ÇALIŞMA
MEGARON 2019;14(4):521-529
DOI: 10.14744/MEGARON.2019.75508

Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Duvar–Döşeme Birleşiminin Yapısal Davranışının Deneysel İncelenmesi

Experimental Investigation of Structural Behavior for Cross Laminated Timber (CLT) Wall-to-Floor Connection

Aygül CEYLAN, Z. Canan GİRGİN

ÖZ

Çapraz Lamine Ahşap (Cross-Laminated Timber, CLT); ahşap çok katlı yapı üretiminde, özellikle taşıyıcı duvar olarak kullanımına yönelik rijitlik gereksinimini karşılamak amacıyla geliştirilmiş endüstriyel ahşap bir üründür. CLT yapı elemanları, metal parçalar (köşebent, birleşim levhaları vb.) kullanılarak çivi, vida, kama vb. ile birleştirilir. Enerji yutabilen yapısal CLT birleşimlerinin geliştirilebilmesi amacı ile birleşimlerin, özellikle deprem riski yüksek alanlardaki etkinliği üzerine birçok deneysel çalışma yapılmasına karşın; Türkiye'de bu kapsamda bilimsel bir çalışmanın henüz yapılmamış olduğu görülmüştür. Bu amaçla çalışmada; metal birleşim parçaları kullanılarak biraraya getirilen, gerçek boyutlu CLT duvar-döşeme örneğinin, sismik yüklerin eğilme momentlerinden dolayı eksenel çekme kuvveti altındaki etkinliği, laboratuvar ortamında deneysel olarak incelenmiştir. Metal köşebent, birleşim levhaları ve fosfat kaplamalı halkalı çiviler yerli üretim yapan firmalardan sağlanmıştır. Deney süresince, yerleştirilen ölçüm cihazları ile yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeler kayıt altına alınarak; birleşimin davranışı ve göçme modu incelenmiştir. Sonuç olarak, birleşimin arka yüzünde kullanılan levhalar ile ön yüzde bulunan rijitleştirilmiş metal köşebentin köşe bölgesine eklenen fosfat kaplamalı halkalı çivilerin, döşeme elemanındaki çivilerin tutunma yeteneğini arttırarak sıyrılmasını ve göçme hasarlarının oluşmasını geciktirdiği görülmüştür. Deney örneğinin arkasındaki döşeme elemanını oluşturan tabakada lif kırılması, köşebent, levhalar ve birleşimi sağlayan çivi başlarında oluşan düzensiz şekil değişiklikleri gibi önemli hasar türleri ve göçme modları ile karşılaşılmıştır. Deneylerde, metal endüstrisini ve düşük maliyetli üretimi desteklemek amacıyla yerli üretim metal birleşim parçaları kullanılmıştır. Bu çalışma, Türkiye'de yapısal kullanıma yönelik CLT birleşim davranışını inceleyen ilk ve öncü deneysel araştırma olma özelliğini taşımaktadır. Araştırmanın sonuçları, etkin birleşim türleri konusunda ileride yapılması planlanan çalışmalar için de yol gösterici olacaktır.

Anahtar sözcükler: *CLT duvar-döşeme birleşimi; CLT taşıyıcı duvar; çapraz lamine ahşap; depreme dayanıklı yapı tasarımı; fosfat kaplamalı halkalı çivi; yapısal davranış.*

ABSTRACT

Cross-Laminated Timber (CLT) is an innovative industrial wood product, especially as a structural wall in order to meet the rigidity and strength requirements in multi-storey timber buildings. CLT members are assembled with metal connectors (angle bracket, joining plates, etc.) via nails, screws, dowels, etc. For energy-absorbing structural CLT connections, many experimental studies have been conducted on the effectiveness of the connections, especially for the earthquake prone regions. There is no scientific study in this context in Turkey yet. For this purpose; the performance of a full-scale CLT wall-to-floor specimen assembled with metal connection was experimentally investigated under axial tensile force due to bending moments of seismic loads. Domestic angle bracket, plates, and phosphate coated annular ring nails were used. All the displacements and strains were measured and collected during the test of the specimen, behavior of connection and the failure mode was observed. As a result, the back side deformation of CLT wall member was prevented with the plates for a longer period compared with no-plate case and the withdrawal resistance of from CLT floor increased through phosphate coated annular ring nails and extra three nails in the corner of angle bracket on the front side. Domestic metal connectors were used in the experiments to support the metal industry and the production with low cost. This study is a pioneering study in Turkiye on the experimental performance of CLT connections for the structural utilization. The results are promising, and the further experimental researches will continue for the most effective connection type.

Keywords: *CLT wall-to-floor connection; CLT shear wall; cross laminated timber; earthquake resistant building design; phosphate coated annular ring nail; structural behavior.*

Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi, Yapı Bilgisi Anabilim Dalı, İstanbul

Başvuru tarihi: **04 Eylül 2019** - **Kabul tarihi:** **17 Ekim 2019**

İletişim: Aygül CEYLAN. **e-posta:** aceylan@yildiz.edu.tr

© 2019 Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi - *© 2019 Yıldız Technical University, Faculty of Architecture*

Giriş

Yapısal lamine ahşap, değişik ölçülerdeki bağımsız ahşap tabakaların, denetimli endüstriyel koşullarda, özel bağlayıcılarla tutkallanıp birleştirilmesiyle oluşturulan ön üretimli ahşap yapı elemanlarıdır. Yapısal lamine ahşap sistem, çelik ve betonarme sistemler ile karşılaştırıldığında; taşıyıcı sisteme etkiyen ölü yük ve deprem yükü düzeyinde azalma, çeliğe benzer yüksek dayanım/yoğunluk oranı, yüksek yangın dayanımı, düşük nakliye maliyeti ve hızlı yapım süreci gibi yapısal özelliklerinin yanı sıra, yapı kabuğu tasarımında sağladığı düşük ısıtma ve soğutma gereksinimi; ayrıca mekan içindeki işitsel konfor düzeyine etkisi, negatif karbon ayak izi özelliği ve yapının yaşam döngüsü sürecine katkısı nedenleri ile dayanıklı ve sürdürülebilir yapı üretimine olanak sağlamaktadır.

