

Tarihi Ahşap Çatı Birleşim Davranışının Deneysel İncelenmesi

Nihan DOĞRAMACI AKSOYLAR^{1*}

Büşra Nur GÜRGÜN²

Mehmet Selim ÖKTEN³



ÖZ

Tarihi ahşap yapılar dünyanın birçok ülkesinin yanı sıra ülkemizin kültürel mirasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, tarihi ahşap yapı ve çatı sistemlerinde yer alan geleneksel birleşimlerin yapısal davranışlarının belirlenmesini amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında önemli tarihi yapılarımızdan biri olan Beylerbeyi Sarayı'nın ahşap çatı sistemi üzerinde saha incelemeleri gerçekleştirilmiş ve kullanılan farklı geleneksel birleşim türleri yerinde tespit edilerek ayrıntılı olarak incelenmiştir. Geleneksel birleşimler arasından tarihi ahşap yapıların hem çatı hem de duvar sistemlerinde sıkça rastlanan yarım geçmeli birleşim tipi incelenmek üzere seçilmiş ve birleşimin mekanik davranışı analitik ve deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Analitik çalışmada yarım geçmeli geleneksel birleşimin genel mekanik davranışı ve yatay yük taşıma kapasitesi gömme teorisine dayalı olarak oluşturulan model kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada dört adet yarım geçmeli birleşimin numunesi üzerinde monotonik ve çevrimsel yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman ilişkileri incelendiğinde, gömmeye dayalı çalışan yarım geçmeli birleşimlerin sünek davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Son olarak deneysel sonuçlar analitik model sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve kapsamlı biçimde değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tarihi ahşap çatı, Beylerbeyi Sarayı geçmeli birleşim, gömme teorisi, deneysel çalışma.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 14 Haziran 2025 günü ulaşmıştır. 23 Aralık 2025 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Eylül 2026 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tjce.1719905>

1 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
ndogramaci@fsm.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-4569-5403>

2 Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye
busranur.gurgun@stu.fsm.edu.tr - <https://orcid.org/0009-0007-8211-6902>

3 Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, İstanbul, Türkiye
selim.okten@msgsu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4689-767X>

* Sorumlu yazar

ABSTRACT

Experimental Investigation of Historical Timber Roof Connection Behavior

Historical timber buildings constitute a significant part of our cultural heritage as well as many countries of the world. This study aims to determine the structural behavior of traditional connections in historical timber and roof systems. Field studies were conducted on the timber roof system of Beylerbeyi Palace, one of our prominent historical buildings, and various traditional connection types were identified and evaluated in detail. Among these connections, the half-lap connection, which is widely used in both roof and wall systems of historical timber buildings, was selected for analysis, and its mechanical behavior was evaluated using analytical and experimental methods. In the analytical study, the lateral load-carrying capacity and overall mechanical response of the half-lap connection were determined using a model based on embedment theory. In the experimental study, four half-lap connection specimens were subjected to monotonic and cyclic loading tests. The force-displacement relationships gathered through these experiments demonstrate that the half-joint connections exhibit ductile behavior. Finally, the experimental outcomes were compared with the analytical results and evaluated comprehensively.

Keywords: Historical timber roofs, Beylerbeyi Palace, half lap connection, embedment theory, experimental study.

1.GİRİŞ

İstanbul farklı dönemlerden kalma tarihi yapılarıyla zengin bir kültür mirasına sahiptir. Yüzyıllar boyunca farklı mimari üsluplarla şekillenen bu yapılar, korunması gereken yeri doldurulamaz birer varlıktırlar. Zaman içinde meydana gelen yangınlar, depremler gibi doğal afetler tarihi yapıların özellikle 20. yüzyıl ortalarına kadar İstanbul yapı stoğunda önemli yeri olan ahşap yapıların büyük bir kısmının kaybedilmesine neden olmuştur.

Tarihi yapıların gizli kalmış öğelerinden olan ahşap çatılar, Türkiye ve dünyanın birçok ülkesinin kültürel mirasının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Binanın dışarıdan algılanmasında büyük etkisi olan ahşap çatıların taşıyıcı sistem kurgusu alışagelmış düzenden daha karmaşıktır. Günümüzde kültürel mirasın korunmasına yönelik artan duyarlılık yıllar içerisinde özgün ahşap çatı sistemlerinde uygulanan restorasyon yöntemlerinin önemini daha da gözler önüne sermiştir [1]. Çatı sistemlerinde geçilen açıklık, taşıyıcı eleman kesitlerinin yapının diğer kısımlarındaki taşıyıcılara göre daha büyük olması, kullanılan birleşimler ve birleştirme elemanları yapıldığı döneme ait özgün detaylar sunması açısından oldukça önemlidir. Ancak bakımsızlık, çevresel etkiler, yangın ve deprem gibi doğal afetler tarihi ahşap çatıların birçoğunun yenilenmesine neden olduğundan, özgün biçimiyle günümüze ulaşabilen ahşap çatı sayısını oldukça azaltmıştır [2]. Ayrıca özgün dokusundan uzaklaşarak farklı malzeme ve taşıyıcı sistem kurgusu ile yenilenen tarihi ahşap çatılar da kültürel mirasın sürdürülebilirliğini etkilemektedir.

