentlerin kullanımının, yatay kuvvetler ile duvar panelinde gerçekleşebilecek devrilme riskine karşı birleşimin, kayma dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Birleşimin türüne bağlı olarak değişmekle birlikte, dayanım fazlalığı katsayısının, eşit kollu köşebent kullanılan birleşimlerde 1,25-1,45; L köşebentlerde ise 1,3 olarak alınabileceği önerilmektedir [184].



Şekil 4.33 CLT panel birleşimlerinde hasar türleri [184]

Japonya'da gerçekleştirilen deney programı²³ kapsamında; iki önemli deprem²⁴ yükleri altında, 1:1 ölçekli CLT panel yapıların davranışları incelenmiştir [180].

²³ Deneyler; 20mx15m boyutlarında, dünyanın en büyük sarsma tablası ile gerçekleştirilmiştir.

²⁴ Mw=6,8 Niigata-Chuetsu-Oki Depremi(2007)'nin en büyük yer ivmesi 1g; Mw=7,2 Kobe Depremi(1995)'nin en büyük yer ivmesi ise 0,82g alınmıştır.

Deney çalışmalarında, Avrupa ve İtalya'daki değerlendirme yöntemlerine uygun olarak; hareketli yük, %30 katılımlı alınmıştır [181]. Sonuç olarak, ahşap platform çerçeve sistem ile karşılaştırıldığında; CLT panel birleşimlerinin, daha fazla enerji sönümleyebildiği görülmüştür. Duvar panellerinin davranışının incelendiği çalışmada, metal birleşimler ile %14 viskoz sönümlenme sağlanabilmiştir [185]. Deney sonrasında, yedi katlı yapıda, artık şekil değiştirmeler oluşmamıştır. Ayrıca en büyük görelî kat ötelenmesi 40 mm (%1,3); tepe yerdeğiştirmesi ise en fazla 287 mm ölçülmüş olup, bu değerlerin “kabul edilebilir düzeyde” olduğu sonucuna varılmıştır [13,180]. Yedi katlı CLT paneller ile oluşturulan yapının, deprem kuvvetleri altında davranışının belirlenmesinde; Eurocode 8 sünek tasarım ilkelerine göre, $q=3$ alınabileceği belirtilmektedir [182].

2011-2013 yılları arasında, Portekiz’de çok katlı ahşap yapıların deprem davranışının araştırılması (SERIES 227887) kapsamında; CLT panel birleşimi deneyleri ile üç katlı yapının²⁵ sarsma tablası çalışmaları gerçekteştirilmiştir (Şekil 4.34). En büyük yer ivmesi 0,5g olan deprem etkileri sonrasında elde edilen veriler; yapının doğal frekansının 3,98 Hz’den 3,75 Hz’e düştüğünü göstermiştir. Deneyler sonrasında yapılan incelemede, metal birleşimlerde küçük hasarlar gözlemlenmiştir [138].



Şekil 4.34 SERIES kapsamında gerçekteştirilen deney çalışmaları [138]

²⁵ Yapının duvar ve çatı elemanları üç tabakalı (100 mm); döşemeleri ise beş tabakalı (150 mm) CLT paneller ile oluşturulmuştur.

Deprem davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bir diğer çalışmada [166]; paneller (üç tabakalı, 94 mm) ile iki katlı bir yapı uygulanmıştır. Farklı özellikte çivi/vidalar ile çelik eşit kollu ve güçlendirilmiş L köşebentler kullanılan panel birleşimlerinin; dayanımı, şekil değiştirme özellikleri ve hasar türleri incelenmiştir. Sonuçta; büyük yükler altında bile yapıda, deprem kuvvetlerine karşı dayanımını olumsuz etkileyecek burulma vb. oluşmadığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte CLT duvar panellerinin yatay kuvvet altında hareketi ile yapının birinci katındaki birleşimde, köşebent çivilerinde kesme hasarı olduğu görülmüştür. Duvar panelinin kayma dayanımının olumsuz etkilenmemesi ve panelin hasar görmesinin önlenmesi amacıyla; boşluk alanlarının üzerinde, metal güçlendirme levhaları yerleştirilmiştir (Şekil 4.35).



Şekil 4.35 CLT panel yapı ve birleşimlerindeki hasar oluşumları [166]

CLT PANEL BİRLEŞİMLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

5.1 CLT Panel ile Çivi/Vida Çekme Direnci Deneyleri

CLT panel yapı sistemi ile CLT birleşimlerinin, özellikle deprem riski yüksek alanlardaki etkinliği üzerine birçok kuramsal araştırma ve deney çalışmaları yapılmaktadır. Bu araştırmaların ortak amacı; yapıya etkiyen kuvvetler altında enerji yutabilen (sünek) metal birleşimlerin geliştirilmesinin sağlanmasıdır.

Düşey ve yatay yükler altında CLT panel birleşimlerinin dayanımının belirlenebilmesi için öncelikle, birleşimi sağlayan çivi/vida ile panel arasındaki etkileşimin tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, CLT panel birleşimini sağlayan çivi/vidanın ahşap liflerinden çekme direnci, birleşimin davranışı ve dayanımı üzerinde doğrudan etkilidir. Çoklu (birden fazla) çivi/vida çekme direnci deneylerinin yapılmasına karşın; panel birleşiminin etkinliğinin kısa sürede belirlenerek, seçilen çivi/vidanın uygunluğunun değerlendirilmesi ile olası hasar durumlarının önlenemesinin en etkili ve ekonomik yöntemi, tekil çivi/vida çekme direnci deneyleridir. Bununla birlikte panelin tabakalarında bulunan boşluk ve oyuklar, çekme direnci ile çivi/vidanın gömülme mukavemetini etkilemektedir [152].


Tezin bu bölümünde; İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi Ahşap Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen CLT ile çivi/vidanın çekme direnci deney çalışmaları ve sonuçları incelenecektir. Burada elde edilen deney sonuçları ile literatürde yer alan değerlendirme yöntemleri karşılaştırılarak bilimsel bir çalışma yayımlanmıştır [186].

5.1.1 Deney Örneklerinin Hazırlanması

Türkiye’de uluslararası yönetmeliklere uygun CLT panel üretiminin yapılamaması ve deney çalışmalarından elde edilecek sonuçların, literatürde yer alan veriler ile karşılaştırılabilmesi amacıyla paneller²⁶, Avrupa’nın önemli üreticilerinden birinden sağlanmıştır. CLT ile çivi/vida çekme direnci deneyleri kapsamında; 100 mm kalınlıkta üç tabakalı panelden; ASTM 1761[187]’e uygun biçimde 50mmx50mmx100mm boyutlarında, 200 deney örneği kesilerek hazırlanmıştır. Bu aşamada, görsel inceleme ile budak, çatlak, lif kıvrıklığı, reçine boşlukları vb. sorunları olan deney örnekleri ayrılarak, çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Deneye başlamadan önce; kesilen CLT örnekleri, %12 nem düzeyinin korunabilmesi amacıyla $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarında bekletilmiştir. Deney öncesinde, örneklerin özgül ağırlıkları $0,46 \pm 0,01$ olarak ölçülmüştür.

CLT panelin bağımsız ahşap tabakalarının lif yönleri ile lif yapısının seyrek ya da sıkı nitelikte olması; çivi/vida çekme direncinin belirlenmesi üzerinde doğrudan etkilidir. Tabakaların lif yönleri; liflere dik (enine ya da teğet) ya da liflere paralel olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Deney örneklerinin hazırlanması aşamasında, güvenilir sonuçlar elde edebilmek amacıyla bu durumlar göz önüne alınarak sınıflandırma yapılmıştır (Tablo 5.1).

Tablo 5.1 Lif yönleri ve yapısına göre deney örneklerinin sınıflandırılması

Lif yönleri ve yapısı		CLT deney örnekleri							
Lif yapısı	Sıkı	a, b (TL, BL) d, f (ML)		a	b	c	d	e	f
	Seyrek	c, e (ML)							
Lif yönleri	Eğimli	a (TL, BL) c, d (ML)							
	Enine	b (TL, BL) e, f (ML)							

TL üst tabaka, ML orta tabaka, BL alt tabakayı göstermektedir.

CLT birleşimlerinde kullanılan çivi/vidanın fiziksel ve mekanik özellikleri, yapı yükleri altında birleşimin davranışını belirler. Bu nedenle deneyler kapsamında; hazırlanan CLT örnekler, farklı çivi ve vidalar ile birleştirilmiştir. Deneylerde;

²⁶ CLT panellerin ayrıntılı özellikleri Bölüm 5.2’de yer almaktadır.

farklı boyutlarda halkalı ve burgulu çiviler ile ahşap vidası olmak üzere üç ana tür kullanılmıştır. Galvaniz ve fosfat kaplamalı çiviler, yerli bir üreticiden elde edilirken; diğer çiviler ve ahşap vidaları, yurtdışı asıllı bir üreticiden²⁷ sağlanmıştır. Çiviler, elle ya da taşınabilir çivi çakma tabancaları ile birleştirilir; deney örnekleri, her iki yöntem kullanılarak hazırlanmıştır. Ahşap vidaları ise vidalama tabancaları kullanılarak uygulanmaktadır.

Çiviler, ortam koşullarına dayanıklılığın sağlanması amacıyla, üretim aşamasında kimyasal bileşikler ile kaplanır. Bu çalışma kapsamında; üretim aşamasında galvaniz, reçine ve fosfat kaplama işlemi uygulanan halkalı çiviler kullanılmıştır. Fosfat asıllı²⁸ kimyasal kaplama; korozyona karşı dayanıklılığı artırmanın yanı sıra, yapı birleşiminde çivinin, ahşaba girişini kolaylaştırmaktadır. Birleşim aşamasında sürtünme enerjisi ile çivi yüzeyinde oluşan kristal yapı [188], çekme gerilmesi altında çivinin tutunma yeteneğini artırarak; çivinin, ahşap liflerden sıyrılmasını zorlaştırmaktadır. Fosfat kaplamanın, kaplamasız bir çivi ile karşılaştırıldığında; en az %40 ek tutunma yeteneği sağladığı belirtilmektedir [189].

Deney örneklerinde, fosfat kaplamalı halkalı çivilerin yanı sıra galvaniz ve reçine kaplamalı çiviler kullanılmış olup özellikleri, Tablo 5.2'de görülmektedir. Burada RN halkalı çivi, HN burgulu çivi ve WS ahşap vidasının gösterimidir. Çivi kaplamalarının sınıflandırılmasında; G galvaniz, RG reçine ve galvaniz ve P fosfat kaplama gösterimleri kullanılmıştır.

²⁷ Ahşap vidaları, Spax'dan sağlanmıştır.

²⁸ Fosfat asıllı kaplama; sıcak çinko ya da manganez asidi fosfat çözeltisine daldırılarak yapılır. İşlem sonrası, koyu gri renkte olan kaplamanın rengi zamanla koyulaşarak, siyaha yaklaşmaktadır.

Tablo 5.2 Deneylerde kullanılan çiviler ile ahşap vidasının özellikleri

Çivi/Vida özellikleri	Halkalı çiviler				Burgulu çivi	Ahşap vidası
	Galvaniz	Galvaniz ve Reçine	Fosfat			
Kaplama türü	Galvaniz	Galvaniz ve Reçine	Fosfat		Galvaniz	
Gösterimi	RN-G	RN-RG	RN-P1	RN-P2	HN	WS
Baş biçimi	●	◐	●	◐	●	⊕
Uzunluğu (mm)	76,58	81,70	75,86	62,35	88,90	69,66
Düz gövde çapı (mm)	2,95	2,95	3,20	2,85	3,05	2,73
Dişli gövde çapı (mm)	3,15	3,05	3,38	2,95	3,15	3,87
Birleşim yöntemi	M+, G-	M+, G-	M+, G+	M+, G+	M+, G-	M-, G+

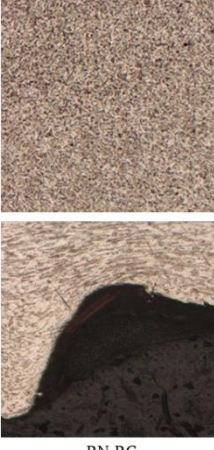
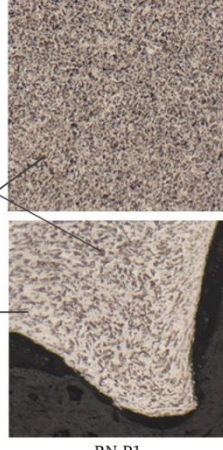
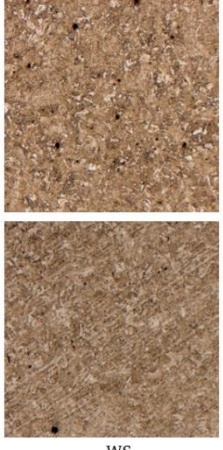

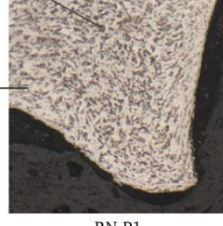
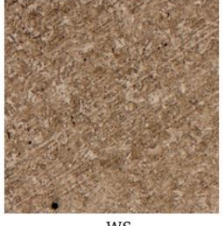


M elle çakılma, G ise çivi/vida tabancası kullanılarak birleştirmeyi göstermektedir.

Birleşimlerde kullanılan fosfat, galvaniz ve reçine kaplamalı halkalı çiviler ile ahşap vidasının fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; çivi/vidanın 5 cm'lik parçası üzerinde, ISO 6892-1[190]'e göre çekme kuvveti altında şekil değiştirmesi incelenmiştir. Bununla birlikte ışık metal mikroskobu altındaki mikro yapı görünüşleri de izlenmiştir (Tablo 5.3). Mikro yapı görünüşlerinde; koyu renkli alanlar perlit, açık renkli alanlar ise ferrit yapıları göstermektedir. Yuvarlak ve taneli biçimde görülebilen perlit, mukavemeti sağlarken; düşük karbon içerikli ferrit ise çivinin elastik sınıra ulaşması durumunda, gevrek kırılmasını engellemektedir.






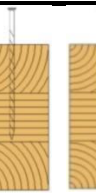

Elle ya da tabanca kullanılarak uygulanan çivi/vidalar, CLT deney örneklerinin merkezine, 90° açı ile birleştirilmiştir. Burada Tablo 5.1'de anlatıldığı gibi, CLT tabakalarının lif yönleri ile lif yapısının seyrek ya da sıkı olması durumları da göz önüne alınmıştır (Tablo 5.4). Yüksek basınç kuvveti uygulayan çivi çakma tabancaları ile çivi gövdesi, tek hareketle CLT panele tamamen gömülmektedir. Çivi/vida gövdesinin ahşap içinde gömülü olan kısmı, etkin gömülme derinliği (l_{thr}) olarak tanımlanmakta olup; çekme direnci sonuçlarının değerlendirilmesi ile birleşimin çekme dayanımı hesaplamalarında kullanılmaktadır.

Tablo 5.3 Çiviler ve vidanın mekanik özellikleri ile mikro yapı görünümleri

	RN-RG	RN-P1	WS	
Özellikler	Akma dayanımı (%0,2 MPa)	880	769	-
	Kopma dayanımı (MPa)	975	771	1218
	Kopma uzaması (%)	0,84	1,07	1,21
	Sertlik (Hv)	317	310	460
Mikro yapı görünümleri				
				

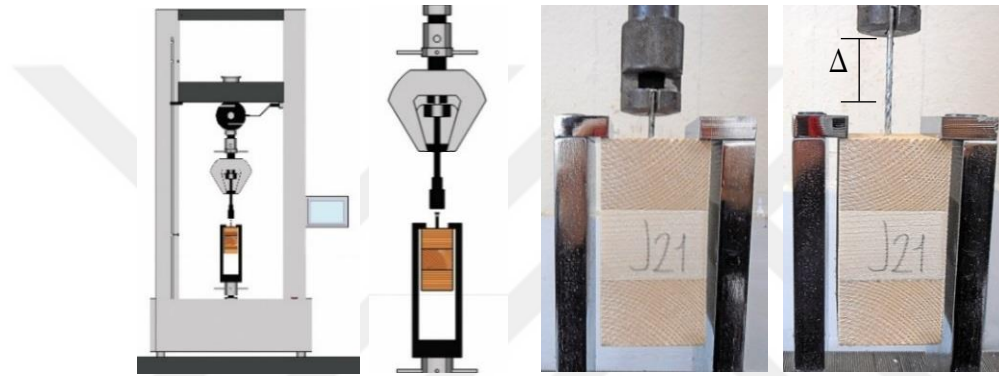
Çekme direnci deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için çivi/vida gövdesinin, CLT örneğinden ~2,5 cm yukarıda kalacak şekilde birleştirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, çivi tabancası kullanılan birleşimlerde, doğru ölçünün sağlanabilmesi için özel çelik bir parça kullanılmıştır. Bu süreçte çivi/vida uygulaması ile ahşapta, parçalanma ve tabakaların ayrılması vb. durumlarında hasar gören örnekler ayrılmıştır.

Tablo 5.4 CLT ile çivi/vida çekme direnci deney örnekleri

	CLT ile çivi/vida birleşimi					
	RN-G	RN-RG	RN-P1	RN-P2	HN	WS
						
CLT örnek içinde etkin gömülme derinliği, l_{thr} (mm)	51,58	56,70	50,86	37,35	63,90	44,66

5.1.2 Deney Düzenegi ve Veri Toplama

Deney çalışmaları, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Orman Fakültesi Ahşap Mekaniği Laboratuvarı'nda, LLOYD LS100 düzeneginde (Şekil 5.1); ASTM 1761[187]'e uygun biçimde 2,5mm/dk. hız ile gerçekleştirilmiştir. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklerdeki çiviler ile ahşap vidasının deney süreleri RN-G, RN-P1, HN ve WS için sırasıyla; ~3,5 dk., 4,5 dk., 17 dk. ve 2,5 dk. devam etmiştir. Deneyler, kaydedilen en büyük yük değerinin %20'si düzeyine kadar sürdürülmüştür. Sonuçta, çekme kuvveti uygulanan her deney örneğinin yük-yerdeğiştirme ($P-\Delta$) değişiminin sayısal ve görsel verileri kaydedilmiştir.



Şekil 5.1 Çekme direnci deney düzenegi ile deney örneğinin görünümü

Çiviler ile karşılaştırıldığında, ahşap vidasının çekme direncinin daha fazla olması ve deney sürecinde, ahşapta fiziksel bir hasarın oluşmasının önlenmesi amacıyla vida deneylerinde; deney düzeneginin çekme başlığı ve deney örneği arasına, özel çelik bir levha yerleştirilmiştir.

5.1.3 Veri Analizi ve Değerlendirmeler

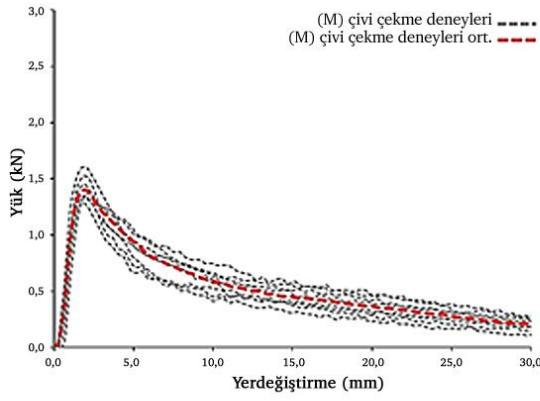
Monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti uygulanan deneylerde; yük-yerdeğiştirme ($P-\Delta$) verileri elde edilmiş ve grafikleri çizilmiştir (Şekil 5.2). Grafiklerde, CLT örnek ile çivi birleşiminin elle yapıldığı (M) yöntem kesik çizgi; çivi çakma tabancası kullanılarak gerçekleştirildiği (G) yöntem ise düz çizgi ile gösterilmiştir. Çivi ve vida türlerinden (RN-G, RN-RG, RN-P1, HN ve WS) en az sekiz deney örneği kullanılmıştır. Sonuçların güvenilirliğinin sağlanması amacıyla deney sürecinde; CLT örneğinde çatlak, kırılma, tabakaların birbirinden ayrılması vb. gözlemlendiği durumlar ile çivide şekil değiştirme oluşması ya da çivi başının

kopması ile karşılaştığında deney durdurularak, bu veriler değerlendirmeye alınmamıştır.

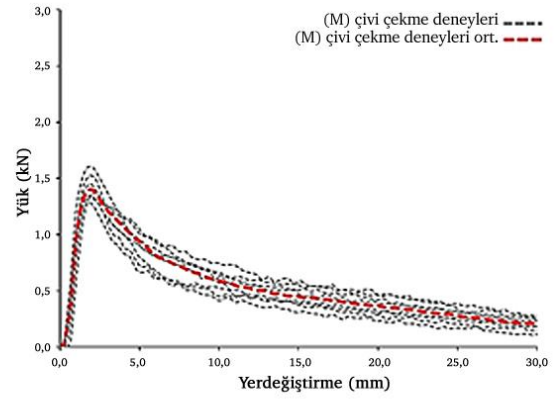
RN-G, RN-RG ve RN-P1 halkalı çivilerinin $P-\Delta$ verileri değerlendirilirken; eğrinin elastik sınıra (P_e) varılana kadar doğrusal davranış gösterdiği, sonrasında doğrusal olmayan bir yol izlemesi ile en büyük yük değerine (P_p) ulaşıldığı görülmektedir. Yapı birleşimlerinin yük aktarımı hesaplamalarında en az, en büyük yük değerinin belirli oranında ($\%80P_e$) dayanım koşulunun sağlanması gerekmektedir.