Çapraz Lamine Ahşap (*Cross-Laminated Timber,* CLT), yapısal lamine ahşap grubunun en yenilikçi üyesidir; 3, 5, 7 ya da daha fazla tabakanın lif yönleri birbirine karşıt olacak biçimde, birbirlerine geniş yüzeylerinden yapıştırılması ile elde edilir. Tabakaların çapraz yerleştirilmesi, CLT elemana yüksek boyutsal kararlılık ve rijitlik sağlar. Böylece; düzlem içi rijitliği yüksek taşıyıcı duvar ve iki yönlü eğilme dayanımı olan döşeme sistemi elde edilebilmektedir. 1990'lı yıllarda Avrupa'da, ahşap çok katlı yapı üretiminde, özellikle yanal 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 başlanmıştır. Günümüzde, konut üretimi dışında kamu yapıları, eğitim kampüsleri, havaalanı terminali ve kapalı spor merkezleri gibi birçok büyük ölçekli yapılarda ve güçlendirme projelerinde, özellikle taşıyıcı duvar ve döşeme elemanı olarak kullanımı yaygın şekilde devam etmektedir.

Çelik, betonarme ve ahşap çerçeve sistemler ile kolaylıkla bütünleştirilebilen CLT yapı elemanları; diğer yapısal lamine ahşap elemanlarda olduğu gibi, metal parçalar (köşebent, birleşim levhaları vb. ile çivi, vida, kama vb.) kullanılarak birleştirilir. CLT birleşimlerinin, özellikle deprem riski yüksek alanlardaki etkinliği üzerine birçok deneysel çalışma yapılmaktadır.[1] Bu araştırmaların ortak amacı; enerji yutabilen (sünek) metal birleşimlerin geliştirilmesinin sağlanmasıdır. Birleşimin etkinliğini ölçen deneysel çalışmalar; birleşim deneyleri ve taşıyıcı duvar deneyleri olmak üzere iki alanda yoğunlaşmaktadır.[2] Taşıyıcı duvar deneyleri; CLT döşeme, çelik profil ya da betonarme temele birleştirilen, gerçek boyutlarında hazırlanan CLT duvar elemanlarının tek yönlü ya da tersinir yükleme çalışmalarını içerir. Birleşim deneyleri ise; yapının duvar-duvar ve duvar-döşeme birleşimlerinin etkinliğinin araştırılmasını esas alır; duvar deneyleri ile karşılaştırıldığında, daha küçük ölçekli ve düşük maliyetli deneyler olup, birleşim performansının görülmesi açısından daha uygun ve öncü deneylerdir.

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 anlamda, depreme dayanıklı yapılar üretebilmek amacıyla, rijitlik gereksinimini karşılayan CLT taşıyıcı duvarların, ahşap taşıyıcı sistemler için önemli bir yenilik olduğu görülmektedir. Burada, incelenmesi gereken öncelikli alan; özellikle Türkiye'de üretilen metal birleşimler kullanılarak, CLT duvar-döşeme birleşiminin, eğilme momentinin çekme kuvveti bileşeni altındaki etkinliğinin araştırılması konusudur. Bu kapsamda; gerçek boyutlu CLT elemanlar kullanılarak, tek yönlü çekme kuvveti altında, CLT duvar-döşeme birleşimi deneyi gerçekleştirilmiştir. Yapısal birleşimin davranışı, düzeneğe yerleştirilen tüm ölçüm cihazları ve gözlemler ile detaylı olarak incelenmiştir. Bu deneysel çalışma, yazarların bilgisine göre, Türkiye'de CLT birleşim davranışını inceleyen ilk araştırma olma özelliğini taşımaktadır. Araştırmanın sonuçları, aynı zamanda, ileride yapılması planlanan çalışmalar için de yol gösterici olacaktır.

Yöntem

Çalışma kapsamında; metal birleşim parçaları ile birarada getirilen gerçek boyutlu CLT duvar-döşeme örneğine, EN 26891 Standardı'na uygun olarak, düşey konumlu yük veren ile tek yönlü çekme tipi eksenel kuvvet uygulanmıştır. Deney düzeneği ve birleşim bölgesine yerleştirilen yeterli sayıda ölçüm cihazı ile yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmeler kayıt altına alınarak; birleşimin davranışı ve göçme modu incelenmiştir.

CLT Duvar-Döşeme Birleşiminin Bileşenleri

CLT Panel

CLT elemanlar; lif yönleri birbirine karşıt olacak biçimde (genellikle 90°) ve geniş yüzeylerinden (bazı durumlarda dar yüzeylerinden de), tutkal ile min. 0,6 MPa basınç altında yapıştırılarak elde edilen, 3, 5, 7 ya da daha fazla tabakalı panel tipi elemanlardır. Genellikle panel boyutları; 60 cm, 120 cm, 240 cm ya da 300 cm genişliğinde; maks. 1800 cm uzunluk ve 50,8 cm kalınlığa kadar üretilebilmektedir.[3]

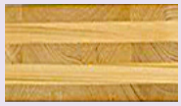
Deneysel çalışmada kullanılan CLT paneller; ilerleyen aşamalarda uluslararası literatür ile karşılaştırma yapılabilmesi açısından, yurtdışında sertifikalı üretim yapan bir firmadan sağlanmış olup, temel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Metal Birleşim Parçaları

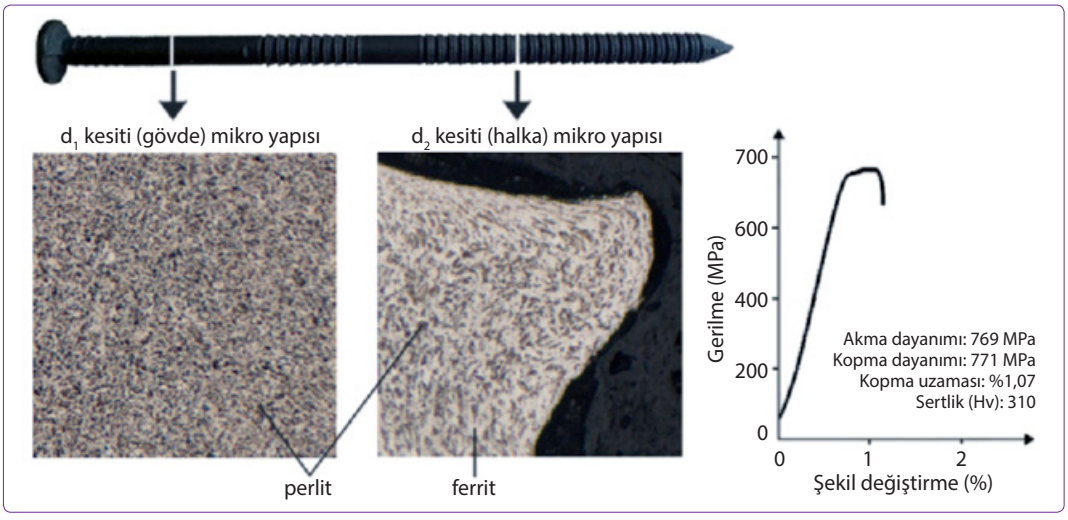
CLT duvar-döşeme metal birleşimlerinde; 2 mm * 77 mm * 86 mm boyutlarında, rijitliği arttırılmış, eşit kollu çelik kö-

[1] Dujic ve Zarnic, 2005, Asiz ve Smith, 2009, Ceccotti vd. 2013, Gavric, 2013.
[2] Uibel ve Blaß, 2007, Munoz vd. 2010, Schneider vd. 2012, Hossain vd. 2018.
[3] FPInnovations, 2011.