Zengin tarihsel ve kültürel mirasa sahip ülkemizde, tarihi yapıların korunarak gelecek nesillere aktarılması için çok sayıda çalışma yapılmasına karşın, özellikle tarihi ahşap çatı sistemleri üzerine yapılan çalışmalar sınırlı kalmıştır. Mevcut çalışmalarda ise tarihi ahşap çatılar genellikle mimari bakış açısıyla değerlendirilmiş, buna karşın yapısal değerlendirme ve iyileştirme/destekleme uygulamalarının ele alındığı çalışmaların sayısının oldukça az

olduğu belirlenmiştir [2, 3]. Son yıllarda araştırmacılar tarafından daha çok tarihi ahşap yapıların deprem davranışlarının deneysel ve analitik olarak incelenmesi, hasar modelleme ve çeşitli güçlendirme teknikleri ve malzemelerin incelenmesini içeren çalışmalar gerçekleştirilmiştir [4-9]. Öte yandan, İtalya ve Portekiz başta olmak üzere İngiltere, Almanya ve Fransa gibi Avrupa ülkelerinde yer alan araştırma merkezlerinde, tarihi ahşap yapılarda kullanılan geleneksel birleşimlerin yapısal davranışlarının anlaşılmasına yönelik çok sayıda araştırma yürütülmüş olup, bu çalışmalar günümüzde de devam etmektedir. Bu araştırmalarda tarihi ahşap yapıların döşeme ve duvar ve çatı sistemlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel birleşim detaylarının davranışı hem deneysel hem de analitik yöntemlerle incelenmiştir. Tarihi ahşap yapılarda en sık karşılaşılan geleneksel birleşim türlerinden biri olan geçme zıvanalı birleşimler geometrik özellikleri, taşıma kapasiteleri ile çekme, kesme ve eğilme davranışları açısından çeşitli çalışmalarında deneysel yöntemlerle araştırılmıştır [10-13]. Bunlara ek olarak [14] çalışmasında Türkiye’deki geleneksel ahşap yapılarda (Hıms) kullanılan uç uca geçmeli ve geçme zıvana birleşimleri üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmiş ve bu birleşimlerin ahşap çerçevelerin deprem davranışına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Geleneksel birleşimlerin bir diğer türü olan dişli birleşimlerin yapısal davranışlarını karakterize etmek ve uygun güçlendirme teknikleri geliştirmek amacıyla çeşitli analitik ve deneysel araştırmalar yürütülmüştür [15-17]. Bu çalışmalarda özellikle dişli birleşimlerinin yük taşıma kapasiteleri üzerine odaklanılmıştır. Ayrıca [18] çalışmasında dişli birleşimlerin davranışı ve farklı göçme modları çekme deneyleriyle detaylı olarak incelenmiştir. Tarihi yapılarda hem duvar sistemlerinin düşey ve çapraz eleman birleşiminde hem de ahşap çatı sistemlerinde kullanılan yarım geçmeli birleşimlerin mekanik davranışları ve hasar oluşum mekanizmaları, çekme ve çevrimsel yükleme testleriyle incelenmiş ve uygun güçlendirme teknikleri değerlendirilmiştir [19, 20]. Bu tür birleşimlerin deneysel davranışlarını yeterli doğrulukla yansıtan analitik modeller ise [21] numaralı çalışmada ele alınmıştır. Söz konusu çalışmada yarım geçmeli birleşimlerin farklı yükleme koşulları altında modellenmesi ve birleşimin mekanik davranışını ifade eden malzeme parametrelerinin türetilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, yürütülen çalışmalarda birleştirme vasıtası olarak kullanılan yapıştırıcıların (tutkal vb.) etkileri de kapsamlı olarak incelenmiştir. Özellikle tarihi ahşap yapılarda koruma ve güçlendirilme yöntemleri arasında kullanılan yapıştırıcı kullanımının, alternatif yöntemlerle karşılaştırıldığında hem yapısal açıdan yüksek verimlilik hem de ekonomik çözüm sağladığı belirtilmiştir [22]. Birleştirme elemanı olarak kullanılan yapıştırıcıların birleşimin taşıma kapasitesini artırdığı, birleşim bölgelerinde oluşan yerel gerilme yığılmalarını azalttığını ve düzgün bir gerilme dağılımı sağladığı ortaya koymuştur [23, 24]. Buna karşın, yapıştırılarak birleştirilen elemanların sağladığı bu avantajlara rağmen, birleşim bölgesinde bulunan yapıştırıcının belli bir ölçüde gevrek davranışa yol açabileceği de vurgulanmıştır. Bu nedenle deprem etkisindeki ahşap yapıların tasarımı ve güçlendirilmesinde yapıştırıcı kullanılarak yapılan (tutkallı vb) birleşimlerin kullanılması önerilmemektedir [25]. Yürütülen tüm bu araştırmaların temel amacı, tarihi ahşap yapılara ait yapısal davranışların belirlenerek, tarihi ve kültürel mirasın korunması ve tüm özgünlükleriyle gelecek kuşaklara aktarılmasını sağlayacak koruma yöntemlerini geliştirmektir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar özellikle tarihi yapılarda yer alan ahşap çatı sistemlerinin en fazla ihmal edilen konulardan biri olduğu, yapısal ve kültürel değerlerinin yeterli olarak tanınmadığı ve özgünlüklerinin korunmadığı ve orijinal çatı elemanlarının çoğu zaman korunmadan değiştirildiği ortaya koymuştur [26-28]. Tarihi ahşap çatı sistemleri ve bu sistemlere ait birleşim detaylarının incelendiği en önemli çalışmalar [29-32] tarafından yürütülmüştür. Bu çalışmalarda çatılarda kullanılan geleneksel birleşimlerin yapısal