En büyük yük değeri sonrasında halkalı çivinin eğrisi, doğrusal olmayan yolla azalarak devam etmiştir. Galvaniz ve reçine kaplamalı çivilerin (RN-RG) eğrisinde, elastik sınır düzeyinden sonra, kaplamanın değişmesi nedeni ile eğride farklılık gözlemlense de halkalı çivilerin genel davranışını yansıttığı görülmüştür. Burgulu (HN) çivilerde ise doğrusal yolla artan yük; gövde biçimi nedeniyle yaşanan ilk düşüş anı sonrasında, aşamalı olarak artarak, en büyük yük değerine ulaşır ve yavaşça azalarak devam eder. HN çivilerin gövdesi ile dış (burgu) eksenindeki açının $30-70^\circ$ arasında olduğu bilinmektedir. HN çivi ile karşılaştırıldığında, halkalı çivilerin gövdesi ile dış ekseninde, dik açı olmasının, çekme direncini artırdığı görülmektedir.

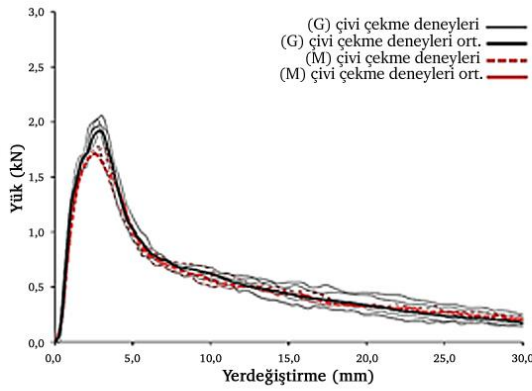
Tablo 5.3'te anlatılan mekanik özelliklerinin yanı sıra gövdesindeki farklı dış yapısı ve ahşap lifleri arasında gerçekleşen sürtünme özelliği ile vida (WS); deney örnekleri içinde en büyük çekme direnci değerini sağlamaktadır. CLT ile ahşap vidasının çekme direnci deneylerinde vidanın, gevrek davranış gösterdiği belirtilmektedir [191]. Halkalı çiviler ile karşılaştırıldığında; WS eğrisinde dik açıyla artan yükleme sonrasında, kısa sürede azalarak devam eden bir davranış görülmektedir.



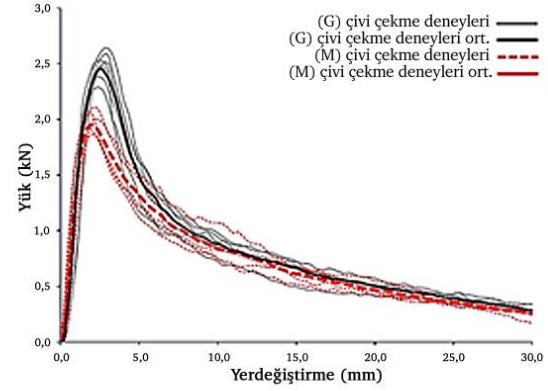
Galvaniz Kap. Halkalı Çivi (RN-G)



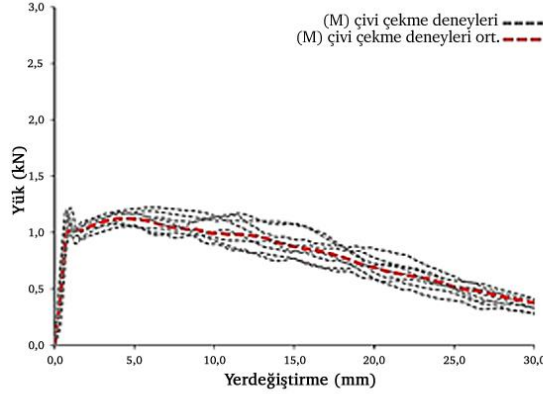
Galvaniz ve Reçine Kap. Halkalı Çivi (RN-RG)



Fosfat Kap. Halkalı Çivi (RN-P1)



Burgulu Çivi (HN)



Ahşap Vidası (WS)

Çivi/Vida	l_{thr} (mm)	P_p (kN)		Δ (mm)	
		G	M	G	M
RN-G	51,58	-	1,41	-	1,82
RN-RG	56,70	1,96	1,72	2,95	2,68
RN-P1	50,86	2,48	1,98	2,67	2,07
HN	63,90	-	1,16	-	4,57
WS	44,66	3,62	-	3,06	-

P_p en büyük yük değeri, l_{thr} etkin gömülme derinliği, M elle çakılma ve G çivi/vida tabancası ile birleştirme.

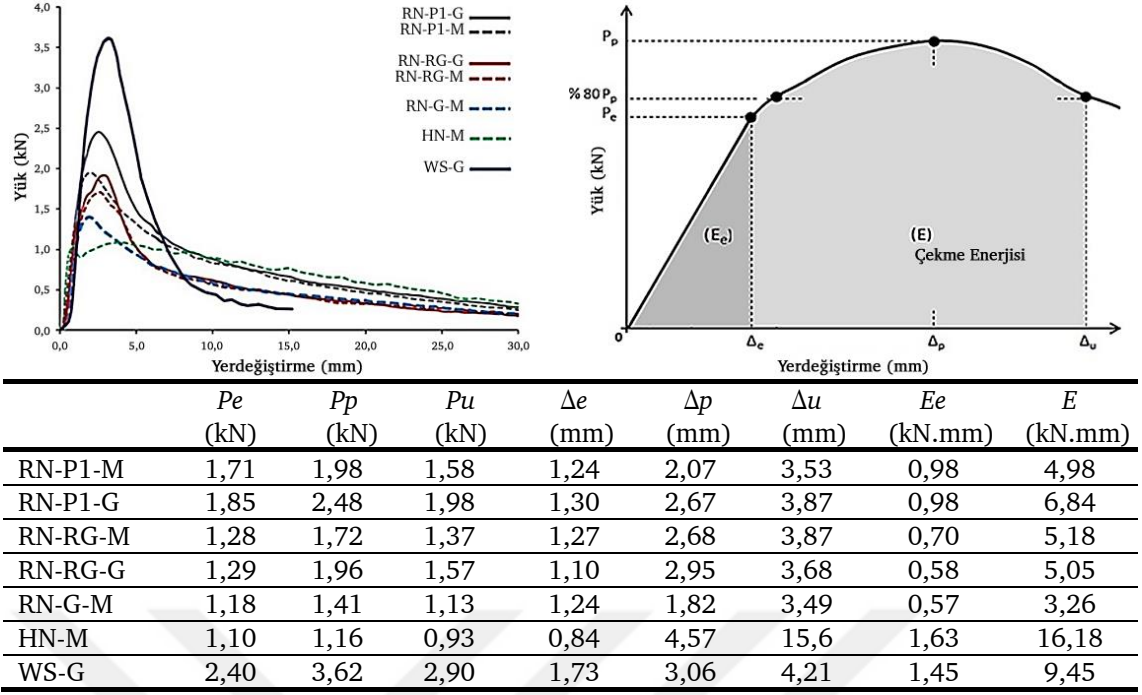
Şekil 5.2 CLT ile çivi/vida çekme direnci $P-\Delta$ karşılaştırmaları

HN çiviler elle; RN-G, RN-RG ve RN-P1 halkalı çivileri ise elin yanı sıra çivi çakma tabancaları kullanılarak birleştirilmiştir. İki yöntem karşılaştırıldığında; çivi çakma tabancası ile gerçekleştirilen deney örneklerinin $P-\Delta$ grafiklerinde ulaşılan en büyük yük düzeyinin (P_p) daha fazla olduğu ve elastik sınır sonrasında, davranış eğrisinin daha dik bir yol izlediği görülmüştür. Bu nedenle çekme direnci

çalışmalarında, çivi çakma tabancası kullanımı ile daha yüksek çekme direnci sağlanabilmektedir.

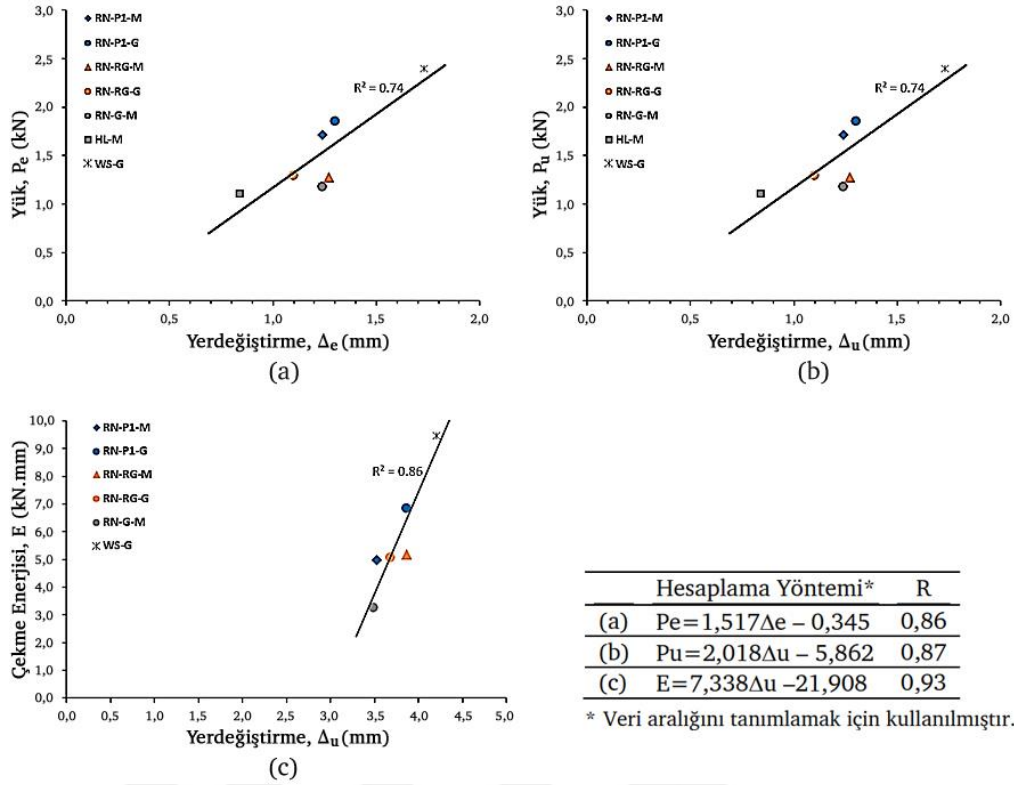
$P-\Delta$ eğrisinin, elastik sınır değerine ulaşıncaya kadar oluşturduğu alan çivi/vidanın elastik bölge çekme enerjisini (E_e); eğri başlangıcından en büyük yük değerinin %80'ine ulaşıncaya kadar oluşturduğu alan ise toplam çekme enerjisini (E) tanımlamaktadır (Şekil 5.3). Bu kapsamda literatür çalışmaları incelendiğinde; Luszczi vd. [192] dışında, çekme enerjisi değerlendirmesinin çoklu çivi/vida birleşimlerinde kullanan bir araştırma ile karşılaşılmamıştır. Ancak CLT panel birleşiminin etkinliğinin kısa sürede belirlenerek, seçilen çivi/vidanın uygunluğunun değerlendirilebilmesinin en etkili yolunun, tekil çivi/vida deneyleri olduğu da bilinmektedir. Bununla birlikte yapı yükleri altında CLT panel duvar-döşeme ve duvar-duvar birleşimlerinin davranışını belirleyen en önemli etken; birleşimi sağlayan çivi/vidanın çekme direnci ile enerji sönmüleyebilme yeteneğidir. Bu kapsamda, deney sonuçlarından elde edilen veriler, $P-\Delta$ grafiklerinin yanı sıra çekme enerjisi yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Şekil 5.3'te çekme enerjisi grafik gösteriminin yanı sıra RN-G, RN-RG ve RN-P1 halkalı çivileri, HN çivi ve WS'nin $P-\Delta$ ortalama değerlerinin grafik karşılaştırmaları ile sayısal değerleri yer almaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme direncinin WS; çivi türleri içinde en düşük çekme direncinin ise HN ile gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.3 Çivi/Vida çekme direnci ve çekme enerjisi değerleri

Deney çalışmalarından elde edilen verilerin değerlendirilmesinde sırasıyla; elastik düzey yük değeri ile yerdeğiştirmesi ($P_e-\Delta_e$), en büyük yük değerinin %80'i ile yerdeğiştirmesi ($P_u-\Delta_u$), çekme enerjisi ile yerdeğiştirmesi ($E-\Delta_u$) arasındaki doğrusal ilişkiler de incelenmiştir (Şekil 5.4). Kullanılan hesaplama yöntemleri, veri aralığını tanımlamak için geçerli olup; değişkenlik katsayılarının (R) ise oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Sonuçta; deney örnekleri içinde yüksek çekme direnci ve enerjisi ile sırasıyla WS ve RN-P1'in en iyi davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Bununla birlikte HN çivinin çekme direncinin en az olmasına karşın, diğer çiviler ile karşılaştırıldığında çekme enerjisinin, en yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle grafiklerde (Şekil 5.4 b ve c) büyük sapmalara neden olan HN verileri, kapsam dışında tutulmuştur.



Şekil 5.4 Çivi/Vida çekme direnci ve çekme enerjisi karşılaştırmaları

Çekme direnci ile ilgili literatür çalışmalarında yer alan değerlendirmelerde, çivi/vida türü ile ahşabın yoğunluğu, özgül ağırlığı vb. değişkenlere göre farklılık gösterebilen birçok hesaplama yöntemi bulunmaktadır. Tablo 5.5'te bu kapsamda çoğunlukla kullanılan yöntemler ve özellikleri görülmektedir. Izzi vd. çalışmasında [151] yer alan yöntem; ETA-04/0013 [193] ile Eurocode 5[35]'te yer alan değerlendirme yöntemlerinin uyarlanması ile oluşturulmuştur. Blaß ve Uibel araştırmalarında [142] önerilen yöntem ise; üç ve beş tabakalı CLT paneller ve farklı türde çivi/vida/kavela ile gerçekleştirilmiş ilk kapsamlı çekme direnci deneyleri olup; bu özelliği ile 400 kg/m^3 yoğunluklu CLT panel birleşimlerinin çekme deneylerinin değerlendirmelerinde Eurocode 5 kapsamına alınmıştır. Tablo 5.5'te yer alan hesaplama yöntemleri, halkalı ve burgulu çivilerin değerlendirmesinde uyarlanarak kullanılmaktadır [194]. Bununla birlikte tezin bu bölümünde, gerçekleştirilen deney çalışmaları sonucunda elde edilen veriler, tabloda yer alan hesaplama yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılarak (Tablo 5.6) bilimsel bir çalışma yayımlanmıştır [186]. Bu çalışmanın sonucunda, galvaniz kaplamalı halkalı çiviler (RN-R-M) için Denklem

1; fosfat kaplamalı çiviler (RN-P1-G) için Denklem 3'ün en iyi değerlendirme yöntemini sağladığı görülmüştür.

Tablo 5.5 Literatürde yer alan çekme direnci hesaplama yöntemleri

Denklem	Çekme direnci hesaplama yöntemleri	Açıklamalar	Kaynak
1	$W = f_{ax} D l_{thr}$ $f_{ax} = 6.125 \left(1 + \frac{1.5D}{l_{thr}} \right) \left(\frac{\rho_k}{350} \right)$ $f_{ax} = (10.92 - 0.0158D - 0.0968l_{thr}) \left(\frac{\rho_k}{320} \right)^2$	(N)	[151]
2	$W = 0.117 D^{0.6} l_{thr} \rho_k^{0.8}$		[142]
3	$W = 73.11 \rho^2 D l_{thr}$	(N)	[195]
4	$W = 77.51 \rho^2 D$	(N/mm)	[196]
5	$W = 36.10^{-6} \rho_k^2 D$	(N/mm)	Halkalı ve burgulu çiviler (diş açısı $\leq 60^\circ$) [197]
6	$W = 42.8 \rho^{1.38} D$	(N/mm)	Halkalı çiviler ($r^2=0,57$) [198]
7	$W = 29.6 \rho^{1.28} D$	(N/mm)	Burgulu çiviler ($r^2=0,76$)
8	$W = 108.25 \rho^2 D l_{thr}$	(N)	Ahşap vidaları [195]

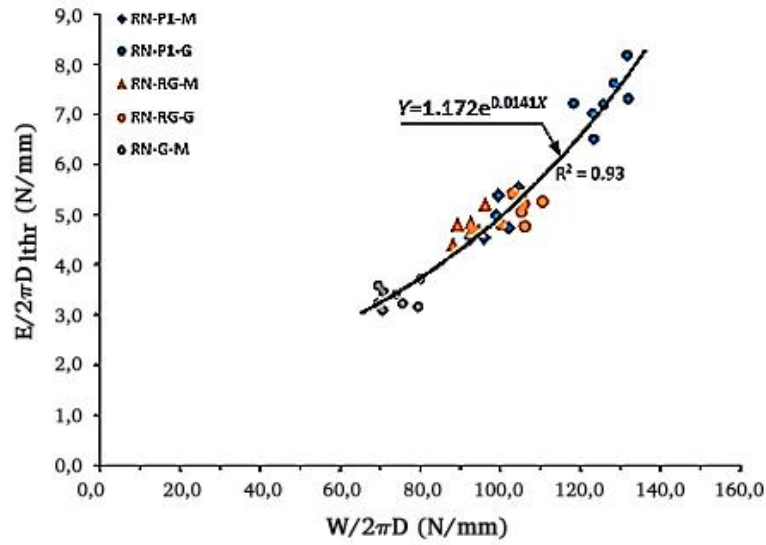
W çekme direnci, ρ_k CLT yoğunluğu (kg/m^3), ρ CLT özgül ağırlığı, l_{thr} çivi/vidanın etkin gömülme derinliği (mm), D çivi/vida gövde çapı (mm)

Tablo 5.6 Deney sonuçları ile hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılması

Çivi/vida	Deney sonuçları (N/mm)	Çekme direnci hesaplama yöntemleri ile elde edilen sonuçlar (N/mm)						
		1	2	3	4	5	6	7
RN-P1-M	39,06	28,19 (+%27,7)	31,73 (+%18,6)	49,50 (-%27,0)	2,48 (-%34,62)	4,38 (+%37,47)	46,90 (-%20,3)	35,06 (+%10,1)
RN-P1-G	49,53	28,19 (+%42,2)	31,73 (+%35,9)	49,50 (+%2,6)	2,48 (-%4,9)	4,38 (+%50,0)	46,90 (+%6,3)	35,06 (+%28,2)
RN-P2-G	41,58	25,57 (+%38,5)	29,61 (+%28,8)	44,09 (-%6,06)	6,74 (-%12,4)	1,71 (+%47,8)	41,77 (+%1)	31,22 (+%24,9)
RN-RG-M	30,37	25,60 (+%15,6)	30,22 (+%1,5)	45,64 (-%50,4)	8,38 (-%59,4)	2,47 (+%26,0)	43,24 (-%42,5)	32,32 (-%6,5)
RN-RG-G	34,62	25,60 (+%26,0)	30,22 (+%12,6)	45,64 (-%31,9)	48,38 (-%39,9)	22,47 (+%35,0)	43,24 (-%25,0)	32,32 (+%6,6)
RN-G-M	27,40	25,78 (+%3,9)	30,22 (-%10,7)	45,64 (-%67,3)	48,38 (-%80,4)	22,5 (+%16,2)	43,24 (-%61,2)	32,32 (-%17,5)
HL-M	18,16	26,31 (-%45,2)	17,33 (-%67,7)	46,60 (-%156,7)	50,02 (-%176,1)	23,23 (-%28,2)	44,70 (-%147)	33,41 (-%84,4)

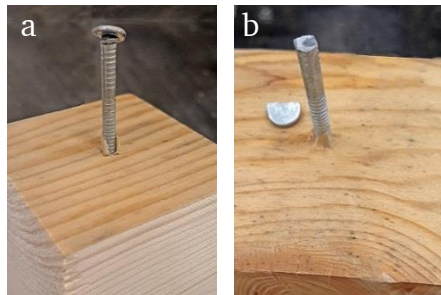
$$MPE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) / O_i \right] * 100, \%$$

Bu çalışma kapsamında önerilen, halkalı çivilerin birim uzunluğunun çekme enerjisi ($W/2\pi D$) ile çekme direnci ($E/2\pi D l_{thr}$) değişimlerinin karşılaştırılması yönteminin; fosfat kaplamalı (RN-P1) ve galvaniz ve reçine kaplamalı (RN-RG) çiviler için kullanılabileceği görülmektedir (Şekil 5.5). Elde edilen sonuçlara göre; RN-P1 çivilerinin çivi tabancası ile birleştirilmesinin, elle birleşim ile karşılaştırıldığında daha yüksek çekme direnci ve çekme enerjisi sağladığı görülmektedir.