Tablo 1. CLT duvar ve döşeme panelin fiziksel ve mekanik özellikleri

CLT panel kesiti	CLT özellikleri	
	Ağaç türü	Ladin (Ara tabakalar, çam ya da karaçam içerebilir.)
3 tabakalı	Tabaka yapısı	3 tabakalı; 33,34,33 mm (duvar elemanı) 5 tabakalı; 40,30,40,30,40 mm (döşeme elemanı)
	Mukavemet sınıfı	C24 (EN 338)*
	Ort. yoğunluk	470 kg/m^3
	Nem içeriği	%12 ± %2
	Tutkal türü	Formaldehit içermeyen tutkal
5 tabakalı	Kullanım sınıfı	EN 1995-1-1 Sınıf 1 ve 2**

*BS EN 338, 2016. **BS EN 1995-1-1, 2014.



Şekil 1. Deneyde kullanılan çivinin mikro yapısı ve mekanik özellikleri.

şebent (angle bracket); 2 mm*40 mm*100 mm ölçülerinde düz metal levha ve 3,20 mm gövde çaplı 75,86 mm uzunluğunda fosfat kaplamalı düşük karbon içerikli halkalı çiviler (annular ring nail) kullanılmıştır. Rijitliği arttırılmış köşebent, Türkiye'de yurt içinde üretim ve satış yapan bir firmadan elde edilirken; halkalı çiviler, yurtdışına ihracat yapan bir firmadan sağlanmıştır. Halkalı çiviler, elle ya da taşınabilir çivi çakma tabancaları kullanılarak uygulanabilir. Bu çalışmada tüm çiviler, metal birleşimlere el ile çakılmıştır.

Fosfat Kaplamalı Halkalı Çiviler

Deneyde kullanılacak fosfat kaplamalı halkalı çivilerin karakteristik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla; çividen alınmış 5 cm'lik parça üzerinde, ISO 6892-1'e[4] göre çekme dayanımı ve şekildeğiştirmesi elde edilmiş, ayrıca ışık metal mikroskopu altındaki mikro yapı görünümü izlenmiştir (Şekil 1). Çivinin malzeme özellikleri incelendiğinde; koyu renkli alanlar perlit, açık renkli alanlar ise ferrit mikro yapıları göstermektedir. Mikro yapıda yuvarlak taneli ya da lamelli olarak görülebilen perlit, mukavemeti sağlayan bileşendir. Düşük karbon içeriğine sahip ferrit yapı da, çivinin elastik sınıra ulaşması durumunda, ani kırılmayı (gevreklik) engellemektedir.

Çiviler, öncelikle ortam koşullarına dayanıklılık amacıyla, üretim aşamasında değişik kimyasal bileşikler ile kaplanır. Bu çalışmada kullanılan halkalı çiviye, üretim aşamasında, fosfat esaslı[5] kimyasal kaplama işlemi uygulandığı bilinmektedir. Bu kaplama; korozyon dayanımını arttırmanın yanı sıra; çivinin ahşaba girişini kolaylaştırırken, çivi yüzeyinde oluşan kristal yapı[6] çekme gerilmesi altında çivinin tutunma yeteneğini (aderans) arttırmakta, böylece çivinin ahşap liflerden sıyrılmasını (withdrawal) zorlaştırmaktadır. Fosfat kaplamanın, kaplamasız bir çivi ile karşılaştırıldığında, en az %40 ek tutunma yeteneği (holding capacity) sağladığı belirtilmiştir.[7]

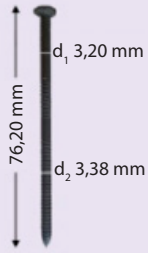
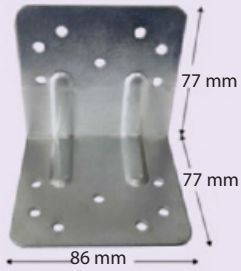
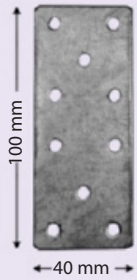
[4] EN ISO 6892-1, 2016.

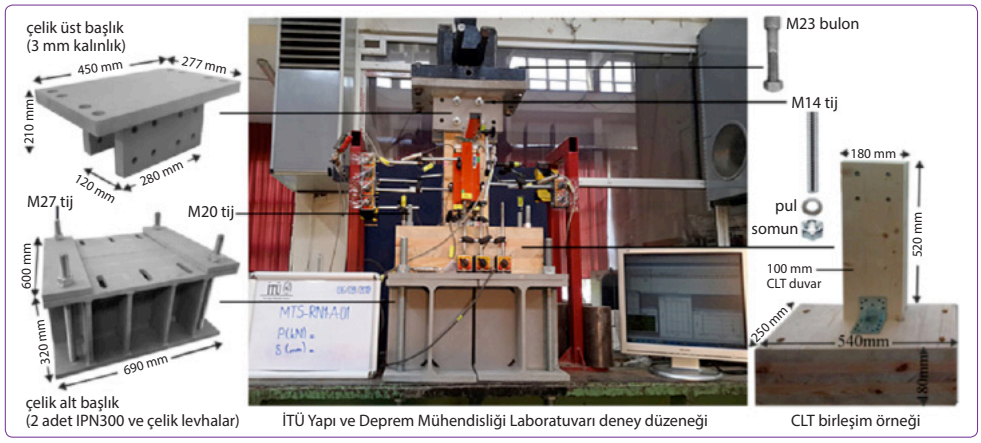
[5] Fosfat esaslı kaplama,; sıcak çinko ya da manganez asidi fosfat çözeltisine daldırılarak gerçekleştirilen kaplama işlemidir. İşlem sonrası, koyu gri renkte olan kaplamanın rengi zamanla kovulasarak. siyah renge yaklaşır.

[6] Valanezhad vd. 2010.

[7] Perkins, 1974.