davranışı hem deneysel hem de analitik yöntemlerle ele alınmış ve çeşitli onarım tekniklerinin birleşim davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, tarihi çatı sistemlerinin yapısal değerlerinin ve koruma durumlarının doğru değerlendirilebilmesi amacıyla belirli ilkeler çerçevesinde yönerge ve standartlar geliştirilmiştir [33]. Bununla birlikte yazarların bilgisi dâhilinde ulusal literatürde, tarihi ahşap çatı sistemlerinde kullanılan birleşimlerin yapısal davranışını deneysel olarak inceleyen ve bu sistemlere yönelik yapısal güvenlik değerlendirmesinin araştırıldığı bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Buna karşın uluslararası literatürde konuyla ilgili çeşitli çalışmalar bulunsun da bu çalışmalarda da tarihi ahşap yapılarda kullanılan geleneksel birleşimlerin yapısal davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için çok sayıda deneysel araştırmalara ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada tarihi ahşap yapılarda, özellikle çatı sistemlerinde yer alan geleneksel birleşimlerin yapısal davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmanın ilk aşamasında İstanbul'un önde gelen tarihi yapılarından Beylerbeyi Sarayı ahşap çatı sisteminde saha incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda tarihi çatı sisteminde kullanılan geleneksel birleşim tipleri yerinde yapılan gözlemlerle belirlenmiş ve detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında tarihi ahşap sistemlerde sıkça kullanılan yarım geçmeli birleşim tipi seçilmiş ve bu birleşimin yapısal davranışı analitik ve deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Yürütülen analitik ve deneysel çalışmaların temel amacı, yarım geçmeli geleneksel birleşimlerin mekanik davranışının anlaşılması, taşıma kapasitelerinin belirlenmesi ve olası hasar oluşum bölgelerinin belirlenmesidir. Analitik çalışmada yarım geçmeli birleşimin yatay yük taşıma kapasitesi ve mekanik davranış gömme teorisine dayalı kurulan model aracılığıyla belirlenmiştir. Deneysel çalışmada ise deney düzeneğinin ölçeği ve sınır koşulları dikkate alınarak ürettirilen dört adet yarım geçmeli birleşim numunesi üzerinde monotonik ve çevrimsel yükleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda ortaya çıkan kuvvet deplasman eğrileri, analitik model sonuçlarıyla karşılaştırılarak kapsamlı şekilde analiz edilmiştir.

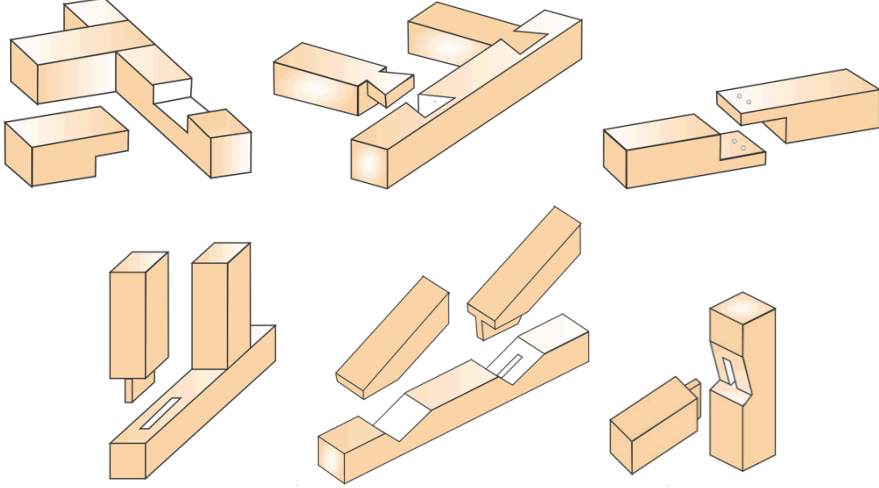
2. TARİHİ AHŞAP YAPILARDA KULLANILAN BİRLEŞİMLER