Şekil 5.5 Halkalı çivilerin çekme direnci ve çekme enerjisi karşılaştırması

Çivi çekme direnci deney çalışmalarında gerçekleşen hasar türleri Şekil 5.6'da görülmektedir. Burada RN-G çivisi başında şekil değiştirme (a) oluşmuş; RN-RG çivi başı ise kopmuştur (b). Bu hasarların, CLT panelin iç yapısındaki budak vb. bir durum ya da çivinin üretimi ile ilgili bir sorunla ilişkili olup olmadığının belirlenebilmesi için kapsamlı çalışmalar yapılmalıdır.



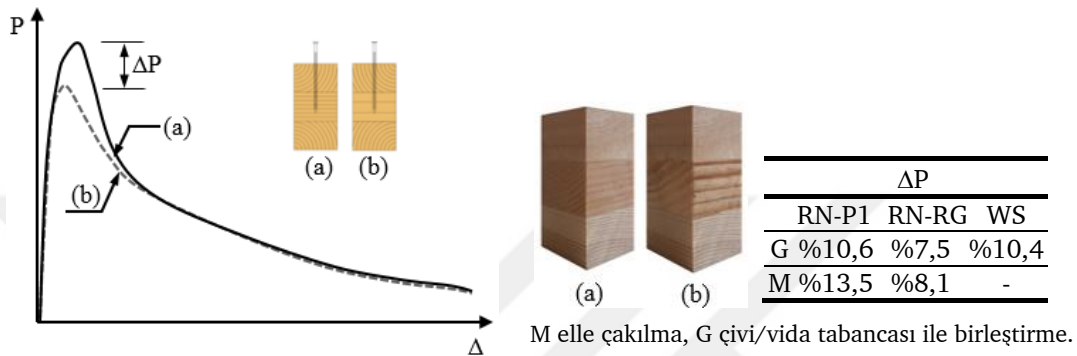
Şekil 5.6 Çivi/Vida çekme direnci deneylerinde hasar türleri

5.1.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CLT ile çivi/vida çekme direnci deney çalışmaları kapsamında; farklı fiziksel ve mekanik özellikte halkalı çiviler, burgulu çivi ve ahşap vidasının ahşap liflerinden çekme direnci ve çekme enerjisi incelenmiştir. Yapı yükleri altında CLT panel duvar-döşeme ve duvar-duvar birleşimlerinin davranışını belirleyen en önemli etken, birleşimi sağlayan çivi/vidanın çekme direnci ile enerjiyi sönmüleyebilme yeteneğidir. Bu kapsamda, deneylerden elde edilen sonuçlar;

- Yüksek çekme direnci ve çekme enerjisinin yanı sıra dış ortam koşullarına dayanıklılığı ile fosfat kaplamalı halkalı çivinin (RN-P1) en iyi davranışı gösterdiği belirlenmiştir.
- Çekme direnci çok yüksek olmasına karşın ahşap vidası (WS), gevrek davranış göstererek ahşap liflerinde ezilme ve kırılmalara neden olmuştur.
- Burgulu çivinin (HN) çekme direncinin en az olmasına karşın, diğer çiviler ile karşılaştırıldığında çekme enerjisinin, yüksek olduğu görülmüştür.
- Çivilerdeki kaplama işlemlerinin CLT birleşimin dayanımı ve çivi/vidanın çekme direnci üzerinde yarattığı etkiyi araştıran bilimsel yayınların yetersiz olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, deney sonuçlarından elde edilen veriler ile fosfat ve reçine kaplamalı halkalı çivilerin, CLT birleşimlerinde kullanılmasını inceleyen ilk çalışma yayımlanmıştır [186].
- Bu çalışmada CLT ile çivi birleşiminin; elle ya da çivi tabancası kullanılarak uygulanması yöntemlerinin, çivinin çekme direnci ve çekme enerjisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, CLT panel birleşimlerinin davranışı üzerinde, bu etkinin araştırıldığı bir yayın ile karşılaşılmamıştır. Sonuçlar, çivi çakma tabancası kullanımı ile RN-P1 çivisi için %25; RN-RG çivisinde ise %13 daha yüksek çekme direncinin sağlanabildiğini göstermektedir.
- Çalışma kapsamında önerilen, halkalı çivilerin birim uzunluğunun çekme enerjisi ile çekme direnci değişimlerinin karşılaştırılması yönteminin; fosfat kaplamalı (RN-P1) ve galvaniz ve reçine kaplamalı (RN-RG) çiviler için kullanılabileceği görülmüştür.

Çalışmada ayrıca CLT tabakalarının lif yönleri ile lif yapısının sıkı ya da seyrek nitelikte olmasının, çivi/vidanın çekme direnci üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Deney örneklerinin ~%70'sinde üst, orta ve alt tabakalar sıkı nitelikte olup; %30'unda ise orta katmanında seyrek lifli yapı bulunmaktadır. RN-P1, RN-RG çivileri ile WS için yapılan değerlendirmede; orta tabakasında seyrek lif yapısı bulunan CLT deney örneklerinde, çivi/vidanın ahşap liflerinden çekme direncinin %7,5-13,5 daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.7).



Şekil 5.7 CLT tabakalarının lif yoğunluğu ve yapısına bağlı $P-\Delta$ ilişkisi

5.2 CLT Panel Duvar-Döşeme Birleşimleri Deneyleri

Depreme dayanıklı ahşap yapı tasarımı kapsamında literatür araştırmaları incelendiğinde, CLT panel birleşimlerinin etkinliğini ölçen deney çalışmalarının; birleşim deneyleri ve taşıyıcı duvar deneyleri olmak üzere iki alanda yoğunlaştığı görülmektedir. CLT duvar deneyleri ile karşılaştırıldığında CLT panel birleşimleri deneyleri; daha küçük ölçekli ve düşük maliyetli olup, birleşimin davranışının belirlenebilmesinde öncü araştırmalardır.

Nüfusunun büyük bir bölümü deprem riski altında olan Türkiye’de, deprem ivmesinin yapının kütlesi ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde; daha hafif ve dayanıklı taşıyıcı sistemlere gereksinim olduğu açıktır. Bu bağlamda, incelenmesi gereken öncelikli alan; özellikle Türkiye’de üretilen metal birleşimler kullanılarak, CLT panel birleşimlerinin etkinliğinin araştırılması konusudur. Yapıya etkileyen yükler altında CLT birleşimlerinin dayanımının belirlenebilmesi için öncelikle, birleşimi sağlayan çivi/vida ile CLT arasındaki etkileşimin tanımlanması

gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar Bölüm 5.1’de anlatılmıştır. Burada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin tasarlanması ve üretilmesi ile birleşimlerin; eğilme momentinin çekme kuvveti altındaki etkinliği incelenmiştir. Bu kapsamda gerçek boyutlu paneller kullanılarak, monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti altında, CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışlarını inceleyen deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapı birleşimlerinin davranışı, deney düzeneğine yerleştirilen ölçüm araçları ve görüntüleme yöntemleri ile kayıt altına alınarak; ayrıntılı gözlemler ile detaylı olarak incelenmiştir. Tezin bu bölümünde; İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’nda gerçekleştirilen CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin deney çalışmaları ve sonuçları incelenecektir.

5.2.1 Deney Örneklerinin Hazırlanması



Türkiye’de, uluslararası yönetmeliklere uygun CLT panel üretiminin yapılamaması ve deney çalışmalarından elde edilecek sonuçların, literatürde yer alan veriler ile karşılaştırılabilmesi amacıyla; deney örneklerinde kullanılacak paneller²⁹, Avrupa’da büyük hacimli üretimler gerçekleştiren bir üreticiden sağlanmıştır.

Yapı birleşiminde, duvar ve döşeme elemanı olarak kullanılacak panellerin seçiminde; literatür çalışmalarının yanı sıra yapıda, yerinde uygulamalar da göz önüne alınarak, beş tabakalı 180 mm kalınlığında döşeme ve 100 mm kalınlıkta üç tabakalı duvar elemanı³⁰ kullanılmıştır. Tablo 5.7’de deney örneklerinde kullanılan duvar ve döşeme panellerinin özellikleri görülmektedir. Deneye başlamadan önce kesilen CLT paneller, %12 nem içeriğinin korunabilmesi amacıyla, $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve $\%65 \pm 5$ bağıl nem koşullarında bekletilmiştir.

²⁹ C24 dayanımlı CLT paneller, Asmaz Ahşap Yapı aracılığı ile Stora Enso’dan sağlanmıştır.

³⁰ Bölüm 4.2’de yer alan literatür çalışmaları incelendiğinde panel birleşimi deneylerinde çoğunlukla üç tabakalı duvar panellerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu kapsamda deney çalışmalarının amacı, çekme kuvveti altında duvar elemanının, döşemeden ayrılma davranışının incelenmesi olduğundan; duvar panelinin daha fazla tabakalı seçilmesine gerek görülmemiştir.

Tablo 5.7 Deney örneklerinde kullanılan CLT panelin özellikleri

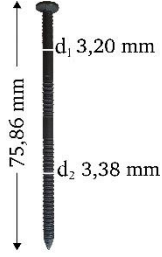
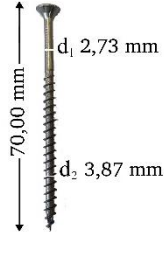
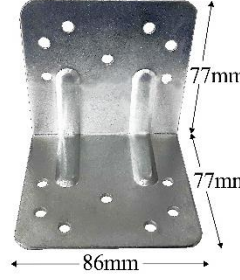
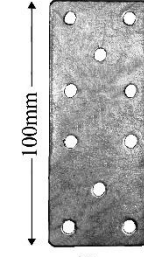
CLT panel	CLT panel özellikleri	
 3 tabakalı	Ağaç türü	Ladin
	Tabaka yapısı	3 tabakalı; 33-34-33 mm (duvar) 5 tabakalı; 40-30-40-30-40 mm (döşeme)
	Dayanım sınıfı	C24 [10]
 5 tabakalı	Yoğunluk	470 kg/m ³
	Nem içeriği	%12±2
	Tutkal türü	Formaldehit içermeyen tutkal
	Kullanım sınıfı	EN 1995-1-1 Sınıf 1 ve 2 [35]

CLT panelin duvar-döşeme metal birleşimlerinde; rijitliği artırılmış eşit kollu çelik köşebent, düz metal levha, fosfat kaplamalı halkalı çiviler ile ahşap vidaları kullanılmıştır³¹. Kullanılan fosfat kaplamalı çivi ve vidaların özellikleri Bölüm 5.1.1’de ayrıntıları ile incelenmiştir.

Rijitliği artırılmış köşebent ve düz levha üzerinde, fabrika üretimleri aşamasında açılmış delikler bulunmaktadır. Çelik köşebent ile halkalı çiviler Türkiye’deki bir üreticiden elde edilirken; ahşap vidaları ise yurtdışı asıllı bir kurumdan sağlanmıştır. Halkalı çiviler, elle ya da taşınabilir çivi çakma tabancaları kullanılarak uygulanabilmektedir. Tez kapsamında birleşim deneyleri örneklerinin hazırlanması aşamasında tüm çiviler, metal birleşimlere el ile çakılmıştır. Deney çalışmaları kapsamında birleşimleri oluşturan metal parçalar ve özellikleri Tablo 5.8’de görülmektedir.

³¹ Birleşimleri oluşturacak metal parçaların seçiminde, Bölüm 4.2’de yer alan literatür çalışmalarından elde edilen veriler değerlendirilerek; Türkiye koşullarında üretimi gerçekleştirilebilecek CLT metal birleşimlerinin tasarlanması amaçlanmaktadır.

Tablo 5.8 CLT panel duvar-döşeme metal birleşimlerinin özellikleri

Halkalı çivi (RN-P1)	Ahşap vidası (WS)	Güçlendirilmiş çelik köşebent	Metal levha
 <p>75,86 mm d₁ 3,20 mm d₂ 3,38 mm</p>	 <p>70,00 mm d₁ 2,73 mm d₂ 3,87 mm</p>	 <p>77mm 77mm 86mm kalınlık, 2mm delik çapı, Ø 5mm</p>	 <p>100mm ← 40mm → kalınlık, 2mm delik çapı, Ø 5mm</p>

Bölüm 4.2'de değinildiği gibi; literatürde yer alan CLT panel birleşimleri deneylerinde çoğunlukla 2,5-3 mm kalınlığındaki köşebentlerin kullanıldığı görülmektedir. Yapılan görüşmelerde; Türkiye koşullarında, 2 mm kalınlığında güçlendirilmiş köşebent seri üretiminin olması ve farklı kalınlıkta metal parçaların üretebilmesi için kalıp değişikliği maliyetinin, önemli bir talep artışı söz konusu olmadıkça üreticiler tarafından karşılanamayacağı bilgisi edinilmiştir. Bu nedenle duvar-döşeme birleşimlerinde 2 mm kalınlığında çelik köşebentler kullanılmış olup, dayanımın artırılabilmesi amacıyla birleşimde ek önlemler alınmıştır. Deney öncesi yapılan öncü çalışmalarda; çekme kuvveti altında, köşebentin döşemeye tutunma yeteneğinin artırılabilmesi amacıyla, döşemenin duvara birleştiği delik açılmamış köşe bölgesinde, ek çivi/vidaların kullanılmasının yararlı olacağı görülmüştür. Bu kapsamda, deney örneklerinin birinde; köşebentin bu bölgesinde birleşimin dayanımının artırılması amacıyla aynı özellikte çiviler eklenmiştir.

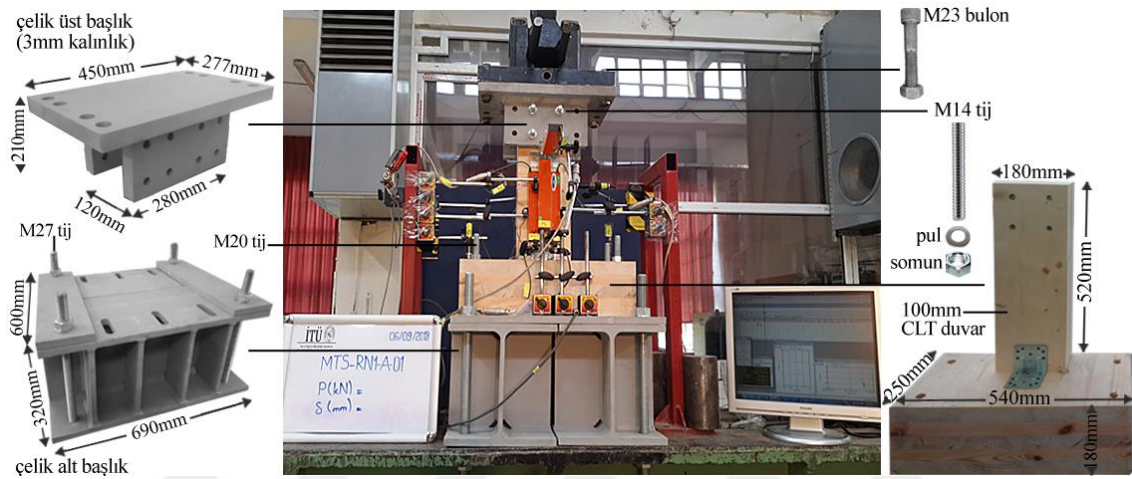
CLT panel duvar-döşeme birleşimleri deney çalışmalarında; metal birleşim parçaları ile bir araya getirilen, gerçek boyutlu deney örneğine, düşey konumlu yük veren ile çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu kapsamda oluşturulan deney örnekleri ve özellikleri Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5.9 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri deney örnekleri ve özellikleri

	Deney örneğinin yan ve arka yüzü	CLT duvar-döşeme paneli birleşimi özellikleri
MTS-RN-A-01 hazırlık deneyi		<p>Ön yüzde; 14 RN-P1 ile köşebent birleşimi Arka yüzde; birleşimde levha kullanılmamıştır.</p>
MTS-RN-A-02		<p>Ön yüzde; 14 RN-P1 ile köşebent birleşimi Arka yüzde; 8 RN-P1 ile levhaların birleşimi</p>
MTS-RN-A-03		<p>Ön yüzde; 17 RN-P1 ile köşebent birleşimi Arka yüzde; 12 RN-P1 ile levhaların birleşimi</p>
MTS-WS-A-04		<p>Ön yüzde; 14 WS ile köşebent birleşimi Arka yüzde; 20 RN-P1 ile levhaların birleşimi</p>
MTS-RN-2A-05		<p>Ön yüzde; 14 RN-P1 ile köşebent birleşimi Arka yüzde; 13 RN-P1 ile levhaların birleşimi</p>

5.2.2 DeneY Düzeneği ve Veri Toplama

Monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti altında, CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışının incelendiği deneY çalışmaları; İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. DeneY düzeneğinin kurulumu öncesinde; CLT panellerin yük veren ile bağlantısının yapılabilmesi için çelik üst/alt başlık tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olup düzeneğin birleşim detayları Şekil 5.8'de görölmektedir.



Şekil 5.8 CLT panel duvar-döşeme birleşimi deneY düzeneği ve detayları

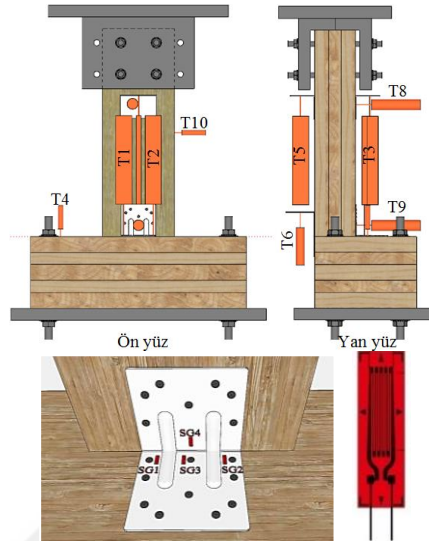
Birleşim deneylerinde; düşey konumlu yük veren (± 300 mm ve ± 250 kN) ile EN 26891[199]'e uygun olarak, 0,04 mm/sn (2,5 mm/dk.) yükleme hızıyla çekme kuvveti uygulanmıştır. Birleşim örneğinin, düzenekle tam olarak örtüşmesini sağlamak amacıyla; deneY başlangıcında $\sim 1,5$ kN basınç kuvveti uygulanmış, sonrasında yük sıfıra getirilerek, çekme kuvvetinin uygulanmasına geçilmiştir. DeneY süreleri yaklaşık 3 saat olup, köşebent ile döşeme birleşimini sağlayan tüm çivilerin, CLT panelden sıyrılması tamamlanıncaya kadar devam etmiştir.

Birleşim bölgesine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerler (T1-T10)³² ile tüm mutlak ve görel yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Ayrıca köşebent üzerine şekil değiştirme ölçerler³³ (SG1-SG4) yapıştırılarak tüm veriler kayıt altına alınmıştır (Tablo 5.10).

³² Yerdeğiştirmenin daha fazla beklenildiği yerlerde 100 mm ya da 50 mm'lik; düzlem dışı hareketin ölçüldüğü yerlerde ise 25 mm'lik ölçüm araçları (T4 ve T10) kullanılmıştır.

³³ Şekil değiştirme ölçerler; 3mmx10mm boyutlarında, 120 ohm dirençli ve tek eksenlidir.

Tablo 5.10 Deney düzeneklerindeki yerdeğiştirme ve şekil değiştirme ölçerler

	Ölçüm	Ölçüm yönü	Ölçüm doğrultusu	Deney düzeneğindeki konumu
Yerdeğiştirme (mm)	T1	Düşey (ön yüz)	↓	
	T2		↑	
	T3	Düşey (ön yüz)	↓	
	T4		↑	
	T5	Düşey (arka yüz)	↓	
	T6		↑	
	T8	Yatay (ön yüz, üst)	←	
	T9		←	
	T10	Yatay (yan yüz)	←	
	Şekil değiştirme (μ)	SG1	Köşebent (döşeme)	
SG2		Düşey		
SG3		Köşebent (döşeme, merkezde)	Düşey	
SG4				Köşebent (duvar, merkezde)

5.2.3 Veri Analizi ve Değerlendirmeler

CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışının belirlenebilmesinde öncelikle; yük-yerdeğiştirme ($P-\delta$) değişimi incelenmiştir. Yerdeğiştirme ölçümünde, deney örneğinin ön yüzünde T3; arka yüzünde ise T5 düşey yerdeğiştirme ölçerden alınan veriler değerlendirilmiştir. Birleşimi sağlayan çelik köşebent üzerine yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler ile metal üzerindeki değişimler kayıt altına alınmıştır. Elde edilen verilerin karşılaştırılabilmesi için deneylerde, aynı değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır.