Tablo 2. CLT duvar-döşeme metal birleşimi özellikleri

Halkalı çivi	Metal köşebent	Metal levha	Uygulama
			
d_1, gövde çapı d_2, halka çapı	kalınlık, 2 mm delik çapı, ∅ 5 mm	kalınlık, 2 mm delik çapı, ∅ 5 mm	Uygulamada; köşebentin duvar-döşeme birleşimini sağlayan köşesine, diğer çivilerle aynı özellikte, üç adet çivi eklenmiştir.



Şekil 2. CLT duvar-döşeme birleşimi deney düzeneğinin hazırlanması.

Köşebent ve Levhalar

CLT duvar-döşeme birleşimi deneyinde kullanılan rijitleştirilmiş köşebent ve düz levha özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Resimlerden de görüldüğü gibi, köşebent ve levha üzerinde fabrika üretimleri aşamasında açılmış delikler bulunmaktadır. Deney öncesi yapılan pilot deneylerde, çekme kuvveti altında, köşebentin döşemeye tutunma yeteneğinin arttırılabilmesi amacıyla, döşemenin duvara birleştiği delik açılmamış köşe bölgede, ek çivilerin kullanılmasının yararlı olacağı görülmüş; bu nedenle köşebentin bu bölgesine aynı özellikte üç adet çivi eklenmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarında CLT birleşim deneylerinde görüldüğü üzere 2,5-3 mm kalınlığındaki köşebentler kullanılmak istense de; üretici firmanın mevcut 2 mm kalınlıklı köşebenti ile yetinilmiş,[8] buna karşılık birleşimlerde ek önlemler alınmıştır.

Deney Düzeneği ve Veri Toplama

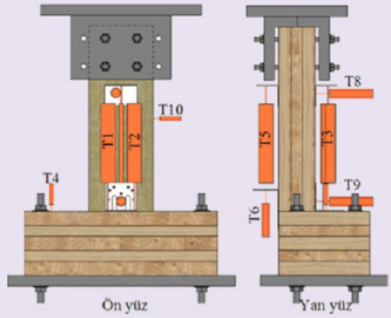
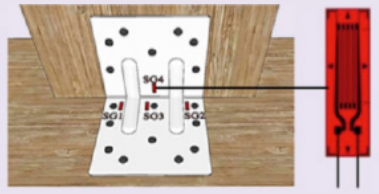
Birleşimi oluşturan duvar ve döşeme CLT örneklerinin seçimi ve kesimi için; şantiye uygulamaları dikkate alınarak, 180 mm kalınlığında 5 tabakalı bir döşeme ve 100 mm kalınlıklı, 3 eşit tabakalı bir duvar elemanı kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın amacı; çekme kuvveti altında CLT duvar elemanının, döşemeden ayrılma davranışının incelenmesi olduğu için duvar elemanının, ahşap taşıyıcı duvar özelliği olacak şekilde daha fazla tabakalı seçilmesine gerek görülmemiştir. Deneye başlamadan önce kesilen CLT elemanlar, %12 nem içeriğinin korunabilmesi amacıyla, 20±2°C ve % 65±5 bağıl nem koşullarında bekletilmiştir.

Çalışma kapsamında; tek yönlü çekme tipi eksenel kuvvet altındaki CLT duvar-döşeme birleşiminin davranışının incelendiği deney, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin kurulumu öncesinde; CLT örneğinin yük veren ile bağlantısının yapılabilmesi için çelik üst/alt başlık tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiş olup birleşim detayları Şekil 2'de verilmiştir.

CLT duvar-döşeme birleşimi deneyinde; ±300 mm ve ±250 kN olan düşey konumlu hidrolik veren ile, EN

[8] Üretici firma, kalıp değişikliği maliyeti gerektiren bu isteği, ancak önemli bir talep artışının söz konusu olduğu durumda yapabileceğini belirtmiştir.

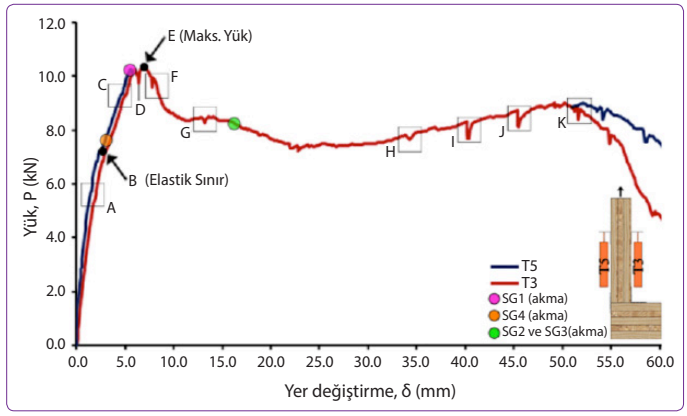
Tablo 3. Deney düzeneğindeki yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçerler

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

26891'e[9] uygun olarak, 0,04 mm/sn (2,5 mm/dk) yükleme hızıyla, çekme tipi eksenel kuvvet uygulanmıştır. CLT örneğinin, düzenekle tam olarak örtüşmesini sağlamak amacıyla, deney öncesinde ~1,5 kN basınç kuvveti uygulanmış, sonrasında yük sıfırlanarak, çekme kuvvetinin uygulanmasına geçilmiştir. Deney süresi, ~3 saat olup, köşebent-döşeme birleşimini sağlayan tüm çivilerin CLT'den sıyrılması tamamlanıncaya kadar devam etmiştir.

Birleşim bölgesine yerleştirilen yeterli sayıda yerdeğiştirme ölçer (T1-T10) ile tüm mutlak ve göreli yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Yerdeğiştirmenin daha fazla beklenildiği yerlerde 100mm ya da 50mm'lik; düzlem dışı hareketin ölçüldüğü yerlerde ise 25mm'lik ölçüm cihazları (T4 ve T10) kullanılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerler dışında, köşebent üzerine tek eksenli, 3 mm * 10 mm boyutlarında ve 120 ohm dirençli şekildeğiştirme ölçerler (SG1-SG4) yapıştırılarak tüm veriler kayıt altına alınmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan tüm yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçerler Tablo 3'te verilmiştir.