Ahşap yapılarda kullanılan birleşimler kuvvet aktarım mekanizmaları açısından iki ana gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilk grubu mekanik bir yöntemle yapılan ve elemanlar arasındaki yük aktarımının metal bağlantı elemanları (çivi, plaka, metal mil vb.) aracılığıyla sağlandığı birleşimlerdir. İkinci grup ise geleneksel birleşim olarak adlandırılan ve elemanlar arasındaki kuvvet aktarımının doğrudan elemanların temas yüzeyleriyle sağlandığı sistemlerdir. Bu temas yüzeylerinin hazırlanması nitelikli bir marangozluk işçiliği gerektirdiğinden bu birleşimler “Marangoz Birleşimleri” olarak da adlandırılır [34]. Tarihi ahşap yapılarda sıklıkla karşılaşılan bu tip birleşimler geçmeli ve/veya ahşap çubuk kamalı olarak uygulanmaktadır.

2.1. Geleneksel Ahşap Birleşimler

Birleşimler tarihi ahşap yapıların ve çatıların yapısal davranışlarında oldukça önemli bir rol oynamaktadır [35]. Bu yapılarda kullanılan ve günümüze kadar ulaşabilen geleneksel birleşim tiplerinin davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için yapıldıkları dönemin yapım

tekniklerinin bilinmesi önemlidir. Bunun en temel nedeni endüstri devriminden önce 19.yy başlarına kadar tarihi çatı sistemlerinin tasarımının geleneğe, deneme yanılma döngüsüne ve marangoz ustalığına bağlı gerçekleştirilmesidir. Geleneksel birleşimlerin yapıldıkları dönemde bilgiye ulaşım ve veri paylaşımı günümüzdeki kadar etkin/yaygın olmadığından ahşap malzemeyi tanıyan, doğasını bilen, kullanım ve sınırlamalarına ilişkin derin bilgi ve tecrübeyi kullanarak ahşap çatıların dayanıklılığını artıracak farklı kullanım biçimleri geliştiren marangoz ustalığı bu alandaki en temel uygulamaları oluşturmuştur. Tarihi ahşap yapı ve çatı sistemlerinde kullanılan geleneksel birleşimlerin çeşitli tipleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Tarihi ahşap çatılarda kullanılan geleneksel birleşim tipleri

Günümüz ahşap yapı yönetmeliklerinde (örn. ABTHYE-2025 [36]) esas olarak mekanik bir yöntemle gerçekleştirilen birleşimler için tasarım esasları verilmektedir. Buna karşın özellikle tarihi yapılarda sıklıkla karşılaşılan geleneksel birleşim tiplerinin tasarımına yönelik bilgiler ya çok sınırlı ya da hiç bulunmamaktadır. Örneğin yakın zamanda yürürlüğe giren ABTHYE-2025 [36] yönetmeliğinde geleneksel geçmeli/kavelalı eleman birleşimler yönetmeliğin kapsamı dışında tutulmuş ve Bölüm 4.11'de sadece karbon çeliğinden veya paslanmaz çelikten imal edilen bağlantı elemanları kullanılarak yapılan birleşimlerin tasarım esaslarına yer verildiği ifade edilmiştir. Dolayısıyla günümüzde neredeyse kaybolan bu ustalık (marangozluk) teknikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek, sadece tarihi yapılarda kalan sınırlı özgün sistemlerin yapısal analizleri ve deneysel testleriyle mümkün olabilmektedir [37].

Ahşap birleşimlerde yüklerin bileşkesinin birleştirme elemanlarının (temas yüzeyleri, tutkal, çivi vb.) ağırlık merkezinden geçmemesi durumunda dışmerkezlilik oluşur. Bu durum birleşim elemanlarının yalnızca kesme kuvvetine değil, aynı zamanda birleşim düzleminde etkili olan bir momente de maruz kalmasına neden olur. EN 1995-1-1 yönetmeliğine göre yapısal analizlerde iç kuvvetlerin hesaplanmasında elemanların ve birleşimlerinin rijitliklerinin ve birleşimlerin dışmerkezliklerinin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir.