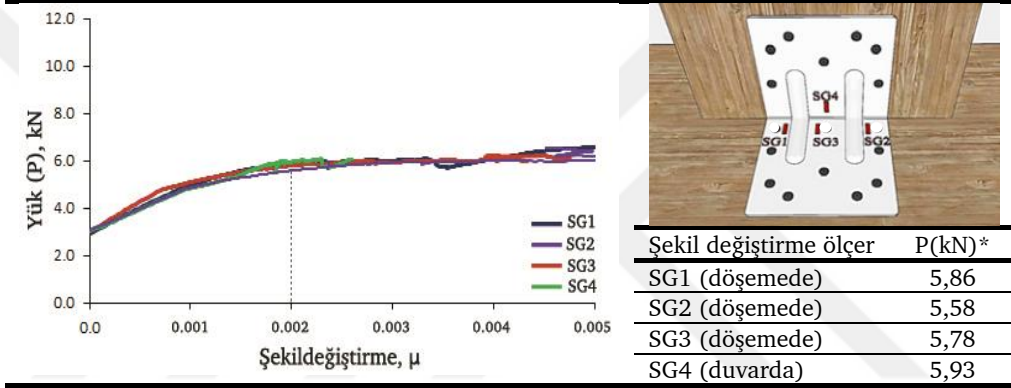
Çalışmalar, MTS-RN-A-01 hazırlık deneyi ile başlamış olup; burada elde edilen sonuçlar değerlendirilerek diğer birleşim örnekleri üretilmiştir. Bu kapsamda; birleşimin ön yüzünde çelik köşebent ve arka yüzünde metal levhaların birlikte kullanıldığı deneyler (MTS-RN-A-02, MTS-RN-A-03 ve MTS-WS-A-04) ile CLT duvar panelinin, döşeme elemanının merkezine, iki köşebent ile birleştirildiği deney (MTS-RN-2A-05) gerçekleştirilmiştir.

5.2.3.1 MTS-RN-A-01 Hazırlık Deneyi

Hazırlık deneyinin amacı, CLT panel duvar-döşeme birleşimini sağlayan çelik köşebent ve halkalı çivilerin (RN-P1), çekme kuvveti altında davranışlarının

belirlenmesi ile elde edilecek sonuçların, CLT ile çivi/vida çekme direnci çalışmaları ile karşılaştırılmasının sağlanmasıdır. $P-\delta$ grafiği incelendiğinde; çekme kuvvetinin etkisi ile birleşim örneği, önce yukarı doğru hareket etmiş; köşebenti birleştiren çivilerin sıyrılması ile dönmeye başlamıştır. Bu durum T3 ile benzer davranış gösteren T5'in, başlangıçta ve özellikle son aşamadaki farklılığını oluşturmuştur. Tablo 5.12'de $P-\delta$ grafiği ile deney sürecindeki önemli gözlemler ve görselleri görülmektedir. Çelik köşebent üzerinde yer alan şekil değiştirme ölçerler, artan yük düzeyi ile doğru orantılı olarak artmış; %0,2'ye ulaşmış ve elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelmiştir (Tablo 5.11).

Tablo 5.11 MTS-RN-A-01 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri

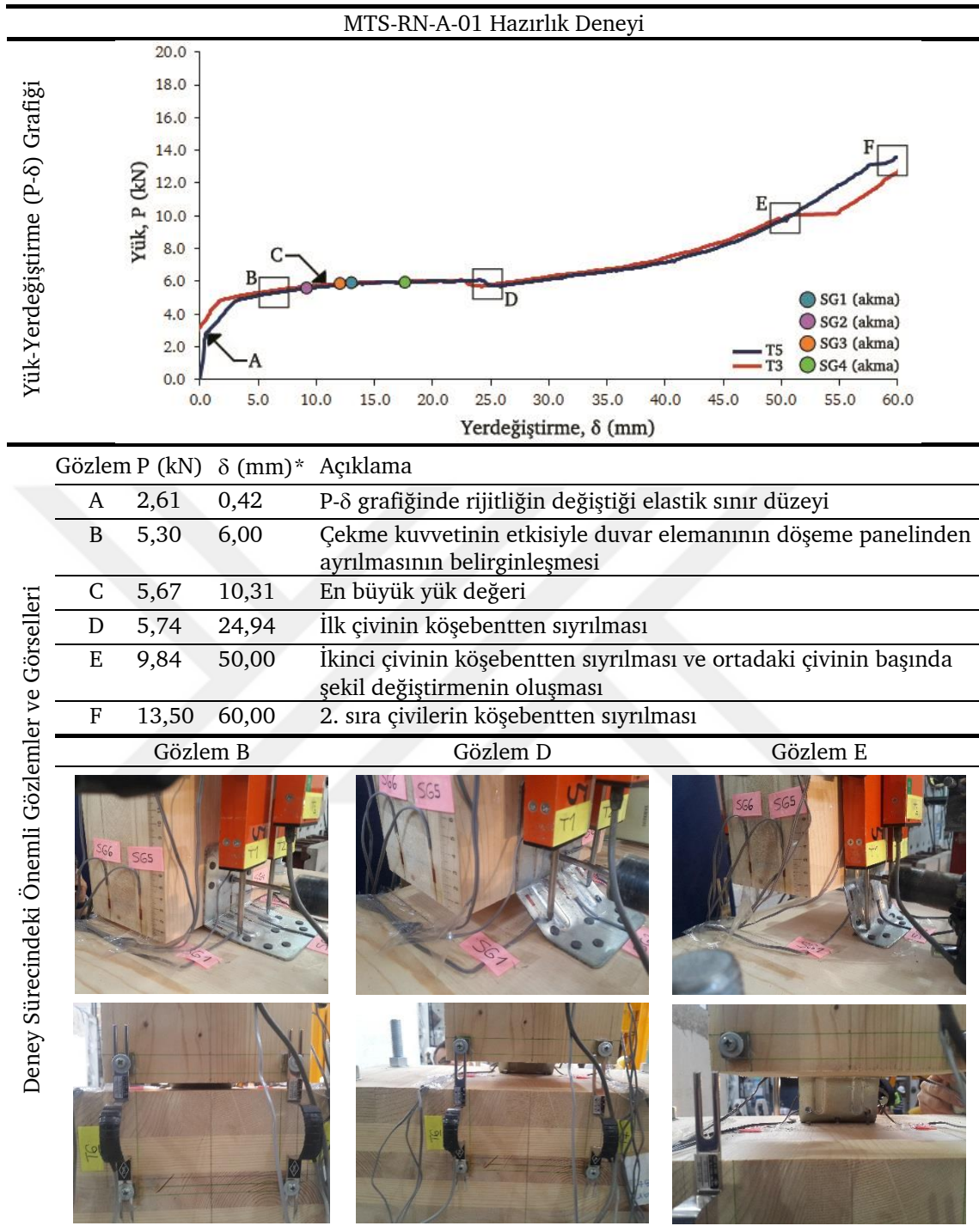


* Şekil değiştirme ölçer (%0,2) değerleri

MTS-RN-A-01 hazırlık deneyinde, yerdeğiştirme ölçerler çıkarıldıktan sonra yükleme hızı, 1,5 kat artırılarak tüm çivilerin döşeme panelinden sıyrılması izlenmiştir. Şekil 5.9'da deney sonucunda, CLT duvar-döşeme birleşimini sağlayan çelik köşebent ile halkalı çivilerin son görünüşleri yer almaktadır.



Şekil 5.9 MTS-RN-A-01 deneyi sonucunda birleşimin görünümü

Tablo 5.12 MTS-RN-A-01 hazırlık deneyi $P-\delta$ grafiği ve gözlemleri

* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

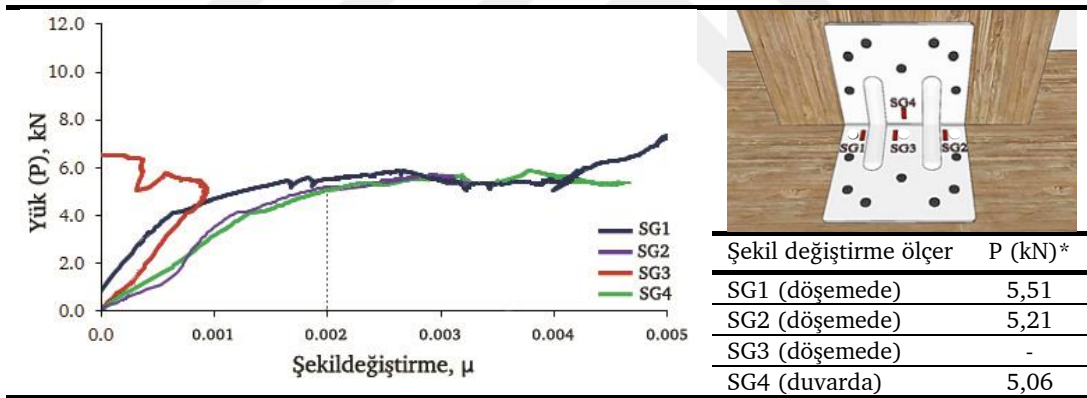
5.2.3.2 MTS-RN-A-02 Deneyi

MTS-RN-A-02 deneyinde, hazırlık deneyinden farklı olarak; CLT panel duvar-döşeme birleşiminin arka yüzünde, halkalı çiviler (8 adet) ile metal levhalar birleştirilmiştir. Deneyin amacı; çelik köşebent ile birlikte CLT duvar-döşeme

birleşim bölgesine yakın, arka yüzde uygulanan halkalı çivilerin, çekme kuvveti altında davranışının belirlenmesidir. $P-\delta$ grafiği incelendiğinde; benzer davranış gösteren T3 ile T5'in başlangıç ve son aşamasında küçük farklılıkları olduğu görülmektedir. Deney örneğinin arka yüzündeki levha-1'i birleştiren çiviler nedeniyle döşeme panelinde oluşan ilk çatlak sonrasında çivilerin sıyrılması ile CLT duvar-döşeme birleşimi, levha-2 doğrultusunda rijit davranış göstermiştir. Tablo 5.14'te $P-\delta$ grafiği ile deney sürecindeki önemli gözlemler ve görselleri görülmektedir.

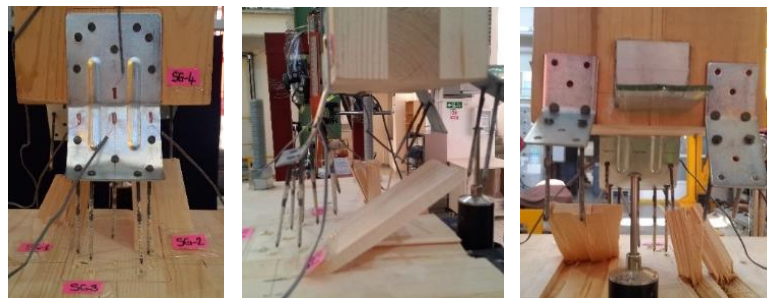
Çelik köşebent üzerinde yer alan SG1, SG2 ve SG4 şekil değiştirme ölçerler, artan yük düzeyi ile doğru orantılı olarak artmış; %0,2'ye ulaşmış ve elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelmiştir. Ancak SG1 ile benzer davranış göstermesi beklenen SG2, %0,1 şekil değiştirme değerine ulaştıktan sonra farklı bir yol izlediği için değerlendirmeye alınmamıştır (Tablo 5.13).

Tablo 5.13 MTS-RN-A-02 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri



* Şekil değiştirme ölçer (%0,2) değerleri

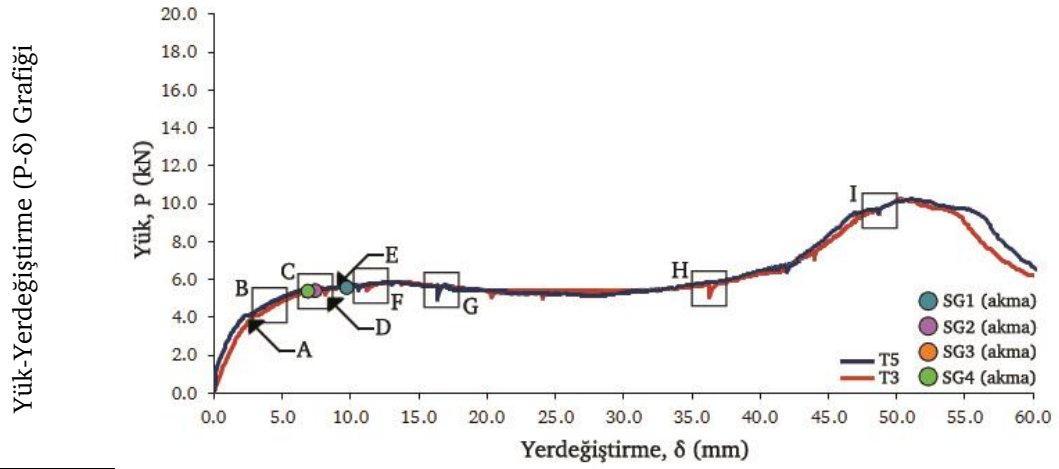
Yerdeğiştirme ölçerler çıkarıldıktan sonra yükleme hızı artırılarak tüm çivilerin döşeme panelinden sıyrılması izlenmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 MTS-RN-A-02 deneyi sonucunda birleşimin görünümü

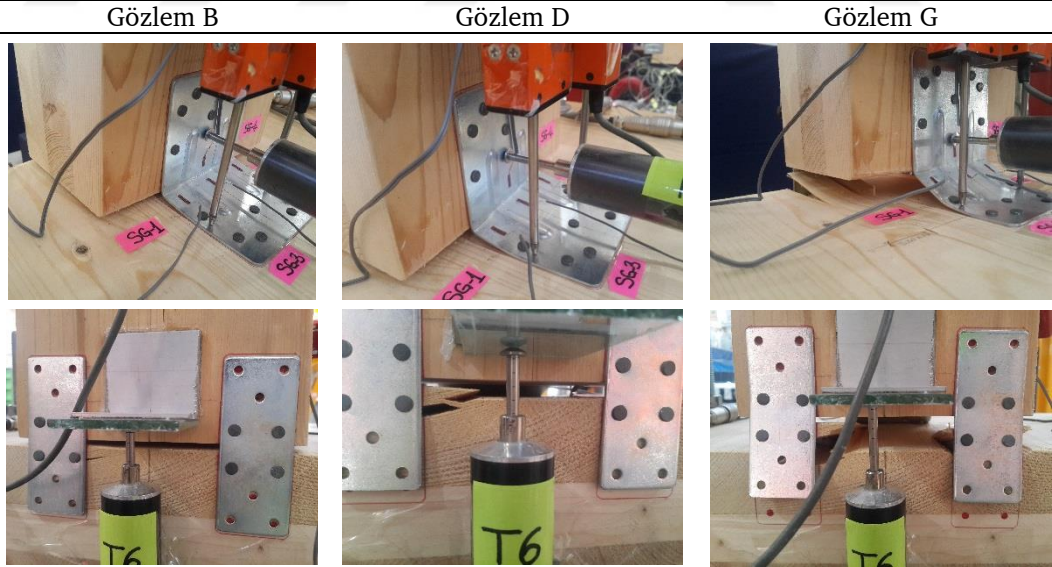
Tablo 5.14 MTS-RN-A-02 deneyi P- δ grafiği ve gözlemleri

MTS-RN-A-02 Deneyi



Gözlem	P (kN)	δ (mm)*	Açıklama
A	3,94	2,04	P- δ grafiğinde rijitliğin değiştiği elastik sınır düzeyi
B	4,69	4,20	Levha-1 nedeniyle döşeme panelinde ilk çatlak oluşması
C	5,36	6,87	İlk çatlak giderek derinleşmesi
D	5,45	7,75	Levha-1 birleşiminde çatlak oluştuğu bölgede çivinin sıyırılması
E	5,58	9,28	En büyük yük değeri
F	5,68	10,80	Köşebent birleşiminde ilk sıradaki çivilerin direnç göstermesi
G	5,70	16,00	Döşeme panelindeki çatlakların giderek derinleşmesi
H	5,94	35,94	Arka yüzdeki levhaların çivilerinin sıyırılması
I	9,44	49,11	İkinci sıradaki çivilerin köşebentten sıyırılması

Deney Sürecindeki Önemli Gözlemler ve Görselleri



* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

5.2.3.3 MTS-RN-A-03 Deneyi

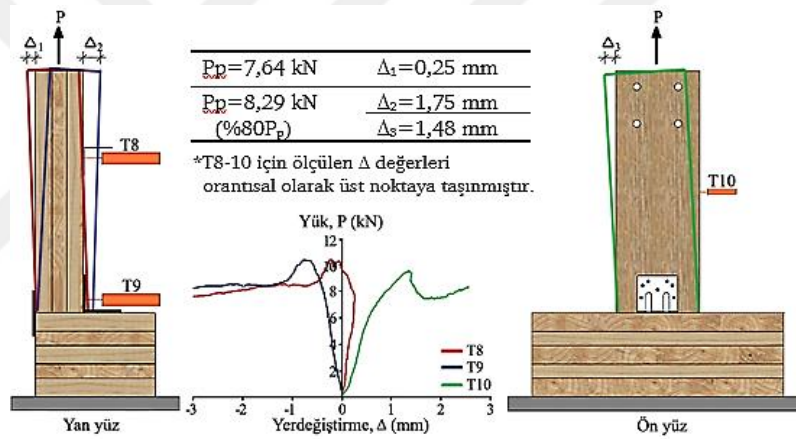
MTS-RN-A-03 deneyinde, CLT panel duvar-döşeme birleşiminin arka yüzünde, halkalı çiviler (12 adet) ile metal levhalar birleştirilmiştir. Deneyin amacı, MTS-RN-A-02'den farklı olarak; çelik köşebent ile birlikte CLT duvar-döşeme birleşim bölgesine yakın, arka yüzde uygulanan halkalı çivilerin sayısı artırıldığında gerçekleşecek davranışının belirlenmesidir. Bununla birlikte önceki deneylerde, çekme kuvveti altında, köşebentin döşeme paneline tutunma yeteneğinin artırılabilmesi amacıyla döşemenin, duvara birleştiği köşebentin delik açılmamış köşe bölgesinde, ek çivi kullanılmasının yararlı olacağı görülmüştür. Bu kapsamda deney örneğinde, köşebentin bu bölgesinde dayanımın artırılması amacıyla aynı özellikte çiviler (3 adet) eklenmiştir.

$P-\delta$ grafiği (Tablo 5.16) incelendiğinde; yerdeğiştirme ölçümünde, deney örneğinin ön yüzünde T3 düşey yerdeğiştirme ölçerden alınan veriler değerlendirilmiştir. Arka yüzdeki iki birleşim levhasının, çekme yönünde hareketini ölçen T5 ve T6'nın, T3'e benzer ölçümleri nedeniyle; grafiklerde T6 ölçümleri gösterilmemiştir. T3 ile benzer davranış gösteren T5'in, başlangıçta ve özellikle son aşamadaki büyük farklılığı açıkça görülebilmektedir. T5'in $\delta \sim 50$ mm'de değişkenlik göstermesinin öncelikli nedeni; arka yüzdeki levhaların çivileri nedeniyle döşeme tabakasında oluşan göçmenin etkisidir. Grafikte; rijitliğin değiştiği elastik sınıra $P=7,25$ kN, $\delta=2,74$ mm düzeyinde ulaşılmıştır; En büyük yük değeri ise 10,37 kN olup 6,72 mm yerdeğiştirmeye karşı gelmektedir. En büyük yük düzeyine varıncaya kadar doğrusal davranış izlenmiş, sonrasında ise belirli yerlerde ani düşüşler gözlenmiştir.

Tablo 5.16'da $P-\delta$ grafiğinin yanı sıra deney sürecindeki önemli gözlemler ve görseller de görülmektedir. Çekme kuvvetinin etkisiyle, köşebentin döşeme yüzeyinden hafifçe ayrılmasının hemen ardından, arka yüzdeki levha-1'i döşemeye birleştiren üst sıradaki çivilerin olduğu yerden, döşemede enine yönde açılma ile ilk çatlak oluşmuştur (Gözlem A). En büyük yük değerine ulaşılmadan önce benzer hasar oluşumu, levha-2 birleşiminde de izlenmiştir (Gözlem D). Döşeme tabakalarındaki lif kırılmaları ve duvar panelinin yukarı yönde hareketi

nedeniyle, arka yüzdeki levhalarda eğilme davranışı oluşmaya başlamıştır (Gözlem F). Köşebentin döşeme yüzeyinden ayrılmasının (Gözlem K) ardından; ikinci sırada yer alan çivilerin boylarının $\sim 2/3$ 'ü oranında sıyrıldığı aşamada (Gözlem L) da kayıt alınarak, gözlem yapılmıştır.