Tek yönlü çekme tipi eksenel kuvvet uygulanan, CLT duvar-döşeme birleşiminin davranışının belirlenebilmesinde öncelikle; yük-yerdeğiştirme değişimi (P-δ) incelenmiştir (Şekil 3). Yerdeğiştirme ölçümünde, T3 nolu düşey yerdeğiştirme ölçer esas alınmıştır. Arka yüzdeki iki levhanın çekme yönünde (yukarı doğru) hareketini ölçen T5 ve T6'nın (Tablo 3), T3'e benzer ölçümleri nedeniyle; grafikte T6 ölçümleri gösterilmemiş, T5'in ise başlangıçtaki hafif ve özellikle son aşamadaki farklılığı vurgulanmıştır. T5'in δ=~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, δ=2,74 mm düzeyinde ulaşılmıştır; maks. yük düzeyi ise 10,37 kN olup 6,72 mm yerdeğiştirmeye karşı gelmektedir. Maks. yük düzeyine varıncaya kadar doğrusal davranış izlenmiş, sonrasında ise belirli yerlerde ani düşüşler gözlenmiştir. Deney sırasındaki önemli gözlemleri içeren açıklamalar ve fotoğrafları Tablo 4'te verilmiştir. Çekme kuvvetinin etkisiyle, köşebentin döşeme yüzeyinden hafifçe ayrılmasının hemen ardından, arka yüzdeki levha-1'i döşemeye birleştiren üst çivilerin olduğu yerden, döşemede enine yönde açılma ile ilk çatlak oluşmuştur (Gözlem A). Artan çekme kuvveti ve arka levhaların düşey yöndeki kayma hareketi nedeniyle; çatlak genişliği artmaya başlamış ve lif kırılması, tabakayı oluşturan yaş halkasının yaklaşık şeklini izleyerek derinleşmeye devam etmiştir (Gözlem C).

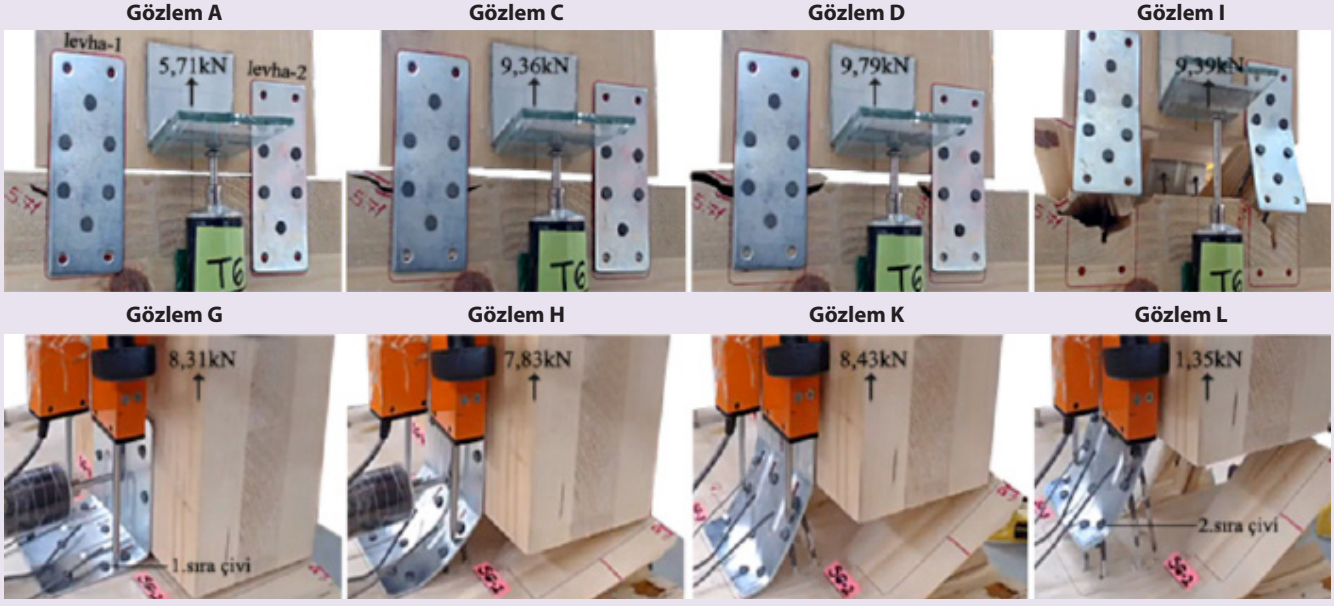


Şekil 3. Deney örneğinin yük-yerdeğiştirme grafiği (P-δ).

[9] BS EN 26891, 1991.

Tablo 4. Deney sürecindeki önemli gözlemler

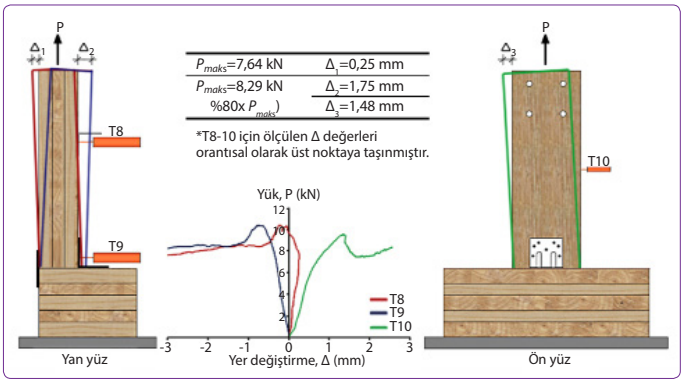
Gözlem	P (kN)	δ (mm)*	Açıklama
A	5,71	1,69	Hasar başlangıcını gösteren sesin duyulması ve levha-1 nedeniyle oluşan lif kırılması
B	7,25	2,74	P-δ grafiğinde rijitliğin değiştiği elastik sınır düzeyi
C	9,36	4,75	Gözlem-A'daki hasarın, levhanın diğer yanında da oluşması, derinleşmesi ve döşeme elemanın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



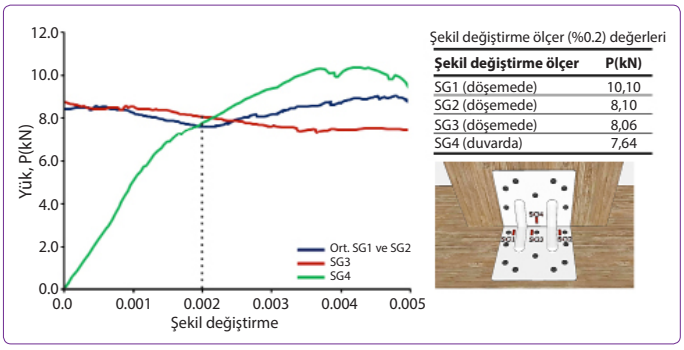
* T3 ve T5'in ortalamasıdır.