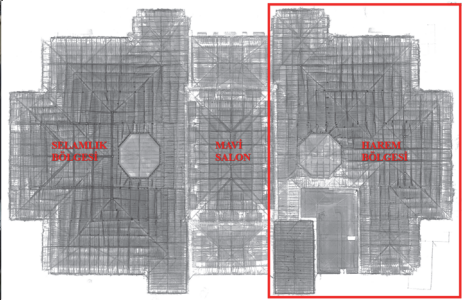
Ancak geleneksel birleşimlerin bu özelliklerinin nasıl dikkate alınacağı ne ilgili yönetmeliklerde ne de mevcut literatürde yapılan çalışmalarda yeterince açıklanmamıştır [38]. Ayrıca dışmerkezli ahşap birleşimlerin taşıma kapasitesinin belirlenmesinin zor olduğunu ve uygulanan yükleri güvenli bir şekilde taşıdığını gösteren testler yapılmadığı sürece tasarımda dışmerkezli birleşimlerin mümkün olduğunca tercih edilmemesini öneren çalışmalar mevcuttur [39, 40]. Geleneksel ahşap (marangozluk) birleşimlerde kuvvet aktarımı, esas olarak birleşen elemanların temas yüzeyleri aracılığıyla sağlanır. Kuvvetlerin aktarıldığı bu temas yüzeyleri genellikle birleşen elemanların kesitinden daha küçüktür. Bu nedenle, geleneksel ahşap birleşimlerin tasarımında, birleşim noktasındaki kuvvet dengesi iyi anlaşılmalı ve kritik bölgeler tespit edilerek taşıma kapasiteleri belirlenmelidir. Birleşimde meydana gelen kuvvet mekanizması, liflere dik doğrultuda ihmal edilemeyecek düzeydeki çekme etkisinin, önemli kesme gerilmeleri doğuracağı, birleşen elemanların temas yüzeylerinde gerilme yığılmalarının oluşabileceği ve kuvvet aktarımındaki dış merkezliliğin etkisi dikkate alınarak belirlenmelidir. Çoğu geleneksel ahşap birleşim dış merkezli olarak yüklense de birçok durumda eksantriklik küçük olduğu ve ihmal edilebilir olduğu ifade edilmiştir [40]. Burada incelenen yarım geçmeli geleneksel birleşimin analitik modellemesi, temas yüzeylerinde oluşan basınç gerilmeleri, oluşan gerilme yığılmaları ve kuvvet dengesi dikkate alınarak önceki çalışmalarla uyumlu olacak şekilde yapılmıştır. Ayrıca yapılan deneysel çalışmalar doğası gereği dışmerkezlik etkilerini de içermektedir.

2.2. Beylerbeyi Sarayı Çatı Sistemi Üzerine Saha Çalışması

Tarihi ahşap yapılarda kullanılan geleneksel birleşim detaylarının ve özelliklerinin belirlenmesi amacıyla hem tarihi özgünlüğü hem de geleneksel birleşim detaylarının çeşitliliği bakımından Beylerbeyi Sarayı ahşap çatı sisteminde saha çalışmaları yapılmıştır. Beylerbeyi Sarayı, İstanbul'un Beylerbeyi semtinde Sultan Abdülaziz tarafından 1863-1865 yılları arasında inşa ettirilen, 19. yüzyıl Osmanlı mimarisinin önemli örneklerindendir. Yapı dikkörtgen planlı bir ana yüksek bodrum kat üzerine iki katlı olarak inşa edilmiş olup ana bina binası Mabeyn ve Harem bölümlerinden oluşmaktadır. Çatı sistemi ise Selamlık (Mabeyn) Bölgesi, Harem Bölgesi ve iki bölüm arasında yer alan Mavi Salon çatısı olarak üç bölümden meydana gelmiştir [41]. Dört yönde kırma çatı formuna sahip ahşap sistem, üstten tüm cephe kenarlarını çevreleyen bir korkuluk ile gizlenmiştir. Çatı sisteminin hava fotoğrafı ve lazer tarama görüntüsü sırasıyla Şekil 2a ve 2b'de verilmiştir.



a) Hava fotoğrafı



b) Lazer tarama verisi

Şekil 2 - Beylerbeyi Sarayı çatısı

Saha incelemeleri restorasyon çalışmaları devam eden Harem Bölgesi çatısında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2b’de kırmızı çerçeve ile gösterilen bu bölümde ahşap çatı sistemi ve birleşim bölgeleri yerinde değerlendirilmiştir. Gözlemler sonucunda çatı ana taşıyıcısının iki adet üçgen kafes kiriş sisteminden oluştuğu belirlenmiştir. Ana taşıyıcı elemanlar üst başlık, alt başlık, dikme ve diyagonallerden oluşan sistemde taşıyıcı olmayan kuşaklama elemanları ise çift olarak uygulanıp çivilerle dikme ve üst başlıklara sabitlenmiştir. Ana makas sistemiyle 13,61m açıklık geçilmiş, kafes taşıyıcılar açıklığa dik doğrultuda 2,20m aralıklarla konulmuştur (Şekil 3).