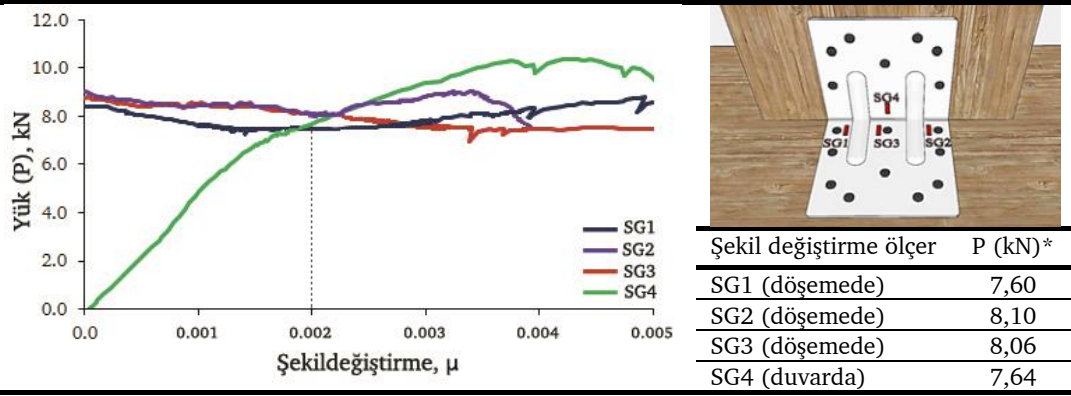
Deney sürecinde; T1, T2 ve T9 yerdeğiştirme ölçümleri negatif (-); T3, T4, T5, T6 ve T10 değerleri ise pozitif (+) olarak kaydedilmiştir. T8 ölçüm aracı, $P=9,72$ kN düzeyine kadar (+), sonrasında ise (-) değer almıştır. Bu durum duvar-döşeme birleşiminin; arka yüzündeki levhalar nedeniyle önce, geriye doğru hareket ettiğini, sonrasında düzlemine gelerek, ön yüze doğru ilerlediğini göstermektedir. $P=5,71$ kN'da, levha-1'in CLT döşemeye birleştiği üst sıra çivilerden başlayan ilk çatlak sonrası; duvar elemanı, levha-2'ye doğru eğilme hareketi göstermeye başlamıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 MTS-RN-A-03 birleşiminin deney sürecindeki hareketi

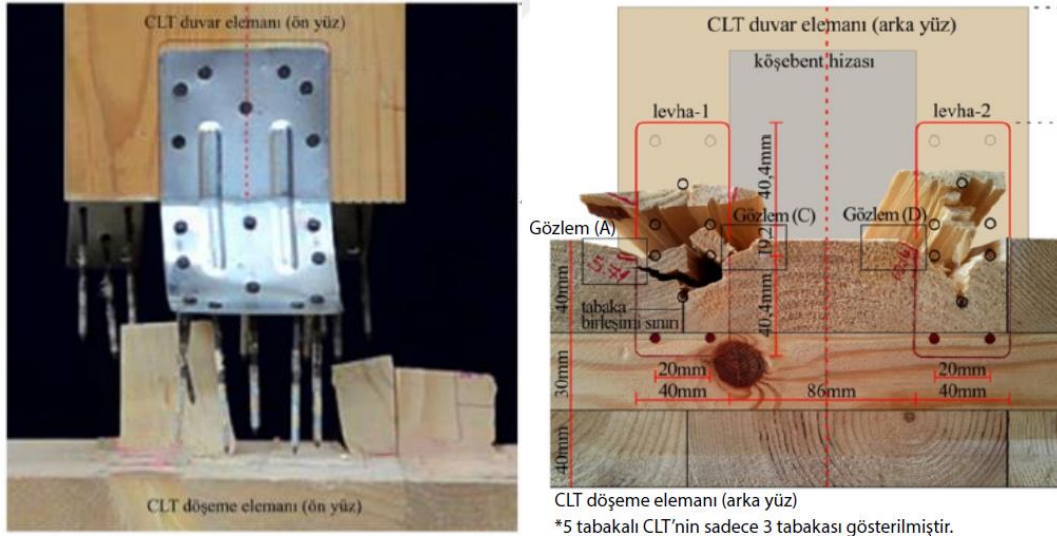
CLT duvar paneli yönünde ve köşebentin merkezinde düşey ölçüm yapan SG4'ün şekil değiştirmesi, artan yük düzeyi ile doğru orantılı olarak artmıştır. Ancak birleşimin arka yüzündeki levhaların hasarı ile SG4, diğer şekil değiştirme ölçerler ile birlikte %0,2'ye ulaşmış ve elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelmiştir (Tablo 5.15).

Tablo 5.15 MTS-RN-A-03 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri



* Şekil değiştirme ölçer (%0,2) değerleri

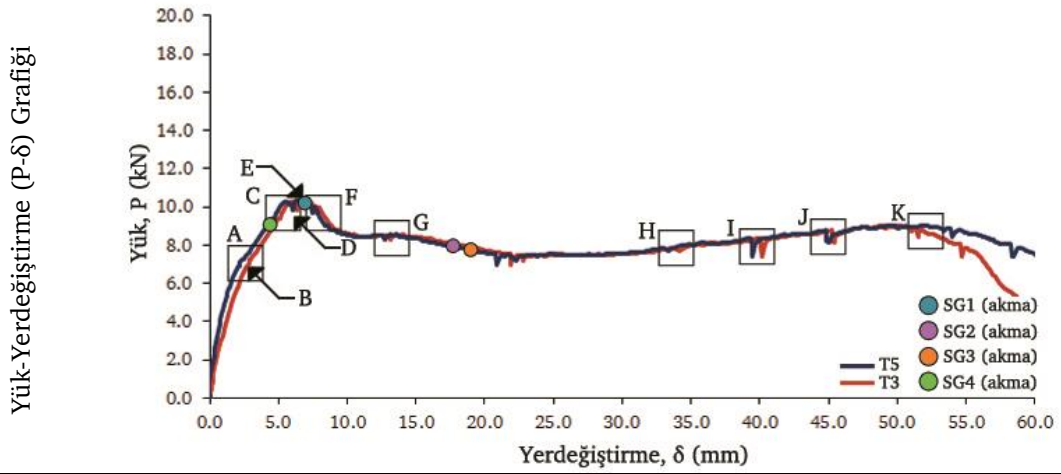
Duvar-döşeme birleşiminin arka yüzünde; döşeme panelini oluşturan tabakada lif kırılması, köşebent, levhalar ve birleşimi sağlayan çivi başlarında oluşan düzensiz şekil değişiklikleri gibi önemli hasar türleri görülmüştür (Şekil 5.12). Deney sürecinde, CLT döşemenin arkasındaki üst tabakada oluşan ilk çatlığın (Tablo 5.16, Gözlem A) giderek açılması sonrasında; duvar-döşeme birleşimi, arka yüzdeki levha-1 yönünde, serbest durumda hareket etmeye devam etmiştir. Bu durumun sonucu olarak; ön yüzde bulunan köşebent'in sol yanı erken göçmüştür.



Şekil 5.12 MTS-RN-A-03 deneyi sonucunda birleşimin görünümü [200]

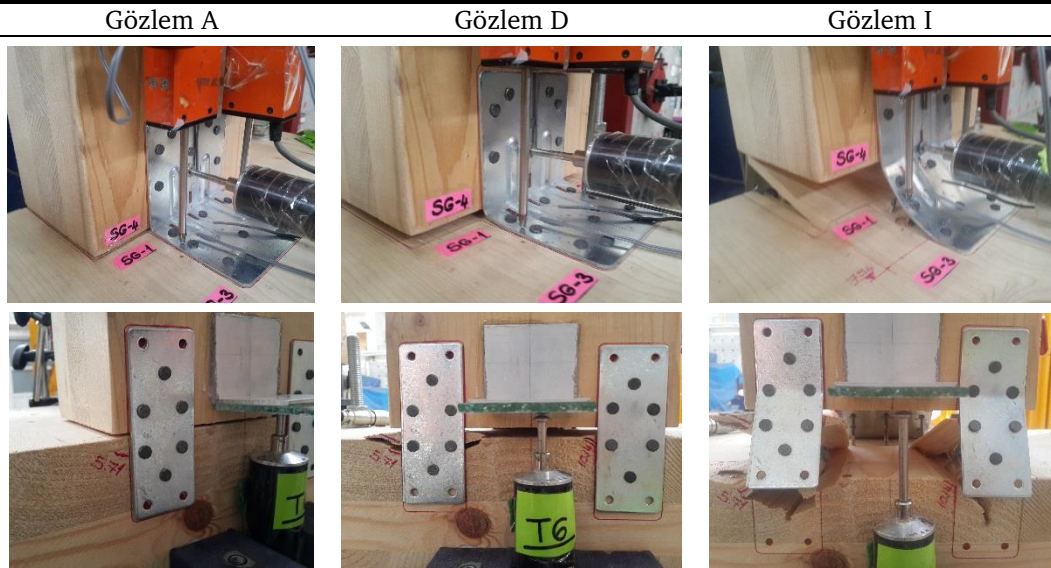
Tablo 5.16 MTS-RN-A-03 deneyi P- δ grafiği ve gözlemleri

MTS-RN-A-03 Deneyi



Gözlem P (kN)	δ (mm)*	Açıklama	
A	5,71	1,69	Levha-1 birleşimi nedeniyle oluşan lif kırılması sesinin duyulması
B	7,25	2,74	P- δ grafiğinde rijitliğin değiştiği elastik sınır düzeyi
C	9,36	4,75	Gözlem-A'daki hasarın, levhanın diğer yanında da oluşması, derinleşmesi ve döşeme elemanın yüzeyine doğru hareket etmesi
D	9,79	6,20	Levha-2 nedeniyle oluşan lif kırılması hasarı sesinin duyulması
E	10,37	6,72	En büyük yük değeri
F	9,65	7,61	Levhalarda eğilme davranışı oluşması
G	8,31	12,91	Köşebentteki ilk sıra çivilerin direnç göstermesi
H	7,83	34,06	Köşebentteki ilk sıra çivilerin başlarında düzensiz şekil değiştirmelerin oluşması
I	7,39	39,79	Levhalaradaki döşeme elemanını birleştiren çivilerin tamamen sıyrılması ve köşebentteki ikinci sıra çivilerin direnç göstermesi
J	8,19	45,08	Köşebent üzerindeki ikinci sıradaki çivilerin başlarında düzensiz şekil değiştirmelerin oluşması
K	8,09	52,75	Köşebenttin döşeme yüzeyinden ayrılması

Deney Sürecindeki Önemli Gözlemler ve Görselleri



* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

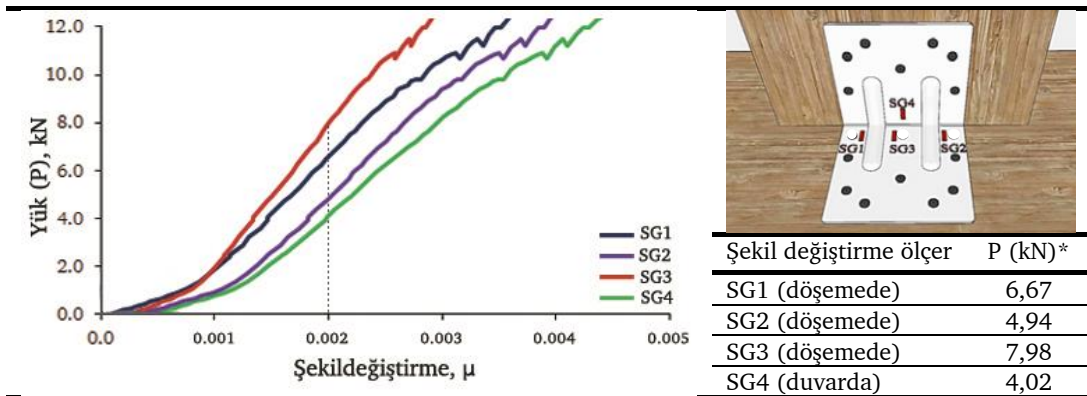
5.2.3.4 MTS-WS-A-04 Deneyi

MTS-WS-A-04 deneyinde, diğer deneylerden farklı olarak çelik köşebent birleşimleri ahşap vidaları ile yapılmıştır. Bununla birlikte birleşimin arka yüzündeki metal levhalar, halkalı çiviler (20 adet) ile birleştirilmiştir. Deneyin amacı; vidalar ile birleştirilen çelik köşebent ve halkalı çiviler uygulanan metal levhaların, çekme kuvveti altında davranışının belirlenmesidir.

CLT ile ahşap vidasının çekme direnci deneylerinde vidanın gevrek davranış gösterdiği bilinmektedir. Bu kapsamda $P-\delta$ grafiği (Tablo 5.18) incelendiğinde; halkalı çivi kullanılan diğer deney örnekleri ile karşılaştırıldığında ahşap vidası kullanılan bu deneyin eğrisinde, vida ile ahşap lifleri arasındaki ilişkinin bir sonucu olarak iniş-çıkışlar görülmektedir. Deney örneğinin arka yüzündeki levha-1 birleşiminde oluşan ilk çatlak, elastik sınır düzeyi aşıldıktan sonra levha-2 birleşiminde de gerçekleşmiştir. Buna karşın levha-1'de daha fazla şekil değiştirme olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 5.18'de $P-\delta$ grafiği ile deney sürecindeki önemli gözlemler ve görselleri görülmektedir.

CLT panel duvar-döşeme birleşimini sağlayan çelik köşebent üzerine yerleştirilen şekil değiştirme ölçerler ile elde edilen sonuçlara göre; tüm şekil değiştirmeler, artan yük düzeyi ile doğru orantılı olarak artmış; %0,2'ye ulaşmış ve elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelmiştir (Tablo 5.17).

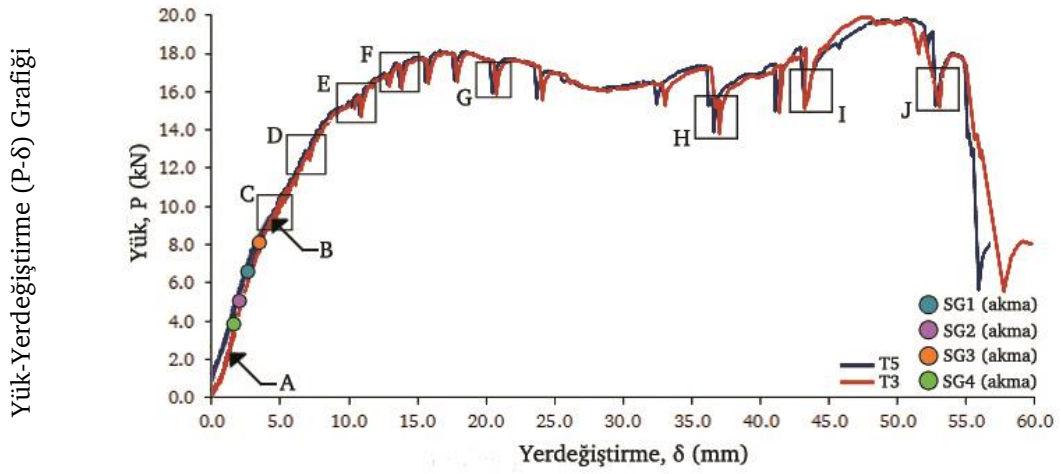
Tablo 5.17 MTS-WS-A-04 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri



* Şekil değiştirme ölçer (%0,2) değerleri

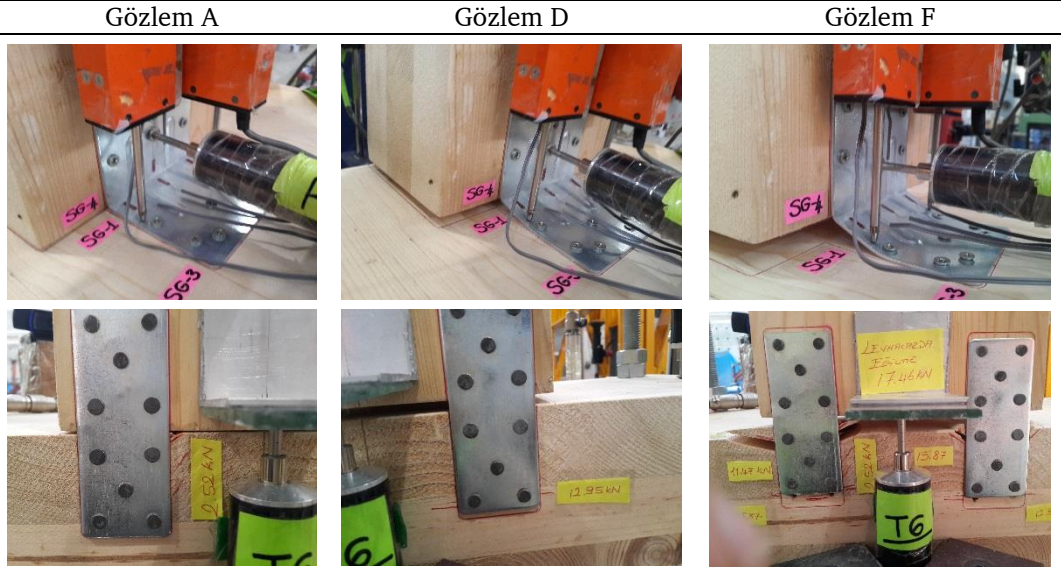
Tablo 5.18 MTS-WS-A-04 deneyi P- δ grafiği ve gözlemleri

MTS-WS-A-04 Deneyi



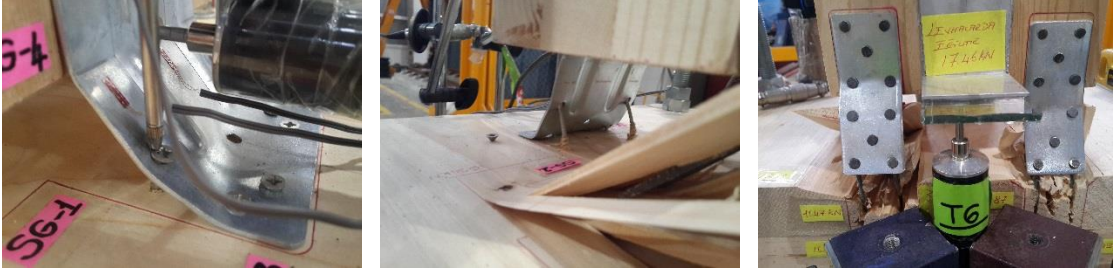
Gözlem P (kN)	δ (mm)*	Açıklama	
A	2,52	0,62	Levha-1 birleşimi nedeniyle oluşan lif kırılması sesinin duyulması
B	9,80	3,68	İlk sıradaki vidaların direnç göstermesi
C	9,81	4,80	P- δ grafiğinde rijitliğin değiştiği elastik sınır düzeyi
D	12,95	4,97	Levha-2 birleşimi nedeniyle yeni çatlak oluşumu
E	15,87	9,75	Döşeme panelindeki çatlakların giderek derinleşmesi
F	16,56	12,69	En büyük yük değeri Levhalarda eğilme hareketinin ve çivi yuvalarının görülmesi
G	17,71	19,54	Levha-1 birleşiminde çivilerin sıyrılması ve Levha-2 çivilerinin direnç göstermesi
H	15,65	35,69	Köşebent merkezindeki vidanın başının kopması
I	15,85	43,74	Levha-1 birleşiminde derinleşen lif kırılması sesinin duyulması
J	16,16	54,73	Köşebentte ilk sıra vidaların eğilerek sıyrılması

Deney Sürecindeki Önemli Gözlemler ve Görselleri



* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

Yerdeğiştirme ölçerler çıkarıldıktan sonra yükleme hızı, 1,5 kat artırılarak arka yüzde levhaları birleştiren halkalı çivilerin döşemeden sıyrılması izlenmiştir. Şekil 5.13'te deney sonucunda CLT duvar-döşeme birleşimini sağlayan çelik köşebent, metal levhalar ile halkalı çiviler ve vidaların son görünüşleri yer almaktadır.