Maks. yük düzeyine ulaşılmadan hemen önce benzer hasar oluşumu levha-2 birleşiminde de izlenmiştir (Gözlem D). CLT döşeme tabakalarındaki lif kırılmaları ve duvar bileşeninin yukarı yönde hareketi nedeniyle, arka yüzdeki levhalarda eğilme davranışı oluşmaya başlamıştır (Gözlem F). Bu aşamada, çekme kuvvetine karşı, deney örneğinin ön yüzündeki köşebenti birleştiren çivilerin direnç göstermeye başladığı ve çivi başlarında düzensiz şekildeğiştirmelere neden olduğu gözlenmiştir (Gözlem H ve J). Köşebentin döşeme yüzeyinden ayrılmasının (Gözlem K) ardından; 2.sıra çivilerin boylarının ~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 cihazı, P=9,72 kN düzeyine kadar (+), sonrasında ise (-) değer almıştır. Bu durum duvar-döşeme birleşiminin; arka yüzündeki levhalar nedeniyle hafifçe 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. Bu hareket, duvar düzleminde yatay doğrultuda ölçüm alan T10 (+) yerdeğiştirme değerleri ile de doğrulanmıştır. Deney süresince, duvar elemanındaki öne-arkaya ve yanal yöndeki yerdeğiştirmeleri gösteren P-Δ grafiği, maks. yük düzeyindeki yerdeğiştirmeler ve hareketin şematik değişimi Şekil 4'de verilmiştir. Bu hareket, P-δ eğrisinde T3 ve T5 ölçerlerin maks. yüke ulaşıncaya kadar izledikleri yolu belirlemiş ve T5 daha az yerdeğiştirme ölçmüştür (Şekil 3).



Şekil 4. CLT duvar-döşeme birleşiminin deney sürecindeki hareketi.



Şekil 5. Metal köşebent üzerindeki şekildeğiştirme ölçümleri.

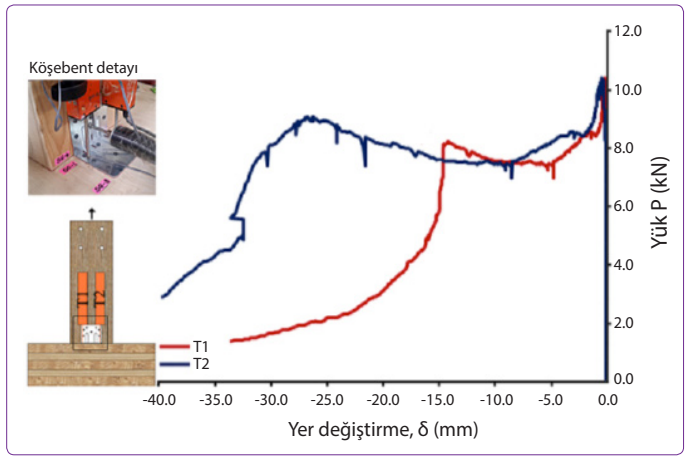
CLT duvar-döşeme birleşimini sağlayan köşebent üzerine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler ile metal üzerindeki değişimler kayıt altına alınmıştır. Duvar yönü merkezde düşey ölçüm yapan SG4'ün şekildeğiştirmesi, artan yük düzeyi ile doğru orantılı olarak artmış; arkadaki iki levhanın hasarı sonrası SG4, diğer şekildeğiştirme ölçerler ile birlikte %0.2'ye ulaşmış, elastik sınır düzeyini izleyerek akma sınırına gelinmiştir (Şekil 5).

Deney sürecinde, CLT döşemenin arkasındaki üst tabakada oluşan ilk çatlağın (Gözlem A, Tablo 4) giderek açılması sonrasında; duvar-döşeme birleşimi, arka yüzdeki levha-1 yönünde, daha serbest durumda hareket etmeye devam etmiştir. Bu durumun sonucu olarak; ön yüzde bulunan köşebentin sol (T1) yanı daha erken göçmüştür. Bu hareket, köşebent üzerindeki düşey yerdeğiştirme ölçerler T1, T2'nin grafiğinde de görülmekktedir (Şekil 6).

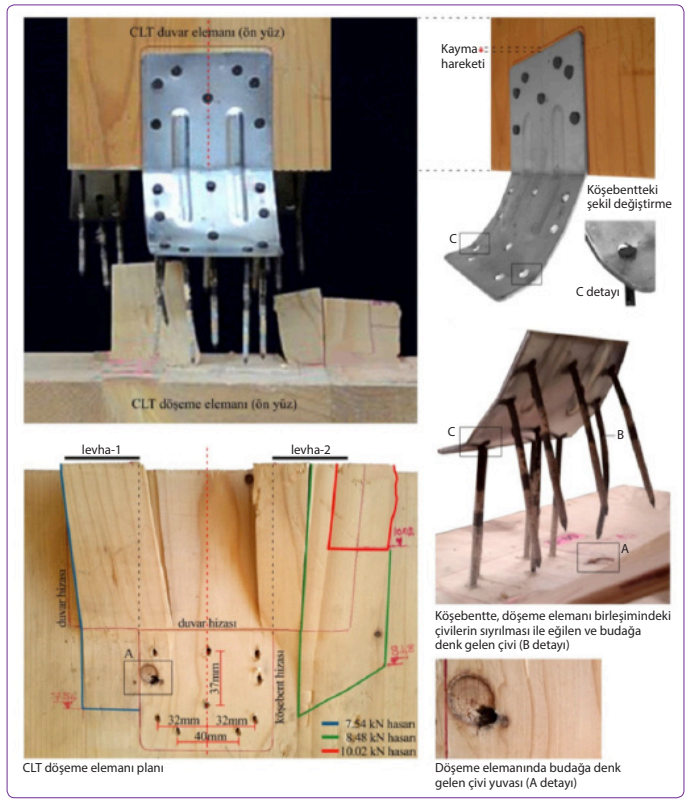
Veri Analizi ve Değerlendirmeler

Bu çalışmada gerçekleştirilen CLT duvar-döşeme birleşimi deneyinde; arka yüzde döşeme elemanını oluşturan tabakada lif kırılması, köşebent, levhalar ve birleşimi sağlayan çivi başlarında oluşan düzensiz şekil değişiklikleri gibi önemli hasar türleri ve göçme modları ile karşılaşılmıştır (Şekil 7 ve Şekil 8). Söz konusu durumlar burada açıklanacaktır:

- Döşeme birleşimini sağlayan halkalı çivilere ek olarak, aynı özellikte ve eksende üç çivinin eklenmesi ile;