Şekil 3 - Valide Sultan Dairesi taşıyıcı sistemi

Saha çalışmaları sonucunda çatı sistemine ait özgün durum, kullanılan malzemelerin cinsi, birleşim detayları ve birleştirme elemanlarının özellikleri ayrıntılı olarak belirlenmiştir. Çatı elemanlarında meşe ve çam türü ahşap malzeme kullanıldığı, birleştirme elemanı olarak ise çap ve uzunlukları kullanım yerine göre farklılık gösteren dökme çiviler kullanılmıştır. Çatıda kullanılan birleşimlerden detaylarına ait örnekler Şekil 4’te sunulmuştur. Tarihi ahşap çatı sisteminde tespit edilen en önemli yapısal sorunun, ahşap sisteme sızan yağmur suları olduğu belirlenmiştir. Ana taşıyıcı sistem elemanlarında ciddi bozulmalar olmamasına rağmen en çok bozulmaların yastık kirişlerinde ve merteklerde meydana gelmiştir. Bu bozulmaların temel nedeninin yalıtım yetersizliğinden kaynaklandığı belirlenmiştir.



Şekil 4 - Çatı sisteminde kullanılan birleşim örnekleri

Saha çalışmaları sırasında tarihi ahşap çatı sisteminde gözlemlediğimiz birleşim detaylarından yarım geçmeli geleneksel birleşim seçilerek deneysel ve analitik çalışmalarla davranışı incelenmiştir.

3. ANALİTİK MODEL

Tarihi ahşap yapıların dış yükler altında yapısal performansının değerlendirilmesinde birleşimlerin mekanik davranışı kilit noktadadır. Tarihi yapılarda metal plaka veya birleştirme elemanları (çivi, vida vb.) kullanılmadan önce ahşap elemanların geçmeli sistem ile kullanım esasına dayalı geleneksel birleşim tipleri bulunmaktadır. Bu geleneksel ahşap birleşimler dış kuvvete elemanları arasındaki gömme (embedment) mekanizmasıyla karşı koyarlar. Gömme kuvvetleri altında ahşap malzeme elastik sınırının çok üzerinde yük taşıyabilmektedir. Bu nedenle dayanımları ahşabın gömme özelliğine bağlı olan birleşimler de yüksek süneklik göstermektedirler [42].

Bu çalışmada yarım geçmeli birleşimlerin mekanik davranışı [42-44] tarafından yapılan çalışmalarda teorik modellere dayanan analitik model kullanılarak hesaplanmıştır. Bu çalışmalarda birleşimin mekanik davranışının analitik modeli kurulurken gömme teorisi kullanılmıştır. Bu modelde P temas yüzeylerinde oluşan gömme kuvveti, Hooke yasası kullanılarak hacim deformasyonu V ile Denklem 1'deki gibi ifade edilir.

$$P = \sigma A = \varepsilon EA = \frac{\delta}{L} EA = \frac{V}{L} E \quad (1)$$

Burada A temas (yüklenen) alanını, E liflere dik doğrultudaki basınç elastisite modülünü, δ gömme doğrultusundaki şekildeğiştirmeyi, L gömmenin olduğu eleman derinliğini ve $V = \delta \cdot A$ hacim deformasyonunu göstermektedir. Hacim deformasyonları tamamen birleşim geometrisine bağlıdır ve birleşimin dönme açısı θ 'ya bağlı olarak Denklem 2 ile tanımlanabilir.

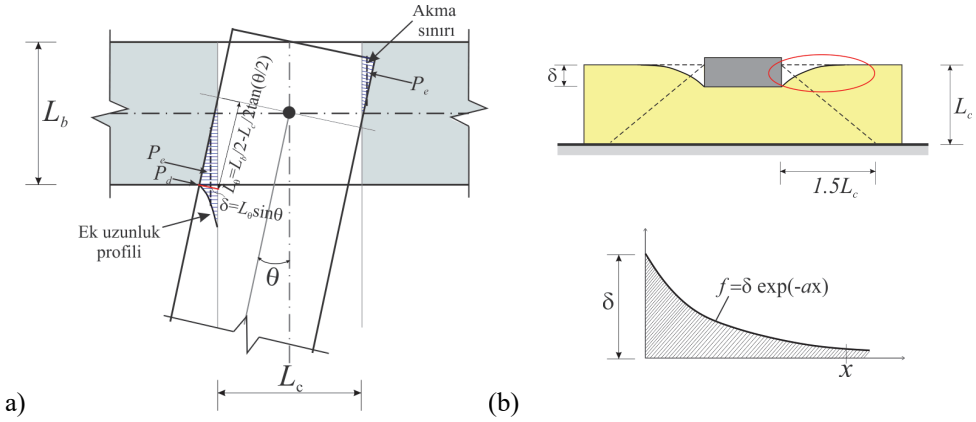
$$P(\theta) = \frac{\delta(\theta)}{L_c/2} E(\theta) A(\theta) = \frac{V(\theta)}{L_c/2} E(\theta) \quad (2)$$