Şekil 5.13 MTS-WS-A-04 deneyi sonucunda birleşimin görünümü

5.2.3.5 MTS-RN-2A-05 Deneyi

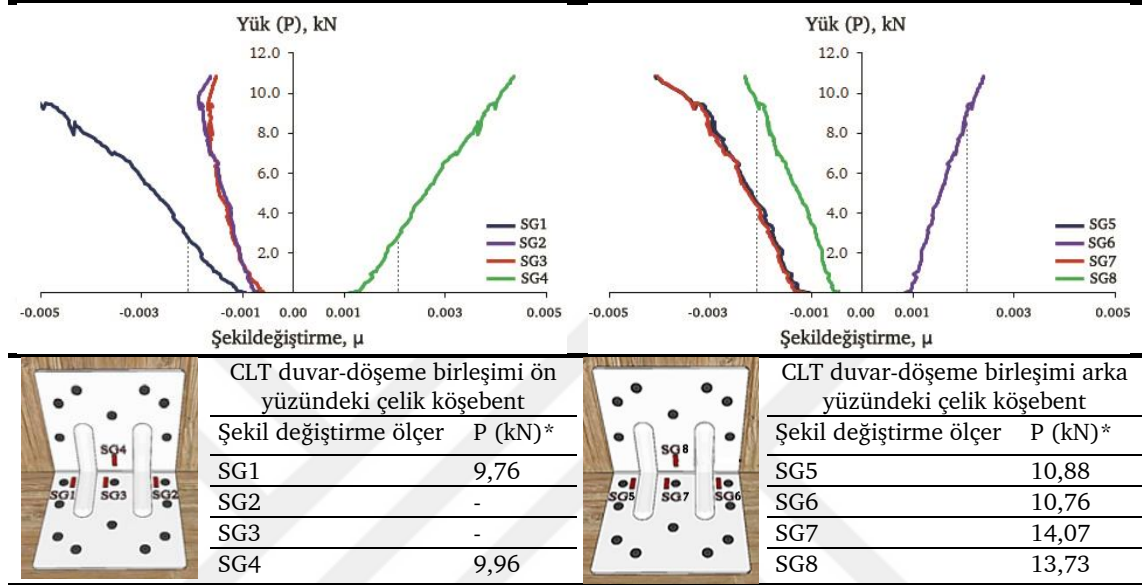
MTS-RN-2A-05 deneyinde; CLT duvar paneli, döşeme panelinin merkezine, halkalı çiviler ile iki çelik köşebent kullanılarak birleştirilmiştir. Deneyin amacı, diğer birleşim örneklerinden farklı olarak, CLT duvar panelinin iki yüzünde de var olan çelik köşebentler ile gerçekleştirilecek birleşim davranışının belirlenmesidir. CLT duvar panelinin karşılıklı köşebent yerleşiminde, çivi doğrultularının çakışmasının önlenmesi amacıyla farklı deliklere uygulama yapılmıştır. Bununla birlikte önceki deneylerde olduğu gibi, çekme kuvveti altında, köşebentin döşeme paneline tutunma yeteneğinin artırılabilmesi amacıyla köşebentin birleşim bölgesinde, aynı özellikte çiviler eklenmiştir.

$P-\delta$ grafiği incelendiğinde; T3 ile T5 düşey ölçerlerin benzer davranış gösterdiği görülmektedir. Grafikteki ilk büyük düşüş, arka yüzdeki köşebenti birleştiren ilk çivinin başının kopması ile gerçekleşmiştir (Gözlem D). Ardından duvar elemanını birleştiren iki çivinin başının da kopması ile deneye, sadece ön yüzdeki köşebenti birleştiren çiviler ile devam edilmiştir. Tablo 5.20'de $P-\delta$ grafiği ile deney sürecindeki önemli gözlemler ve görselleri görülmektedir.

CLT panel duvar-döşeme birleşimini sağlayan ön ve arka yüzlerdeki her iki çelik köşebent üzerine yerleştirilen şekil değiştirme ölçerlerden elde edilen veriler Tablo 5.19'da görülmektedir. Ön yüzde yer alan köşebentte şekil değiştirmeler (SG1,

SG2, SG3 ve SG4) artan yük düzeyi ile doğru orantılı artmasına karşın; sadece SG1 ve SG4, %0,2'ye ulaşmış ve elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelmiştir. Deney örneğinin arka yüzünde yer alan köşebentte şekil değiştirmeler (SG5, SG6, SG7 ve SG8), doğrusal bir yol izleyerek akma sınırına ulaşmıştır.

Tablo 5.19 MTS-RN-2A-05 deneyinde köşebent şekil değiştirmeleri

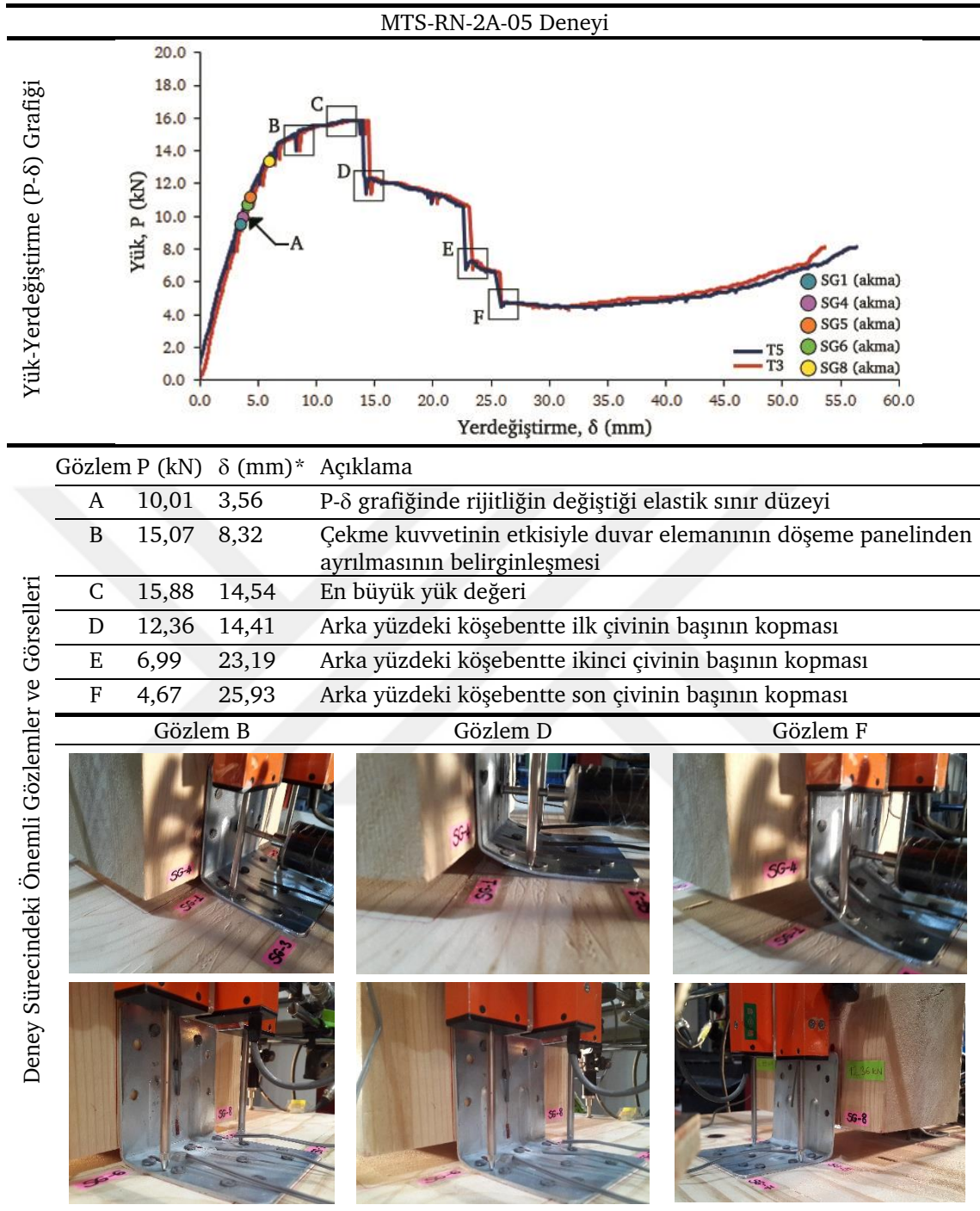


* Şekil değiştirme ölçer (%0,2) değerleri

MTS-RN-2A-05 deneyinde, yerdeğiştirme ölçerler çıkarıldıktan sonra yükleme hızı, iki kat artırılarak döşeme panelini birleştiren tüm halkalı çivilerin döşeme panelinden sıyrılması izlenmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 MTS-RN-2A-05 deneyi sonucunda birleşimlerin görünümü

Tablo 5.20 MTS-RN-2A-05 deneyi P- δ grafiği ve gözlemleri

* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

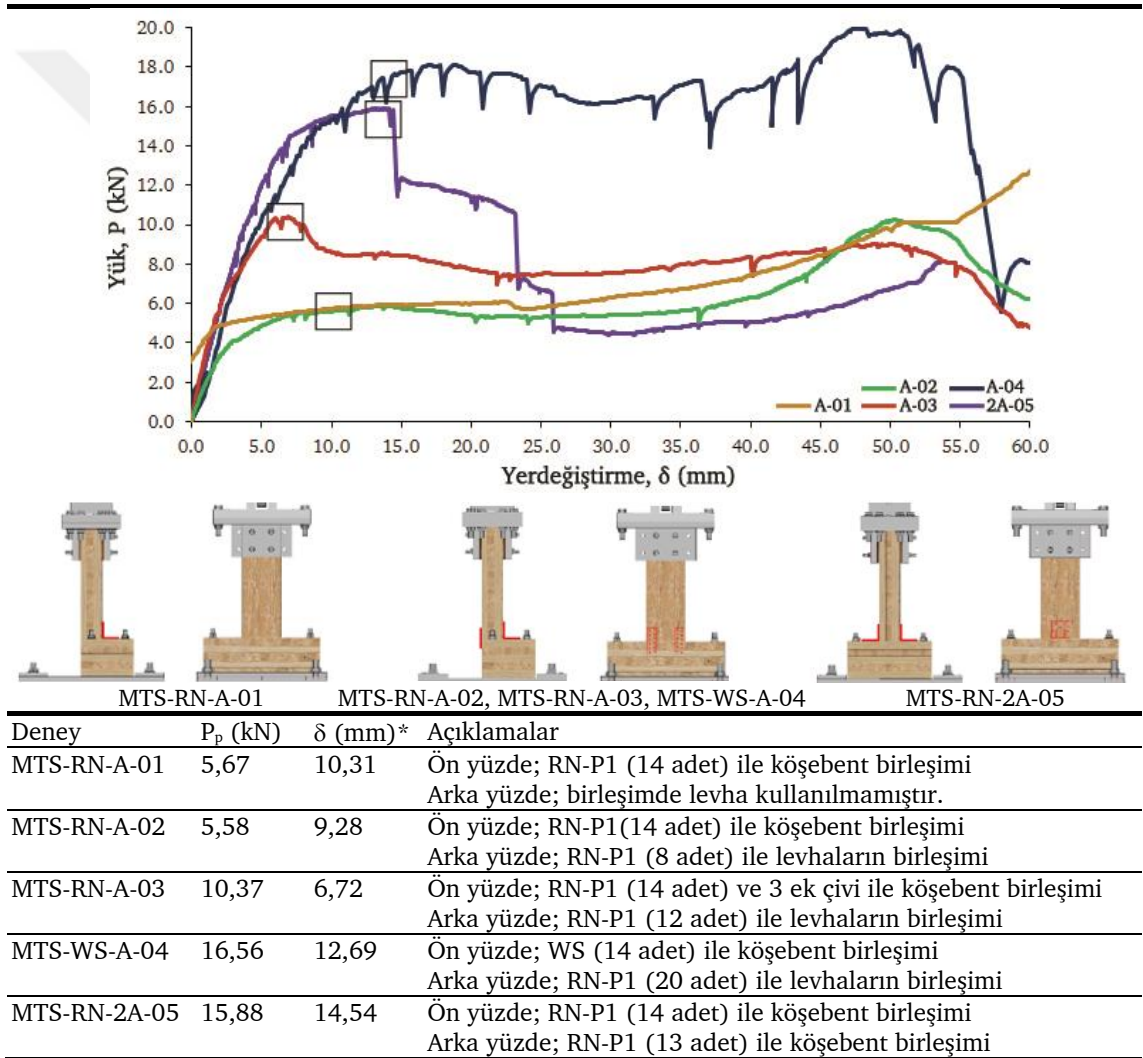
5.2.4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

CLT panel birleşimlerinin etkinliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan araştırmaların ortak amacı; yapıya etkiyen kuvvetler altında enerji yutabilen, diğer bir deyişle sünek metal birleşimlerin geliştirilmesinin sağlanmasıdır. Depreme dayanıklı ahşap yapı tasarımı ve birleşimleri kapsamında, CLT panel yapı sisteminde incelenmesi gereken öncelikli alan; özellikle Türkiye’de üretilen metal birleşimler kullanılarak, CLT panel duvar-döşeme birleşiminin, monotonik deprem yüklerinden oluşan çekme kuvveti altında etkinliğinin araştırılması konusudur. Bu kapsamda gerçek boyutlu CLT panel elemanlar kullanılarak çekme kuvveti altında; güçlendirilmiş çelik köşebent, metal levhalar, halkalı çiviler ve ahşap vidası ile birbirinden farklı CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışlarını inceleyen deney çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile (Şekil 5.16);

- Ahşap liflere tutunma yeteneği açısından etkin davranış gösteren fosfat kaplamalı halkalı çiviler (RN-P1) ile enerji sönümleyebilen CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin gerçekleştirilebileceği,
- RN-P1 ile karşılaştırıldığında çekme direnci daha yüksek olmasına karşın ahşap vidasının (WS), gevrek davranış göstermesi ve ahşap liflerinde kırılma ve ezilmeye neden olduğu,
- Güçlendirilmiş çelik köşebentin döşeme ile birleşiminde dayanımının artırılması amacıyla eklenen çivilerin, arka yüzdeki levha ve lif kırılmaları hasarları sonrasında, duvardaki eğilme davranışı ile çivilerin sıyrılmasını geciktirdiği,
- CLT döşeme panelinin tabakalarını birleştiren tutkalın dayanımının yüksek olduğu ve tutkal bölgesinde herhangi bir sorunun oluşmadığı,
- Metal birleşimlerde simetrik olarak çakılan çivi/vidaların, yükün eşit şekilde paylaşımı ilkesi ile daha yüksek dayanım gösterebileceği,
- CLT panel duvar-döşeme birleşiminin arka yüzünde RN-P1 ile birleştirilen levhaların, birleşimin çekme kuvvetine karşı dayanımını artırdığı,

- Deney örneklerinin arka yüzündeki metal levhaların birleşimleri nedeniyle gerçekleşen lif kırılması hasarlarının; öncelikle CLT döşeme panelinin seyrek lifli bölgelerinde oluştuğu ve deney süresince yağ halkasının yaklaşık şeklini izleyerek derinleşmeye devam ettiği,
- Arka yüzdeki levhalarda oluşan hasarın belirginleşmesi ile elastik sınır sonrası, köşebent üzerindeki şekil değiştirme ölçümlerinde akma sınırına ulaşıldığı,

görülmüştür. Bu araştırma, Türkiye’de CLT panel duvar-döşeme birleşimlerinin davranışını inceleyen ilk deney çalışması olma özelliğini taşımaktadır.



*T3 yerdeğiştirme ölçer değerlerine göre P_p en büyük yük düzeyidir.

Şekil 5.16 CLT panel duvar-döşeme birleşimleri deneylerinin P - δ grafikleri

CLT paneller; deprem yüklerine karşı ahşap yapının, özellikle rijitlik gereksinimini karşılamak üzere 1990'lı yıllarda geliştirilmiş olup, 2010 yılı sonrasında üretim ve kullanımları yaygınlaşmıştır. CLT paneller ile düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ile iki yönlü eğilme dayanımı olan ve rijit diyafram davranışı gösterebilen döşeme sistemi elde edilebilmektedir. Çağdaş ahşap yapıların, başlıca özelliklerini (dayanım ve dayanıklılık, hafiflik, yangına karşı dayanıklılık, sürdürülebilirlik vb.) sağlamasının yanı sıra CLT panel yapı sistemi ile insan sağlığı ve konfor gereksinimleri de karşılanabilmektedir. Ahşap taşıyıcı sistemlerin yanı sıra betonarme, çelik ve ön üretilmiş beton yapı sistemleri ile kolaylıkla bütünleştirilebilen CLT panellerin, rijit elemanlar olması nedeniyle deprem yüklerine karşı süneklik gereksinimi; enerji sönmüleyebilen metal panel birleşimleri ile sağlanmaktadır.

Türkiye'nin yüzölçümünün %92'si deprem riski altındadır. Deprem ivmesinin yapının kütlesi ile doğru orantılı olduğu düşünüldüğünde; yenilikçi, hafif ancak rijitliği olan ahşap taşıyıcı sistemlere gereksinim olduğu açıktır. Bu çalışma kapsamında, Türkiye'de üretilen metal birleşimler kullanılarak, enerji yutabilen CLT duvar-döşeme birleşimlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Birleşimlerde kullanılan güçlendirilmiş köşebent, metal levha, galvaniz ve fosfat kaplamalı halkalı çiviler, Türkiye'deki üreticilerden; diğer çiviler ile ahşap vidası ise yurtdışından elde edilmiştir.

CLT panel birleşimlerinin geliştirilmesi sürecinde, iki ana konuya odaklanılmıştır;

- İlk aşamada; 50mmx50mmx100mm'lik 200 adet CLT örneğine, el/tabanca ile çakılan, ahşap vidası, burgulu ve dört tür halkalı çivinin çekme direnci deneylerinin yapılması ve çekme direnci/çekme enerjisi en yüksek olanın seçilmesi,

- İkinci aşamada; gerçek boyutlu CLT panellerin duvar-döşeme birleşimlerinin, monotonik deprem yüklerinin moment etkisinden oluşan çekme kuvveti altında davranışının incelenerek, birleşim elemanları ve tekniğinin deney sonuçlarına göre geliştirilmesi sağlanmıştır.

İlk aşamada, CLT ile çivi/vida çekme deneylerinin önemli özellikleri ile elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Fosfat ve reçine kaplamalı halkalı çivilerin sıyrılma davranışı, çakılma biçimi ve CLT örneğin lif yapısının çekme direncine etkisi ile çekme enerjileri irdelenmiş olup; bu çalışmalar, uluslararası literatür açısından özgünlük taşımaktadır.
- Dış ortam koşullarına dayanıklılığı ve kolay çakılabilme özelliğinin yanı sıra, en yüksek çekme direnci ve çekme enerjisine, yerli üretim fosfat kaplamalı halkalı çiviler ile ulaşılmıştır. Bu nedenle ikinci aşamada, CLT duvar-döşeme birleşim deneyleri için bu çiviler seçilmiştir.
- Fosfat kaplamalı halkalı çivilerin, galvanizli olanlar ile karşılaştırıldığında; %40 daha yüksek çekme dayanımlı olduğu, ayrıca çakma işleminin tabanca ile yapılması durumunda da %25 ek dayanımın sağlandığı belirlenmiştir.
- Halkalı çiviler ile karşılaştırıldığında, birleşimlerde kullanılan ahşap vidası; çekme direncinin daha yüksek olmasına karşın, sıyrılması sırasında ahşap elemanda önemli ölçüde hasar oluşturmaktadır.

İkinci aşamada, gerçek boyutlu CLT panellerin duvar-döşeme birleşimi deneylerinde ulaşılan sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

- Eşit kollu köşebent birleşimlerinde, birleşim bölgesine yakın eklenen çivi/vida, birleşimin çekme dayanımının artmasında etkili olmuştur.
- Hazırlık deneyi ile karşılaştırıldığında, duvar-döşeme birleşiminin arka yüzünde halkalı çiviler ile birleştirilen levhaların; birleşimin çekme dayanımını üç katına kadar arttırdığı görülmüştür.
- CLT paneli oluşturan tabakaların lif yönleri ile sıkı/seyrekle nitelikte lif yapısının, birleşimde hasar oluşumu üzerinde etkili olduğu gözlenmiştir.

- Birleşim deneylerinde, seri üretimi olan 2 mm kalınlığında güçlendirilmiş çelik köşebentler kullanılmış olup; köşebent kalınlığının en az 3 mm olmasının, birleşimin dayanımını daha fazla arttırılabileceği görülmüştür. Ancak yerli üretici açısından, kalıp değişikliği maliyetinin, önemli bir talep artışı söz konusu olmadıkça karşılanamayacağı bilgisi edinilmiştir.
- Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde; Türkiye’de üretilen metal birleşimler kullanılarak, enerji yutabilen CLT panel birleşimlerinin üretilabileceği görülmüştür.

Tez çalışması; Türkiye’de, CLT panel duvar-döşeme birleşim davranışını inceleyen ilk deneysel araştırmaları içermektedir. Bu çalışma ile ülkemizde ahşap yapılarda CLT panellerin kullanımı ve CLT panel yapı sistemi hakkında, kuramsal ve deneysel bilgi eksikliğinin giderilmesine katkı sağlanarak; Türkiye’de, depreme dayanıklı ahşap çok katlı yapı tasarımı ve uygulamalarında, CLT panel kullanımının benimsenmesine öncülük edilebileceği varsayılmaktadır. Bu kapsamda, gelecekteki çalışmalara katkı sağlayabilmesi amacıyla aşağıda, öneriler yer almaktadır.