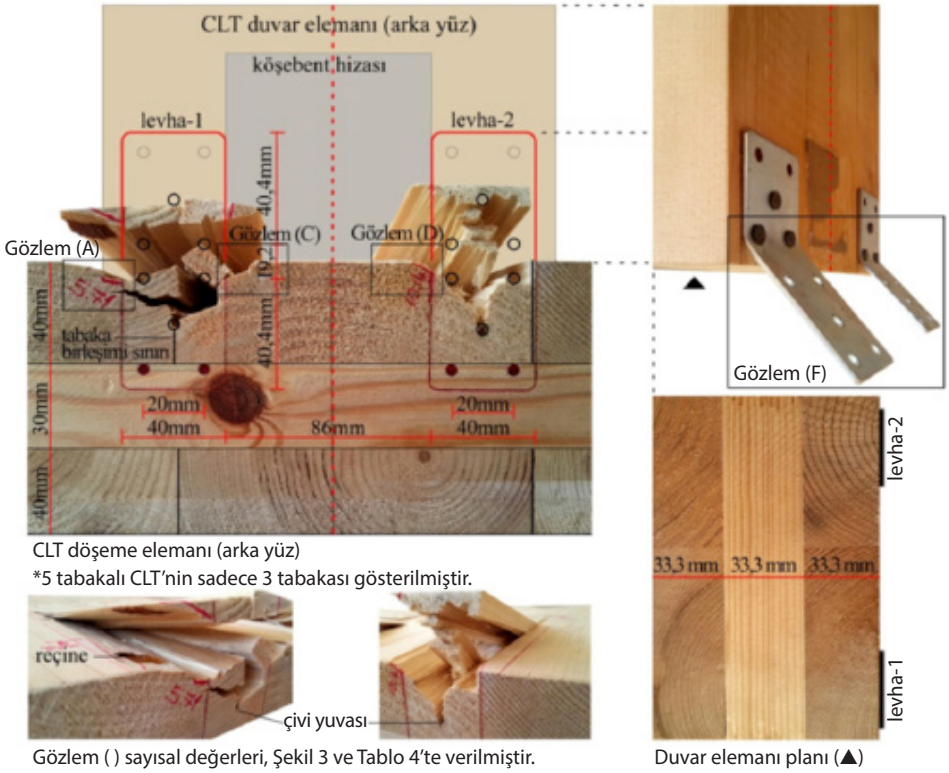
Şekil 6. T1 ve T2 düşey yerdeğiştirme ölçerlerin P-δ grafiği.



Şekil 7. CLT duvar-döşeme birleşimi ön yüzü göçme modları.

köşebent birleşiminin çekme-eğilme rijitliği artarak, levha hasarı sonrası duvardaki eğilme davranışı ve çivinin sıyrılmasının geciktiği görülmüştür.

- Köşebentin döşemeye birleşimini sağlayan çivilerin, neredeyse doğrusal şekilleri ile döşemeden sıyrıldığı; ancak budağa denk gelen bir çivide, tutunma yeteneğinin artması nedeniyle, eğilme hareketinin oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 7).
- Çekme kuvvetindeki artışa bağlı olarak, birleşimin arka yüzündeki levhalar ve çivilerin düşey yöndeki kayma hareketleri nedeniyle; döşeme elemanını oluş-



Şekil 8. CLT duvar-döşeme birleşimi arka yüzü göçme modları.

turan tabakalarda lif kırılmaları oluşmuştur (Şekil 8). Oluşan ilk lif kırılması hasarı; levha-1 altında, döşeme elemanına birleşen ilk sıra çivi bölgesinde gerçekleşmiş; deney süresince yaş halkasının yaklaşık şeklini izleyerek derinleşmeye devam etmiştir.

- Levha-2 nedeniyle oluşan lif kırılması incelendiğinde; yaş halkalarının seyrek olduğu sol kısımda ilk hasarın oluştuğu görülmektedir. Levha-1 nedeniyle oluşan hasarın gerçekleşmesinde ise; döşeme birleşimini sağlayan ortadaki çivinin, CLT üst tabakasında, yatayda yer alan tabaka birleşim bölgesine denk gelmesi durumu (Şekil 8), yaş halkası yoğunluğu etkisinin önüne geçmiştir. Levha ortasında bulunan çivilerde eğilme davranışı gözlenirken; diğer simetrik olarak çakılan çivilerde ise yaklaşık olarak doğrusal şekilde sıyrılma olduğu görülmüştür. Bu durum, uygulamada simetrik olarak çakılan çivilerin, yükün eşit şekilde paylaşımı ilkesi ile, daha yüksek dayanım gösterebileceğini doğrulamaktadır.
- Döşeme elemanda, CLT tabakaları birleştiren tutkalın dayanımının yüksek olduğu ve tutkal bölgesinde herhangi bir sorunun oluşmadığı görülmüştür.
- Arka yüzdeki levhalarda oluşan hasarın belirginleşmesi ile elastik sınır sonrası, köşebent üzerindeki şekildeğiştirme ölçümlerinde akma sınırına ulaşılmıştır.

Sonuçlar ve Öneriler

Türkiye'de, günümüzün çağdaş ahşap yapı sistemlerinde, yanal yüklere karşı rijitlik sağlayan, yenilikçi, taşıyıcı duvar/döşeme bileşeni olan CLT yapı elemanları ve metal birleşimlerinin, yapısal davranışını inceleyen bilimsel bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu deneysel çalışmada; Türkiye'de üretilen metal birleşim parçalarının kullanımı ile, ilk aşamada, uygun bir CLT döşeme-duvar metal birleşimi üretilerek; eğilme momentini temsil eden çekme/basınç kuvvetlerinden tek yönlü çekme kuvveti altında, birleşimin etkinliğinin belirlenmesi üzerine odaklanılmıştır. Metal birleşim parçaları olarak; ön yüzde rijitliği arttırılmış hazır delikli eşit kollu çelik köşebent, arka yüzde ise iki metal levha kullanılmış olup bu parçalar, yine yerli üretim olan fosfat kaplı halkalı çiviler kullanılarak birleştirilmiştir. Deneysel çalışmada elde edilen veriler ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Arka yüzde, levha-1'in döşeme elemanına birleştiği üst tabakada, ilk lif kırılmasından (P=5,71 kN) sonra, çatlak açılarak, rijitliğin değiştiği elastik sınıra P=7,25 kN düzeyinde ulaşılmıştır.
- Arka yüzdeki lif kırılması, tabakayı oluşturan yaş halkasının yaklaşık şeklini izleyerek derinleşmeye devam etmiş, elastik sınırdan %43 daha yüksek yük düzeyinde maks. yüke (P=10,37 kN, δ=6,72 mm) ulaşılmıştır. Elastik sınırdan (δ=2,74 mm) maks. yük düzeyine kadar yerdeğiştirme, daha hızlı olarak, 2,5 kat artmıştır.