Ahşap elemanlardaki şekildeğiştirme gömme yüklemesi nedeniyle elemanların doğrudan temas ettikleri yüzeyin ötesine geçer. Dolaylı olarak yüklenen bu alanın gömme kuvvetlerini artırıcı etkisi olduğu literatürde yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. Literatürdeki çalışmaların temeli oluşturan Inayama 1991 [45] çalışmasında ahşabın liflere dik basınç etkisi için önerdiği gömme teorisinde deformasyon profilini doğrudan yüklenen bir alan ve dolaylı olarak yüklenen alanı temsil eden kısmi (ek) uzunluk ile tanımlamıştır. Dolaylı yüklenen alanda bu yüzey deformasyonu Denklem 3'te verilen

$$f(x) = \delta \exp(-ax) \quad (3)$$

üstel fonksiyonu ile ifade edilmiştir. Burada a yerdeğiştirmenin sıfır olduğu kabul edilen ek uzunluk etkisinin bittiği noktayı gösteren ek uzunluk katsayısıdır. Malzeme özelliklerine

bağlı bu katsayı için literatürdeki deneysel ve sayısal çalışmalar farklı değerler önermiştir [42-46]. Ancak analitik çalışmalar için [45] çalışmasından elde edilen $1,5/L_c$ değerinin kullanılması tavsiye edilmektedir [47]. İnayama'nın [45] gömme teorisini kullanan [42-45; 48] çalışmaları, dolaylı olarak yüklenen bu ek gömme yüzeyinin birleşimin moment taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunduğunu göstermiştir. Şekil 5'te dönme açısı, θ etkisinde yarım geçmeli birleşimin sıkıştırılmış hacimlerinin geometrisi ve ek uzunluk etkisi şematik olarak gösterilmiştir. Düşey elemanın yatay elemana gömülmesiyle oluşan sıkıştırılmış hacimler taralı olarak verilmiştir. Doğrudan temas altında oluşan üçgen gömme yüzeyi ve üstel bir fonksiyon kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanan ek gömme yüzeyi Şekil 5'te verilmiştir.



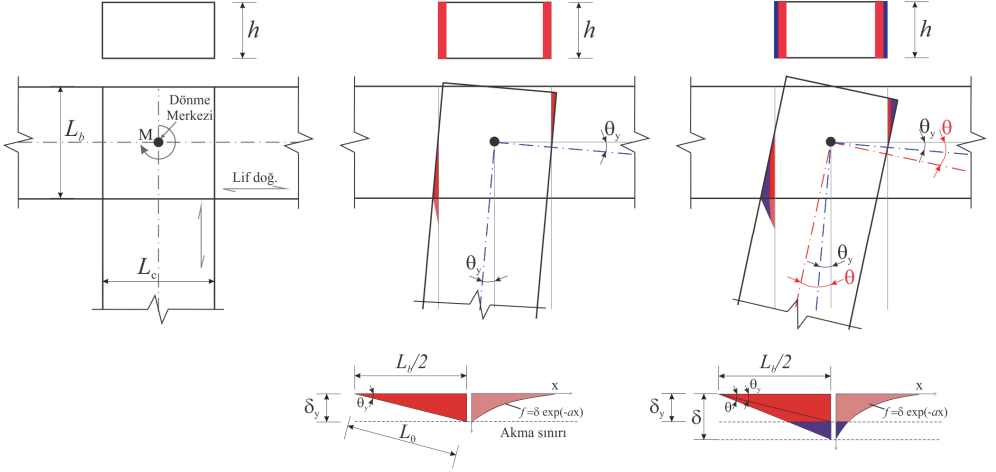
Şekil 5 - a) Birleşimde sıkıştırılmış hacimlerinin geometrisi, b) Ek uzunluk etkisi

Yarım geçmeli birleşimde oluşan iki sıkıştırılmış hacim aynı olmadıklarından dolayı ayrı ayrı ele alınmıştır (Şekil 6b). Temas yüzey alanının derinliği akma yerdeğiştirme, δ_y 'ye ulaştığında plastik deformasyon oluşmaya başlar. Hacim deformasyonu V 'nin belirlenmesinde elastik bölgede Hooke yasası geçerli olurken, δ_y 'nin aşılmasıyla azaltılmış rijitlik etkili olmaktadır. Bu nedenle plastik bölgedeki oluşan gömme kuvveti doğrusal olmayan davranışı tanımlayabilmek için bir azaltma katsayısıyla (R) çarpılarak hesaplanır. Azaltma katsayısı ahşabın gömme gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin plastik ve elastik bölgelerdeki eğimlerin oranı olarak tanımlanmaktadır [42; 49]. Yarım geçmeli birleşimlerde gömme etkisinden dolayı oluşan hacim deformasyonu doğrudan ve dolaylı yüklenen temas alanlarına ait geometrik ifadeler Şekil 6'da verilmiştir. Gömme yüzeylerindeki akma sonrası plastik deformasyonlar Şekil 6c'de mavi renk ile gösterilmiştir.