- Çağdaş ahşap taşıyıcı sistemler ile CLT panel yapı sisteminin; ulusal yapım yönetmelikleri kapsamına girebilmesi, bu konudaki eksikliklerin giderilmesi, bilimsel araştırmalardan elde edilecek sonuçlar ile yönetmeliklerin güncellenmesi ve yapım sisteminin kullanım olanaklarının genişletilmesi,
- Kapsamlı bilimsel araştırmalar ve deney çalışmaları ile elde edilen verilerin, sayısal analiz yöntemleri ile değerlendirilmesi sonucunda; CLT panel yapı sisteminin yapı yükleri altında davranışının belirlenebilmesi amacıyla yapılacak çok disiplinli bilimsel araştırma sayısının artırılması,
- Türkiye’de depreme dayanıklı ahşap çok katlı yapı uygulamalarında, CLT panel yapı sisteminin kullanımının sağlanması ve yaygınlaştırılması amacıyla; devlet, kamu ve özel kurumların iş birlikleri ile yatırımların geliştirilmesi, yatırımcılarının özendirilmesi, merkezi idare ve yerel yönetimler aracılığı ile uygulama olanaklarının sağlanması,

- Ülkemiz koşullarında, yerli ağaç türleri ile CLT panel üretimi yapacak fabrikanın ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşın uzun dönemde üretimin sağlayacağı katkılarının değerlendirilmesi ve bu konuda bilinç oluşturulması ile ekonomiye artı değer sağlanacağı vurgulanması,
- Yapısal ahşap ve CLT panel üretiminde, hammaddenin sağlanması sürecinde sürdürülebilir orman yönetimi ile ormansızlaşma yanlış algısının önüne geçilerek; Türkiye’de orman varlığının iyileşmesi ve geliştirilmesinin sağlanmasının yanı sıra ekonomiye de olumlu katkı sağlanacağı ortaya konulması,
- Mimarlar ve mühendislerin yanı sıra üniversiteler, araştırma enstitüleri, kamu kurum ve kuruluşları, özel girişimciler, ahşap üreticileri, uygulayıcılar ve sivil toplum örgütleri (UAB, TORID vb.) gibi ilgili tüm disiplinlerin bir arada olacağı, uzun dönemli çalışma ve araştırma grupları kurularak; etkin bilgi paylaşımı ortamının yaratılması, bu kapsamda eğitici ve öğretici araştırma programlarının planlanması ve uygulanması,
- Mimari tasarım ile ahşap taşıyıcı sistem bütünleşik tasarım ve uygulama ilkelerinin benimsenerek, üniversiteler ve diğer disiplinlerin iş birliği ile lisans ve lisansüstü eğitim süreçlerinde kuramsal ve deneysel bilginin birlikte verilmesinin sağlanması,
- Mimari fikir ve tasarım yarışması projelerinde, çağdaş ahşap taşıyıcı sistemler ile CLT panel yapı sistemi kullanımının özendirilmesi ve bu kapsamda yarışma yönetmeliklerinin düzenlenmesi,

ile ahşap çok katlı ve yüksek yapıların uygulanması sürecinde, CLT panel kullanımının benimsenmesi sağlanabilecektir.

- [1] FPIInnovations, Cross-Laminated Timber, CLT Handbook, (ed.) S. Gagnon, C. Pirvu, Canada, SP-528 E, QC, 2011.
- [2] FPIInnovations and Binational Softwood Lumber Council, Cross-Laminated Timber, CLT Handbook, (ed.) E. Karacabeyli, B. Douglas, USA, SP-529 E, QC, 2013.
- [3] ANSI/APA PRG 320, Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber, APA-The Engineered Wood Association, Tacoma, WA, 2018.
- [4] AFAD, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2018. <https://www.afad.gov.tr/tr/24210/Turkiye-Bina-Deprem-Yonetmeligi>
- [5] BS EN 1998-1 (Eurocode 8), Design of Structures for Earthquake Resistance, General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, Brussels, Belgium, 2004.
- [6] I.P. Christovasilis, M. Brunetti, M. Follesa, M. Nocetti, D. Vassallo, “Evaluation of The Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories”, Construction and Building Materials, 122(202-213), 2016.
- [7] V. Çavuş, “Mühendislik Ürünü Ağaç Malzemelerde Yükselen Trend; Çapraz Tabakalanmış Kereste”, Bartın Orman Fakültesi Dergisi, 21(2), 560-569, 2019.
- [8] BS EN 14081-1, Timber Structures, Strength Graded Structural Timber with Rectangular Cross Section, General Requirements, 2005.
- [9] DIN 4074-1, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit-Teil 1: Nadelschnittholz. Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM), Berlin, Germany, 2012.
- [10] BS EN 338, Structural Timber, Strength Classes, BSI Standards, Brussels, Belgium, 2016.
- [11] ETA-06/0138, KLH Solid Wood Slabs, Solid Wood Slab Element to be Used As Structural Elements in Buildings, 2011.
- [12] KLH Massivholz, Made For Building Built For Living, 2012. http://www.klh.at/en/download/public/Kreuzlagenholz/KLH_Construction_en.pdf
- [13] I. Gavric, Seismic Behavior of Cross-Laminated Timber Buildings, Ph.D. Thesis, University of Trieste, Italy, 2013.
- [14] G. Callegari, C. Cremonini, V.M. Rocco, A. Spinelli, R. Zanuttini, “The Production of Hardwood X-Lam Panels to Valorise the Forest-Wood Chain in Piemonte (Italy)”, 11th WCTE, 20-24 June, Italy, 1617-1622, 2010.

- [15] BS EN 387, Glued Laminated Timber, Large Finger Joints, Performance Requirements and Minimum Production Requirements, 2001.
- [16] S.J. Chang, S. Wi, S. Kim, “Thermal Bridging Analysis of Connections in Cross-Laminated Timber Buildings Based on ISO 10211”, *Construction and Building Materials*, 213(709-722), 2019.
- [17] BS EN 301, Adhesives, Phenolic and Aminoplastic, for Loading Bearing Timber Structures, Classification and Performance Requirements, 2006.
- [18] S. Lehmann, “Low Carbon Construction Systems Using Prefabricated Engineered Solid Wood Panels for Urban Infill to Significantly Reduce Greenhouse Gas Emissions”, *Sustainable Cities and Society*, 6(57-67), 2013.
- [19] BS EN 15425, Adhesives, One Component Polyurethane (PUR) for Load-Bearing Timber Structures, Classification and Performance Requirements, 2008.
- [20] BS EN 16351, Timber Structures, Cross Laminated Timber, Requirements, European Union, Brussels, Belgium, 2015.
- [21] DIN 68141, Wood Adhesives, Determination of The Open Drying Time and Evaluation of Wetting and Brushability, 2016.
- [22] DIN 1052, Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau, 2008.
- [23] ANSI 405, Standard for Adhesive for Use in Structural Glued Laminated Timber, New York, USA, American National Standards Institute, 2018.
- [24] CSA O112.10, Evaluation of Adhesives for Structural Wood Products (Limited Moisture Exposure), Mississauga (Ont.), Canadian Standards Association, 2008.
- [25] D. Buck, X.A. Wang, O. Hagman, A. Gustafsson, “Comparison of Different Assembling Techniques Regarding Cost, Durability, and Ecology-A Survey of Multi-Layer Wooden Panel Assembly Load-Bearing Construction Elements”, *BioResources*, 10(4), 8378-8396, 2015.
- [26] P. Wilson, “Cross Laminated Timber”, (ed.) D. Jones, C. Brischke, *Performance of Bio-Based Building Materials*, Woodhead Publishing, 40-52, 2017.
- [27] BS EN 13986:2004+A1, Wood-Based Panels for Use in Construction, Characteristics, Evaluation of Conformity and Marking, 2015.
- [28] R. Malczyk, “Cross-Laminated Timber in British Columbia”, CLT Symposium, February 8-9. Vancouver, 2011.
- [29] R. Brandner, G. Flatscher, A. Ringhofer, G. Schickhofer, A. Thiel, “Cross Laminated Timber (CLT): Overview and Development”, *Eur. J. Wood Wood Prod.*, 74(331-351), 2016.

- [30] W. Simpson, A. TenWolde, Physical Properties and Moisture Relations of Wood, The Encyclopedia of Wood, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2007.
- [31] A. Lyons, Materials for Architects and Builders. Oxford: Butterworth-Heinemann., 105-136, 2010.
- [32] D.G. Yılmaz, Ahşap Kompozit Elemanlarla Oluşturulmuş Geniş Açıklıklı Sistemlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012.
- [33] ASTM D2395, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials, 2017.
- [34] Waugh Thistleton Architects, Projects, Erişim tarihi: 10 Aralık 2020. <https://waughthistleton.com/>
- [35] BS EN 1995-1-1 (Eurocode 5), Design of Timber Structures, Part 1-1: General-Common Rules and Rules for Buildings, European Union, Brussels, Belgium, 2004.
- [36] CSA O86, Engineering Design in Wood, Canadian Standards Association, CSA Standards, Mississauga, ON, Canada, 2014.
- [37] ASTM D5456, Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products, 2019.
- [38] BS EN 825 (TS 825), Thermal Insulating Products for Building Applications, Determination of Flatness, (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları), 2008.
- [39] ASTM E96/E96M, Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials, 2005.
- [40] BS EN ISO 10456, Building Materials and Products, Hygrothermal Properties-Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values, Switzerland, 2007.
- [41] ISO 15148, Hygrothermal Performance of Building Materials and Products, Determination of Water Absorption Coefficient by Partial Immersion, International Organization for Standardization, 2002.
- [42] M. Wieruszewski, B. Mazela, "Cross Laminated Timber (CLT) as An Alternative Form of Construction Wood", Drvna Industrija, 68(4), 359-367, 2017.
- [43] V. Hekimoğlu, Gökmar ve Sarıçam Odunlarından Nanokil İlaveli Çapraz Lamine Kereste Üretim Olanaklarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2014.
- [44] BS EN 13353, Solid Wood Panels (SWP), Requirements, 2011.
- [45] BS EN 789, Timber Structures, Test Methods, Determination of Mechanical Properties of Wood-Based Panels, 1996.

- [46] Q.Y. Zhou, Y.H. Chui, M. Gong, M. Mohammed, “Measurement of Rolling Shear Modulus and Strength of Cross-Laminated Timber Using Bending and Two Plate Shear Tests”, *Wood and Fiber Science*, 46(2), 259-269, 2014.
- [47] ASTM D198, *Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes*, 2015.
- [48] ASTM D4761, *Standard Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-Based Structural Materials*, 2017.
- [49] BS EN 384, *Structural Timber, Determination of Characteristic Values of Mechanical Properties and Density*, 2018.
- [50] R.A. Jöbstl, G. Schickhofer, “Comparative Examination of Creep of GLT and CLT Slabs in Bending”, In *Working Commission W18-Timber Structures*, 40(1-15), 2007.
- [51] C. Pirvu, E. Karacabeyli “Time-Dependent Behaviour of CLT”, *WCTE*, August 10-14, QC, Canada, 2014.
- [52] C. Demirci, C. Málaga-Chuquitaype, L. Macorini, “Seismic Shear and Acceleration Demands in Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings”, *Eng. Struct.*, 198, 109467, 2019.
- [53] C. O’Ceallaigh, A.M. Harte, “The Elastic and Ductile Behaviour of CLT Wall-Floor Connections and The Influence of Fastener Length”, *Engineering Structures*, 189(319-331), 2019.
- [54] I. Gavric, M. Fragiaco, A. Ceccotti, “Cyclic Behavior of Typical Screwed Connections for Cross-Laminated (CLT) Structures”, *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(2), 179-191, 2015.
- [55] M. Izzi, D. Casagrande, S. Bezzi, D. Pasca, M. Follesa, R. Tomasi, “Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Structures: A State-of-The-Art Review”, *Engineering Structures*, 170(42-52,) 2018.
- [56] S. Pei, J.V. Van De Lindt, M. Popovski, J.V. Berman, J.D. Dolan, J. Ricles, R. Sause, H. Blomgren, D.R. Rammer, “Cross-Laminated Timber for Seismic Regions: Progress and Challenges for Research and Implementation”, *Journal of Structural Engineering*, 142(4), E2514001, 2016.
- [57] A. Frangi, M. Fontana, “Charring Rates and Temperature Profiles of Wood Sections”, *Fire and Materials*, 27(91-102), 2003.
- [58] A. Frangi, M. Fontana, E. Hugi, R. Jöbstl, “Experimental Analysis of Cross-Laminated Timber Panels in Fire”, *Fire Safety Journal*, 44(August), 1078-1087, 2009.
- [59] R.H. White, F.E. Woeste, “Post-Fire Analysis of Solid-Sawn Heavy Timber Beams”, *Structure Magazine*, November 2013 (38-40).
- [60] E.L. Schaffer, *Charring Rate of Selected Woods Transverse to Grain*, US Department of Agriculture Forest Service, Research Paper FPL 69, Forest Products Laboratory, Madison Wisconsin, 1967.

- [61] BS EN 1995-1-2 (Eurocode 5), Design of Timber Structures, Part 1-2: General-Structural Fire Design, European Union: Brussels, Belgium, 2004.
- [62] A. Frangi, M. Fontana, M. Knobloch, G. Boichichio, “Fire Behaviour of Cross-Laminated Solid Timber Panels”, *Fire Safety Science*, 9(1279-1290), 2008.
- [63] B.A.L. Östman, J. Schmid, M. Klippel, A. Just, N. Werther, D. Brandon, “Fire Design of CLT in Europe”, *Wood and Fiber Science*, 50(68-82), 2018.
- [64] J. Su, P.S. Lafrance, M.S. Hoehler, M.F. Bundy, “Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings-Phase 2: Task 2 and 3-Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests”, National Fire Protection Association. NFPA report: FPRF-2018-01, 2018.
- [65] H. Öztürk, A.U. Birinci, C. Demirkır, “Yapısal Ahşap Ürünlerinin Isı Yalıtım Özellikleri”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 6(3), 522-527, 2017.
- [66] H.M. Gu, A. Zink-Sharp, “Geometric Model for Softwood Transverse Thermal Conductivity, Part I”, *Wood and Fiber Science*, 37(4), 699-711, 2005.
- [67] BS EN 12524, Building Materials and Products, Hygrothermal Properties, Tabulated Design Values, 2000.
- [68] A. Di Bella, M. Mitrovic, “Acoustic Characteristics of Cross-Laminated Timber Systems”, *Sustainability*, 12(14), 5612, 2020.
- [69] KLH Massivholz, Building a Passive House, Component Catalogue, 2019. <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/09/klh-component-catalogue-for-building-a-passive-house.pdf>
- [70] ISO 6946, Building components and building elements, Thermal resistance and thermal transmittance, Calculation method, International Organization for Standardization, 2007.
- [71] E. Burnett, J. Staube, Building Science for Building Enclosures, Building Science Corporation, Somerville, MA, 2005.
- [72] ISO 10848, Acoustics-Laboratory and Field Measurement of Flanking Transmission for Airborne, Impact and Building Service Equipment Sound between Adjoining Rooms, International Organization for Standardization, 2017.
- [73] ISO 12354, Building Acoustics-Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements, International Organization for Standardization, 2017.
- [74] ISO 10140, Acoustics-Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements, International Organization for Standardization, 2016.
- [75] ISO 717, Acoustics-Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements, International Organization for Standardization, 2013.
- [76] R. Öqvist, F. Ljunggren, A. Ågren, “Variations in Sound Insulation in Cross Laminated Timber Housing Construction”, *Forum Acusticum*, 27 June-1 July, Aalborg, Denmark, 2011.

- [77] F. Morandi, S. De Cesaris, M. Garai, L. Barbaresi, "Measurement of Flanking Transmission for The Characterisation and Classification of Cross Laminated Timber Junctions", *Applied Acoustics*, 141(213-222), 2018.
- [78] L. Barbaresi, F. Morandi, M. Garai, A. Speranza, "Experimental Measurements of Flanking Transmission in CLT Structures", *Meetings on Acoustics 22ICA*, 28, Acoustical Society of America, 015015, 2016.
- [79] C.C. Mastino, A. Di Bella, G. Semprini, A. Frattolillo, M. Marini, V. Da Pos, "BIM Application in Design and Evaluation Acoustic Performances of Buildings", *25th International Congress on Sound and Vibration*, 8-12 July, 7 (4241-4248), Hiroshima, Japan, 2018.
- [80] İ. Hacı, Z.S. Perker, "Ahşap Malzeme ve Geçmişten Günümüze Yapıda Kullanımı", *Yapı Dünyası*, 219-220-221(23-33), 2014.
- [81] BS EN 13017-1, *Solid Wood Panels-Classification by Surface Appearance*, Solid Wood Panels, Classification by Surface Appearance, Softwood, 2001.
- [82] Z. Tolszczuk-Leclerc, S. Bernier-Lavigne, A. Salenikovich, A. Potvin, "Design Process of A Free-Form Structure Using CLT Panels-Analysis of An Architectural Large Scale Structure", *WCTE*, 22-25 August, Vienna, 2016.
- [83] Lend Lease, "Forté-Building Australias First Timber Highrise", *Wood Solutions Presentation*, Atlanta Conference, 6 February, 2013.
- [84] Oregon Best, "Advanced Wood Product Manufacturing Study for Cross-Laminated Timber Acceleration in Oregon and SW Washington", 2017. https://www.oregon4biz.com/assets/docs/CLT_Mfg_2017OregonBEST.pdf
- [85] H. Kaufmann, *Wood Works: Ökorationale Baukunst-Architecture Durable*, Germany, Springer, 2011.
- [86] M.F.L. Mallo, O.A. Espinoza, "Outlook for Cross-Laminated Timber in The United States." *BioResources*, 9(4), 7427-7443, 2014.
- [87] M.H. Ramage, H. Burr ridge, M. Busse-Wicher, G. Fereday, T. Reynolds, D.U. Shah, W. Guanglu, L. Yu, P. Fleming, D. Densley-Tingley, J. Allwood, P. Dupree, P.F. Linden, O. Scherman, "The Wood from The Trees: The Use of Timber in Construction", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(333-359), 2017.
- [88] H. Şentürk, 21. Yüzyılda Üretilen Çok Katlı Ahşap Yapıların Yapım Sürecinin Değerlendirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
- [89] M. Stepinac, I. Sustersic, I. Gavric, V. Rajcic, "Seismic Design of Timber Buildings: Highlighted Challenges and Future Trends", *Applied Sciences*, 10(4), 1380, 2020.
- [90] R. Malmshaimer, P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, C. Galik, E. Gee, "Forest Management Solutions for Mitigating Climate Change in The United States," *Journal of Forestry*, 106(3), 115-171, 2008.

- [91] B. Lippke, E. Oneil, R. Harrison, K. Skog, L. Gustavsson, R. Sathre, "Life Cycle Impacts of Forest Management and Wood Utilization on Carbon Mitigation: Knowns and Unknowns", *Carbon Management*, 2(3), 303-333, 2011.
- [92] G. Hammond, C. Jones, *Embodied Carbon, The inventory of Carbon and Energy (ICE)*, University of Bath, UK, 2011.
- [93] FWPRDC, *Forest, Wood and Australia's Carbon Balance*, Australian Government Forest and Wood Products Research and Development Corporation, 1968.
- [94] D. Wilson, *Structural Properties of ICLT Wall Panels Composed of Beetle Killed Wood*, M.S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University, Provo, UT, 2012.
- [95] S. Lehmann, "Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems", *Sustainability*, 4(10), 2707-2742, 2012.
- [96] G. Callegari, C. Cremonini, V.M. Rocco, A. Spinelli, R. Zanuttini, "The Production of Hardwood X-Lam Panels to Valorize the Forest-Wood Chain in Piemonte (Italy)" WCTE, *Conference on Earthquake Engineering and Seismicity*, Geneva, Switzerland, 2010.
- [97] Z.E. Özán, *Isıl İşlem Görmüş Ahşap Malzemenin Çapraz Lamine Kereste Üretiminde Kullanım Olanaklarının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2017.
- [98] Karadeniz Teknik Üniversitesi, *Karadeniz Bölgesi Yerli Ağaç Türlerinden Çapraz Lamine Kereste (CLT) Üretimi ve Optimizasyonu*, Trabzon Teknokent, 2017. <https://www.trabzonteknokent.com.tr/projeler/karadeniz-bolgesi-yerli-agac-turlerinden-capraz-lamine-kereste-clt-uretimi-ve-optimizasyonu/>
- [99] A.U. Birinci, *Karadeniz Bölgesi Yerli Ağaç Türlerinden Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Üretimi ve Optimum Üretim Parametrelerinin Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2019.
- [100] Asmaz Ahşap, 2021. <https://www.asmazahsap.com/uygulamalarimiz/>
- [101] UNECE/FAO, "Forest Products Annual Market Review 2018-2019", United Nations Publication, ECE/TIM/SP/48, 2019.
- [102] P. Crespell, S. Gagnon, *Cross Laminated Timber: A Primer*, Fpinnovations: Vancouver, QC, Canada, 2010.
- [103] M. Mohammad, S. Gagnon, B. Douglas, L. Podesto, "Introduction to Cross Laminated Timber", *J. Contemporary Wood Eng.*, 22(3-12), 2012.
- [104] L. Muszynski, E. Hansen, S. Fernando, G. Schwarzmann, J. Rainer, "Insights into Global Cross-Laminated Timber Industry", *BioProducts Business*, 2(8), 77-92, 2017.