- Birleşimin arka yüzündeki metal levhalar, deney örneğinin çekme kuvvetine karşı dayanımını arttırmıştır. Yerdeğiştirme biçimi olarak; duvar kısmı önce hafifçe geriye, sonrasında düzlemine gelerek hafifçe öne doğru hareket etmiştir.
- Arka yüzde gerçekleşen hasar düzeyinin; duvarın iki levha ile döşemeye birleşiminde, çivilerin birleşim bölgesine yakınlığı ve yaş halkası yoğunluğu ile ilişkili olduğu anlaşılmıştır.
- P-δ grafiğinde; maks. yük düzeyine ulaşılıncaya kadar doğrusal davranış olduğu; sonrasında, döşeme tabakasında oluşan lif kırılmaları ve göçmeler ile çivi başlarındaki düzensiz şekildeğiştirmeler sonucunda, yük düzeyinde ani azalmalar oluştuğu görülmüştür.
- Rijitliği arttırılmış köşebentin deliksiz köşe bölgesine eklenen üç çivi; arka levhalardaki göçme sonrasında, köşebentin döşemeye tutunmasını beklenildiği gibi arttırmış, duvarın öne doğru eğilmesini ve köşebentteki diğer halkalı çivilerin sıyrılmasını geciktirmiştir.
- Birleşimi oluşturan çivilerin genellikle, doğrusal bir şekilde döşeme elemanından sıyrıldığı görülmüştür; ancak köşebentteki çivilerden birinin budağa denk gelmesi sonucu sıyrılma direncinin artması, çivide eğilmeye neden olmuştur. Arka yüzdeki levhaların ortasında bulunan çivilerde de eğilme davranışı gözlenmiştir.
- Arka yüzdeki levhalarda oluşan hasarın belirginleşmesi ile elastik sınır sonrası, köşebent üzerindeki şekildeğiştirme ölçümlerinde akma sınırına ulaşılmıştır.
- Döşeme elemanın CLT tabakalarını birleştiren tutkalda, dayanım açısından herhangi bir sorunun oluşmadığı görülmüştür.
- Fosfat kaplı halkalı çiviler, tutunma yeteneği açısından iyi bir etkinlik düzeyi sağlamıştır.
- Türkiye'de enerji yutabilen CLT birleşimlerin üretilebilmesi, CLT kullanılan ahşap yapı sistemlerinin etkin ve doğru tasarımı ile sözkonusu yapım sistemlerinin yaygınlaşabilmesi açısından, bu deneysel çalışmanın öncü olabileceği düşünülmektedir.
- Türkiye'de depreme dayanıklı, yangın dayanımlı ve sürdürülebilir ahşap yapı sistemlerinin tasarımı konusunda, CLT yapı elemanları kullanımının sağlayacağı önemli katkılar gözönünde bulundurulmalıdır.
- Çağdaş ahşap yapım sistemlerinin tasarımı, ancak bu konudaki bilgi eksikliğinin giderilmesi ve alanında yetkin uzmanların yetiştirilebilmesi ile gerçekleşebilecektir.
- Özellikle yapısal lamine ahşap konusunda, sürdürülebilir tasarım anlayışının temelini oluşturan endüstriyel ormancılık uygulamalarının özendirilmesi ve desteklenmesi gerekmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, FDK-2018-3367 proje numarası ile Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nce desteklenmektedir. Deneysel araştırmada malzeme temini ve CLT birleşimlerin üretimi konusunda Asmaz Ahşap A.Ş.'ye ve bilimsel katkıları nedeniyle Prof. Dr. Kelami Şeşen'e teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Asiz, A., Smith, I. (2009) "Structural Connections for Massive Timber Plate Elements in Hybrid Structures", IABSE Symposium Report , International Association for Bridge and Structural Engineering, 96(7), 126-134.

BS EN 1995-1-1:2004/A2. (2014) Eurocode 5: Design of Timber Structures, Part 1–1: General, Common Rules and Rules for Buildings, BSI Standards, Brussels, Belgium.

BS EN 26891. (1991) Timber Structures, Joints Made with Mechanical Fasteners, General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics, BSI Standards, Brussels, Belgium.

BS EN 338. (2016) Structural Timber, Strength classes, BSI Standards, Brussels, Belgium.

Ceccotti, A., Sandhaas, C., Okabe, M., Yasumura, M., Minowa, C., Kawai, N. (2013) "SOFIE Project–3D Shaking Table Test on a Seven-Storey Full-Scale Cross-Laminated Timber Building", Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 42(13), 2003-2021.

Dujic, B., Zarnic, R. (2005) "Report on Evaluation of Racking Strength of KLH System", University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetical Engineering, Slovenia.

EN ISO 6892-1. (2016) Metallic Materials, Tensile Testing, Method of Test At Room Temperature, International Organisation for Standardisation.

FPInnovations. (2011) CLT handbook: Cross-Laminated Timber, Ed.: S.Gagnon & C.Pirvu, Canadian ed., Special Publication SP-528 E, Quebec.

Hossain, A., Popovski, M., Tannert, T. (2018) "Cross-Laminated Timber Connections Assembled with a Combination of Screws in Withdrawal and Screws in Shear", Engineering Structures, 168, 1-11.

Gavric, I. (2013) "Seismic Behavior of Cross-Laminated Timber Buildings", Ph.D. Thesis, University of Trieste, Italy.

Munoz, W., Mohammad, M., Gagnon, S. (2010) "Lateral and Withdrawal Resistance of Typical CLT Connections", 11th World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italy.

Perkins, G.R. (1974) Fasteners and method of manufacture thereof, US Patent, US3813985A, U.S. Patent and Trademark Office, Washington.

Schneider, J., Stiemer, S. F., Tesfamariam, S., Karacabeyli, E., Popovski, M. (2012) "Damage Assessment of Cross Laminated Timber Connections Subjected to Simulated Earthquake Loads", 12th World Conference on Timber Engineering, Auckland, New Zealand.

Uibel, T., Blaß, H. J. (2007) "Edge Joints with Dowel Type Fasteners in Cross Laminated Timber", 44th CIB-W18 Meeting, 40-7-2, Bled, Slovenia.

Valanezhad, A., Tsuru, K., Maruta, M., Kawachi, G., Matsuya, S., Ishikawa, K. (2010) "Zinc Phosphate Coating on 316L-Type Stainless Steel Using Hydrothermal Treatment", Surface and Coatings Technology, 205(7), 2538-2541.