- [105] O. Espinoza, U. Buehlmann, M. Laguarda, V.R. Trujillo, “Identification of Research Areas to Advance the Adoption of Cross-Laminated Timber in North America”, *BioProducts Business*, 1(5), 60-72, 2016.
- [106] The Leading Built Environment Institution, *Cross Laminated Timber (CLT)*, 2017, Erişim tarihi: 10 Ocak 2021. <http://www.trentglobal.edu.sg/wp-content/uploads/2017/01/Cross-Laminated-timber2016.pdf>
- [107] H. Fountain, *Wood that Reaches New Heights*, *The New York Times*, 2012. <http://www.traeblog.dk/wp-content/uploads/2012/07/The-New-York-Times-05june2012.pdf>
- [108] E. Serrano, *Documentation of the Limnologen Project, Overview and Summaries of Sub Project Results*, Report no. 56, School of Technology and Design, Växjö University, Sweden, 2009.
- [109] Studiengemeinschaft Holzleimbau, *Building with Cross Laminated Timber, Load-Bearing Solid Wood Components for Walls, Ceilings and Roofs*, Wuppertal, 2010. https://www.it.brettsperrholz.org/publish/binarydata/Brettsperrholz/downloads/stghb_brettsperrholz_e_150dpi_101207.pdf
- [110] F. Stazi, M. Serpilli, G. Maracchini, A. Pavone, “An Experimental and Numerical Study on CLT Panels Used as Infill Shear Walls for RC Buildings Retrofit”, *Construction and Building Materials*, 211(605-616), 2019.
- [111] I. Sustersic, B. Dujic, B., “Seismic Strengthening of Existing Buildings with Cross Laminated Timber Panels”, *WCTE*, 15–19 July, Auckland, New Zealand, 49(3), 122–129, 2012.
- [112] J. Jancar, B. Dujic, “Seismic Analysis of Existing Buildings with Different Construction Upgrades”, *11th WCTE*, 20-24 June, Trentino, Italy, 2010.
- [113] KLH Massivholz, *Rib Elements, Made For Building Built For Living*, 2012. http://www.klh.at/en/download/public/Kreuzlagenholz/KLH_Rib_Elements_en.pdf
- [114] ÖNORM EN 14080, *Timber Structures-Glued Laminated Timber and Glued Solid Timber-Requirements*, Austrian Standard, 2013.
- [115] Stora Enso, *CLT Stairs, Product Brochure*, Erişim tarihi: 2 Ocak 2021. <https://www.storaenso.com>
- [116] XLam, *Cross Laminated Timber Panels, Interior Balustrades, Stairs and Rails*, Erişim tarihi: 2 Ocak 2021, <https://www.eboss.co.nz/library/x-lam-cross-laminated-timber/xlam-airstair>
- [117] S. Jaksch, A. Fadai, W. Winter, “Folded CLT Structures-Developments in Design and Assembly Strategies”, *World* 15,19, 2012.
- [118] B. Van Aken, *Hollow Core Cross-Laminated Timber Optimized for a More Efficient Use of Material*, MSc thesis, Delft University, Delft, 2017.
- [119] W.G. Montgomery, *Hollow Massive Timber Panels: A High-Performance, Long-Span Alternative to Cross Laminated Timber*, MSc thesis, Clemson University, South Carolina, 2014.

- [120] G. Zorer Gedik, "İklim ve Tasarım Etkenleri", Yayınlanmamış Lisansüstü Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Yapı Anabilim Dalı, 2014.
- [121] A. Dikici, M. Kocagül, "Isı Yalıtımında Kullanılan Eps, Xps ve Taş Yünü İzolasyon Malzemelerinin Deneysel Olarak Karşılaştırılması", Fırat Üniversitesi Müh. Bil. Dergisi, 31(1), 129-136, 2019.
- [122] ANSI/ASHRAE Standard 169, Climatic Data for Building Design Standards, 2006.
- [123] G. Zrim, Applicability Test of New Nanotechnology Thermal Insulation Spaceloft into Building Constructions, Graduation Thesis, University of Ljubljana, Civil and Geodetic Engineering, Slovenia, 2009.
- [124] S. Ülker, Isı Yalıtım Malzemelerinin Özelliklerinin Uygulamaya Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [125] N. Özer, S. Acun Özgünler, "Yapılarda Yaygın Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Performans Özelliklerinin Duvar Kesitleri Üzerinde Değerlendirilmesi", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(2), 2019.
- [126] H.B. Skogstad, L. Gullbrekken, K. Nore, "Air Leakages Through Cross Laminated Timber (CLT) Constructions", 9th Nordic Symposium on Building Physics, 29 May-2 June, Tampere University of Technology, Finland, 2011.
- [127] ISO 10211, Thermal Bridges in Buildings, Thermal Flows and Surface Temperatures, Detailed Calculation, 2001.
- [128] R. McClung, H. Ge, J. Straube, J. Wang, "Hygrothermal Performance of Cross-Laminated Timber Wall Assemblies with Built-in Moisture: Field Measurements and Simulations", Building and Environment, 71(95-110), 2014.
- [129] M. Mohammad, S. Gagnon, B. Douglas, L. Podesto, "Introduction to Cross Laminated Timber", J. Contemporary Wood Eng., 22(3-12), 2012.
- [130] R. Stirling, P.I. Morris, "Development of Protective Treatments for Cross-Laminated Timber", AWPA 113th Annual, April 9-11, Las Vegas, Nevada, 2017.
- [131] M. Gülcemal, Sarıçam ve Gökmar Odunlarından Elde Edilen Lamine ve Çapraz Lamine Kirişlerin Mukavemetinin Karşılaştırılması ve İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2019.
- [132] N.Y. Su, R.H. Scheffrahn, "Termites as Pests of Buildings", T. Abe et al. (eds.), Termites: Evolution, Sociality, Symbioses, Ecology, 437-453, 2000.
- [133] BS EN 15912, Durability of Reaction to Fire Performances, Classes of Fire Retardant Treated Wood-Based Product in Interior and Exterior End Use Applications, 2009.

- [134] C. McGregor, Contribution of Cross Laminated Timber Panels to Room Fires, MSc Thesis, Carleton University, Ottawa, 2013.
- [135] B. Taber, G.D. Lougheed, J.Z. Su, N. Bénichou, "Solutions for Mid-Rise Wood Construction: Apartment Fire Test with Encapsulated Cross Laminated Timber Construction, Client Report, A1-100035-01.10.", NRCC, Ottawa, 2014.
- [136] A. Frangi, G. Bochicchio, A. Ceccotti, M.P. Lauriola, "Natural Full-Scale Fire Test on a 3 Storey XLam Timber Building", 10th WCTE, 2-5 June, Miyazaki, Japan, 2008.
- [137] SHERPA Connection Systems, Wood and CLT Connector, Erişim tarihi: 8 Eylül 2020. <https://www.sherpa-connector.com/?LNG=en>
- [138] A.C. Costa, P.X. Candeias, Seismic performance of multi-story timber buildings-TUGraz building, Final Report of Timber Buildings Project, 2013. http://www.series.upatras.gr/TIMBER_BUILDINGS
- [139] M. Popovski, J. Schneider, M. Schweinsteiger, "Lateral Load Resistance of Cross-Laminated Wood Panels", 11th WCTE, 20-24 June, Trentino, 3394-3403, 2010.
- [140] M. Popovski, E. Karacabeyli, "Seismic Performance of Riveted Connections in Heavy Timber Construction", 13th WCTE, August 1-6, Vancouver, Canada, 3356, 2004.
- [141] M. Popovski, E. Karacabeyli, "Seismic Behaviour of Timber Rivets in Wood Construction", 8th WCTE, 2004.
- [142] H.J. Blaß, T. Uibel, Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 8, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Ed.), Universität Karlsruhe (TH), 2007.
- [143] R. Scotta, L. Marchi, D. Trutalli, L. Pozza, "A Dissipative Connector for CLT Buildings: Concept, Design and Testing", *Materials*, 9(3), 139, 2016.
- [144] M. Augustin, Wood Based Panels, (Leonardo da Vinci Pilot Project CZ/06/B/F/PP/168007) Handbook 1, Timber Structures, Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures, 2008.
- [145] Z. Chen, M. Popovski, A. Iqbal, "Structural Performance of Post-Tensioned CLT Shear Walls with Energy Dissipators", *Journal of Structural Engineering*, 146(4), 04020035, 2020.
- [146] D. Ugalde, J.L. Almazán, H. Santa María, P. Guindos, "Seismic Protection Technologies for Timber Structures: A Review", *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(2), 173-194, 2019.
- [147] A. Jorissen, M. Fragiacom, "General Notes on Ductility in Timber Structures", *Engineering Structures*, 33(11), 2987-2997, 2011.
- [148] A. Ringhofer, R. Brandner, G. Schickhofer, "Withdrawal Resistance of Self Tapping Screws in Unidirectional and Orthogonal Layered Timber Products", *Mater. Struct.*, 48(5), 1435-1447, 2013.

- [149] C. Silva, A. Ringhofer, J.M. Branco, P.B. Lourenco, G. Schickhofer, “Influence of Moisture Content and Gaps on the Withdrawal Resistance of Self Tapping Screws in CLT”, 9th Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Aveiro, Portugal, 2014.
- [150] R. Brandner, A. Ringhofer, M. Grabner, “Probabilistic Models for the Withdrawal Behavior of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT)”, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 76(1), 13-30, 2018.
- [151] M. Izzi, G. Flatscher, M. Fragiaco, G. Schickhofer, “Experimental Investigations and Design Provisions of Steel-to-Timber Joints with Annular Ringed Shank Nails for Cross-Laminated Timber Structures”, *Constr. Build. Mater.*, 122(446-457), 2016.
- [152] T. Uibel, H.J. Blaß, “Edge Joints with Dowel Type Fasteners in Cross Laminated Timber”, 44th CIB-W18, 40-7-2, Bled, Slovenia, 2007.
- [153] R. Brandner, A. Ringhofer, M. Grabner, “Probabilistic Models for the Withdrawal Behavior of Single Self-Tapping Screws in the Narrow Face of Cross Laminated Timber (CLT)”, *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 13-30, 2018.
- [154] T. Uibel, H.J. Blaß, “Load Carrying Capacity of Joints with Dowel Type Fasteners in Solid Wood Panels”, 43rd CIB-W18, Paper 39-7-5, Florence, Italy, 2006.
- [155] G. D'Arenzo, G. Rinaldin, M. Fossetti, M. Fragiaco, “An Innovative Shear-Tension Angle Bracket for Cross-Laminated Timber Structures: Experimental Tests and Numerical Modelling”, *Engineering Structures*, 197, 109434, 2019.
- [156] C. Loss, A. Hossain, T. Tannert, “Simple Cross-Laminated Timber Shear Connections with Spatially Arranged Screws”, *Engineering Structures*, 173(340-356), 2018.
- [157] I. Gavric, A. Ceccotti, M. Fragiaco, “Experimental Cyclic Tests on Cross-Laminated Timber Panels and Typical Connections”, 14th ANIDIS Conference, Bari, Italy, 2011.
- [158] B. Dujic, V. Hristovski, M. Stojmanovska, R. Zarnic, “Experimental Investigation of Massive Wooden Wall Panel Systems Subjected to Seismic Excitation.” 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 3-8 September, Geneva, Switzerland, ID 490, 2006.
- [159] V. Hristovski, B. Dujic, M. Stojmanovska, V. Mircevska, “Full-Scale Shakingtable Tests of Xlam Panel Systems and Numerical Verification: Specimen 1”, *Journal of Structural Engineering*, 139(11), 2010-2018, 2013.
- [160] B. Dujic, S. Klobcar, R. Zarnic, “Shear Capacity of Cross-Laminated Wooden Walls”, 10th WCTE, 2-5 June, Miyazaki, Japan, 2008.
- [161] V. Awad, L. Giresini, M. Koshihara, M.L. Puppio, M. Sassu, “Experimental Analyses and Numerical Models of CLT Shear Walls under Cyclic Loading”, *Wood in Civil Engineering*, 11(223-240), 2017.

- [162] J. Vessby, B. Enquist, H. Petersson, T. Alsmarker, "Experimental Study of Cross-Laminated Timber Wall Panels", *Eur. J. Wood Prod.*, 67(2), 211-218, 2009.
- [163] W. Dong, M. Li, L.M. Ottenhaus, H. Lim, "Ductility and Overstrength of Nailed CLT Hold-Down Connections", *Engineering Structures*, 215, 110667, 2020.
- [164] M.O. Amini, J.W. Van de Lindt, S. Pei, D. Rammer, P. Line, M. Popovski, "Overview of a Project to Quantify Seismic Performance Factors for Cross Laminated Timber Structures in the United States", In *Materials and Joints in Timber Structures*, Springer, Dordrecht, 2014.
- [165] I. Gavric, M. Popovski, "Design Models for CLT Shearwalls and Assemblies Based on Connection Properties", *International Network on Timber Engineering Research*, 18, 2014.
- [166] M. Popovski, I. Gavric, "Performance of a 2-story CLT House Subjected to Lateral Loads", *Journal of Structural Engineering*, 142(4), E4015006, 2016.
- [167] J. Schneider, E. Karacabeyli, M. Popovski, S.F. Stiemer, S. Tesfamariam, "Damage Assessment of Connections Used in Cross-Laminated Timber Subject to Cyclic Loads", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 28(6), A4014008, 2014.
- [168] J. Schneider, S.F. Stiemer, S. Tesfamariam, E. Karacabeyli, M. Popovski, "Damage Assessment of Cross Laminated Timber Connections Subjected to Simulated Earthquake Loads", 12th WCTE, Auckland, New Zealand, 2012.
- [169] IBC-2009, International Building Code. International Code Council Inc. Country Club Hills, Illinois, USA, 2009.
- [170] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, Reston, Virginia, 2010.
- [171] M. Popovski, E. Karacabeyli, "Seismic Behaviour of Cross-Laminated Timber Structures", WCTE, 16-19 July, Auckland, 2012.
- [172] L. Pozza, R. Scotta, "Influence of Wall Assembly on Behaviour of Cross-Laminated Timber Buildings", *Proc. ICE-Struct. Build.*, 168(275-286), 2015.
- [173] I. Sustersic, M. Fragiaco, B. Dujic, "Seismic Analysis of Cross-Laminated Multistory Timber Buildings Using Code-Prescribed Methods: Influence of Panel Size, Connection Ductility, and Schematization", *Journal of Structural Engineering*, 142(4), E4015012, 2016.
- [174] A. Ceccotti, M. Follesa, "Seismic Behaviour of Multi-Storey XLam Buildings", COST Action E29, International Workshop Earthquake Engineering on Timber Structures, Coimbra, Portugal, 2006.
- [175] G. Flatscher, G. Schickhofer, "Shaking-Table Test of a Cross-Laminated Timber Structure", *ICE Struct. Build.*, 168(11), 878-88, 2015.

- [176] S. Pei, J.V. Van de Lindt, M. Popovski, “Approximate R-Ractor for Cross-Laminated Timber Walls in Multistory Buildings”, *J Archit Eng.*, 19(4), 245-55, 2013.
- [177] M. Popovski, S. Pei, J.W. Van de Lindt, E. Karacabeyli, “Force Modification Factors for CLT Structures for NBCC”, *Materials and Joints in Timber Structures*, 9(543-553), Springer, 2014.
- [178] L. Pozza, D. Trutalli, “An Analytical Formulation of q-Factor for Mid-Rise CLT Buildings Based on Parametric Numerical Analyses”, *Bull. Earthq. Eng.*, 15(5), 2015-2033, 2017.
- [179] M. Popovski, E. Karacabeyli, “Seismic Performance of Cross-Laminated Wood Panels”, 44th CIB-W18 Meeting, Alghero, Italy, Paper 44-15-7; 2011.
- [180] A. Ceccotti, C. Sandhaas, M. Okabe, M. Yasumura, C. Minowa, N. Kawai, “SOFIE Project–3D Shaking Table Test on a Seven-Storey Full-Scale Cross-Laminated Timber Building”, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(13), 2003-2021, 2013.
- [181] CNR-IVALSA, The Sofie Project, Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree, 2013. http://www.ivalsa.cnr.it/sofie.html?tx_wfqbe_pi1%5BPERSONA%5D=
- [182] A. Ceccotti, “New Technologies for Construction of Medium-Rise Buildings in Seismic Regions: The XLAM Case”, *Structural Engineering International*, 18(2), 156-165, 2008.
- [183] A. Ceccotti, C. Sandhaas, M. Yasumura, “Seismic Performance of X-Lam Buildings: The Italian Sofie Project”, 9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering, July 25-29, Toronto, 2010, no.1700.
- [184] I. Gavric, M. Fragiacomio, A. Ceccotti, “Cyclic Behaviour of Typical Metal Connectors for Cross-Laminated (CLT) Structures”, *Materials and Structures*, 48(6), 1841-1857, 2015.
- [185] A. Ceccotti, M. Follesa, M.P. Lauriola, C. Sandhaas, “SOFIE Project-Test Results on the Lateral Resistance of Cross-Laminated Wooden Panels”, 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, 3-8 September, Geneva, 2006, no.1912.
- [186] A. Ceylan, Z.C. Girgin, “Comparisons on Withdrawal Resistance of Resin and Phosphate Coated Annular Ring Nails in CLT Specimens”, *Construction and Building Materials*, 238, 117742, 2020.
- [187] ASTM D1761, Standard Test Methods for Mechanical Fasteners in Wood, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
- [188] A. Valanezhad, K. Tsuru, M. Maruta, G. Kawachi, S. Matsuya, K. Ishikawa, “Zinc Phosphate Coating on 316L-Type Stainless Steel Using Hydrothermal Treatment”, *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 2538-2541, 2010.
- [189] G.R. Perkins, “Fasteners and Method of Manufacture Thereof”, US Patent, US3813985A, U.S. Patent and Trademark Office, Washington, 1974.

- [190] ISO 6892-1, Metallic Materials, Tensile Testing, Method of Test At Room Temperature, International Organisation for Standardisation, 2016.
- [191] A. Hossain, M. Popovski, T. Tannert, “Cross-Laminated Timber Connections Assembled with a Combination of Screws in Withdrawal and Screws in Shear”, *Engineering Structures*, 168(1-11), 2018.
- [192] G.E. Luszczki, J.D. Clapp, W.G. Davids, R. Lopez-Anido, “Withdrawal Capacity of Plain, Annular Shank, and Helical Shank Nail Fasteners in Spruce-Pine-Fir lumber”, *For. Prod. J.*, 63(5–6), 213-220, 2013.
- [193] ETA-04/0013, Nails and Screws for Use in Nailing Plates in Timber Structures, European Technical Assessment, Denmark, 2015.
- [194] ANSI/AWC NDS, ASD/LRFD National Design Specification for Wood, American Wood Council (AWC), Washington, DC, 2012.
- [195] Wood Handbook: Wood as an Engineering Material, Centennial ed. General Technical Report FPL-GTR-190, Ed: R.J.Ross, U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, 2010.
- [196] D.R. Rammer, S.L. Zelinka, “Withdrawal Strength and Bending Yield Strength of Stainless Steel Nails”, *J. Struct. Eng.*, 141(5), 04014134, 2015.
- [197] J. Ehlbeck, W. Siebert, “Axially Loaded Nails: Proposals for Supplement to the CIB Code”, *Int. Council Build. Res. Studies Documentation Working Commission W18A-Timber Struct.*, CIB-W18A/21-7-5, Universitat Karlsruhe, Germany, 1988.
- [198] D.R. Rammer, S.G. Winistorfer, D.A. Bender, “Withdrawal Strength of Threaded Nails”, *J. Struct. Eng.*, 127(4), 442-449, 2001.
- [199] BS EN 26891, Timber Structures, Joints Made with Mechanical Fasteners, General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics, BSI Standards, Brussels, Belgium, 1991.
- [200] A. Ceylan, Z.C. Girgin, “Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Duvar-Döşeme Birleşiminin Yapısal Davranışının Deneysel İncelenmesi”, *Megaron*, 14(4), 521-529, 2019.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. A. Ceylan, Z.C. Girgin, "Comparisons on Withdrawal Resistance of Resin and Phosphate Coated Annular Ring Nails in CLT Specimens", Construction and Building Materials, 238 (2020): 117742. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117742
2. A. Ceylan, Z.C. Girgin, "Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Duvar-Döşeme Birleşiminin Yapısal Davranışının Deneysel İncelenmesi", Megaron, 14(4), 521-529, 2019. DOI: 10.14744/megaron.2019.75508

Projeler

1. Z.C. Girgin (yürütücü), A. Ceylan, "Lamine Kompozit Ahşap Taşıyıcı Sistem ile Farklı İklim Koşulları için Depreme Dayanıklı Konut Prototipi Geliştirilmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, FDK-2018-3367, Doktora Tez Projesi, 2018-2021.