Analitik modelde düşey elemanın dönme nedeniyle oluşan hacim deformasyonu V_1 ve V_2 olarak iki kısım dikkate alınarak hesaplanmıştır. Doğrudan yüklenen temas alanında oluşan hacim deformasyonu, V_1 ve dolaylı yüklenen alanın hacim deformasyonu V_2 sırasıyla Denklem 4 ve 5 kullanılarak belirlenmiştir.

$$V_1 = \frac{1}{2} h \cdot l \cdot \delta \quad (4)$$

$$V_2 = h \cdot \int_0^a \delta \exp(-ax) \quad (5)$$



Şekil 6 - Yarım geçmeli birleşimde temas alanlarının hacim deformasyonları

Birleşimin dönme açısı, θ akma deformasyon açısı θ_y değerine ulaştığında plastik deformasyonların başladığı kabul edilir. Akma deformasyon açısı θ_y en büyük yerdeğiştirmenin $L \cdot \sin \theta$ akma yerdeğiştirmesine δ_y ulaştığı açı olarak tanımlanmıştır. Doğrudan ve dolaylı yüklenen bölgelerde oluşan plastik hacim deformasyonları Denklem 6 ve 7 ile belirlenmiştir.

$$V_1 = \frac{1}{2} h \cdot l_{p1} \cdot (\delta - \delta_y) \quad (6)$$

$$V_2 = h \cdot \int_0^{L_{plastic}} (\delta \exp(-ax) - \delta_y) \quad (7)$$

Yukarıdaki ifadeler doğrultusunda doğrudan ve dolaylı yüklenen temas yüzeyleri için elastik ve plastik hacim deformasyonları herhangi bir dönme açısı için hesaplanabilir. Hacim deformasyonları kullanılarak belirlenen gömme kuvveti (Denk. 2) dönme merkezine göre dikkate alınan moment koluyla çarpılarak birleşimin moment kapasitesi Denklem 8 ile belirlenir.

$$M(\theta) = \sum_i P_{i,el}(\theta) a_i(\theta) + R \sum_i P_{i,pl}(\theta) a_i(\theta) \quad (8)$$

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tarihi ahşap yapı ve çatıların yapısal davranışlarında önemli bir rol oynayan birleşimlerin daha iyi anlaşılması için bir dizi deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla saha çalışmalarının yapıldığı Beylerbeyi Sarayı tarihi ahşap çatısında kullanılan geleneksel birleşimler incelenmiş ve yarım geçmeli “T” tipi birleşim seçilmiştir. Deneysel çalışmalarla bu tip birleşimlerin davranışının anlaşılması, taşıma kapasitelerinin belirlenmesi, hasar oluşum yerleri ve deformasyon bölgelerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla 4 adet test numunesi monotonik ve çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan test numunelerine ait özellikler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1 - Test numunelerine ait özellikler

Deney No	Birleşim Tipi	Malzeme	Boyut	Yüklemeye
N01	Yarım Geçmeli	Tutkallı	Masif	Monotonik
N02		Tutkallı		Monotonik
N03		Tutkalsız	İki parçalı	Çevrimsel
N04		Tutkallı	(Lamine)	Çevrimsel

4.1. Deney Numunesi

Geleneksel birleşimlerin davranışını deneysel olarak değerlendirmek amacıyla kullanılacak test numunelerini tasarım ve hazırlama süreci çalışmanın en kritik aşamalarından biri olmuştur. Deneylerde kullanılacak test numunelerinin tarihi ahşap yapılarda yaygın şekilde kullanılan geleneksel birleşim detaylarını temsil etmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, ilk olarak saha çalışmalarının yürütüldüğü tarihi ahşap çatı sisteminde gözlemlenen elemanların geometrik özellikleri dikkate alınmış, ardından konuya ilişkin literatürdeki benzer çalışmalar [16;30] detaylı olarak incelenmiş ve test numunelerinin tasarımında tarihi yapılarla uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Beylerbeyi Sarayı Harem Bölgesi çatısında bulunan elemanların boyutları ve malzeme özellikleri [50] çalışmasında ayrıntılı olarak verilmiştir. Bununla beraber deneylerin gerçekleştirildiği Yük ve Deplasman hücresinin teknik kapasite değerleri, test numune boyutlarının ve geometrisinin belirlenmesinde temel kısıtlayıcı unsur olmuştur (Tablo 3). Bu doğrultuda test numunelerinin boyutları, deney düzeneğinin kapasite sınırları içinde kalacak en büyük değerler olarak seçilmiştir.

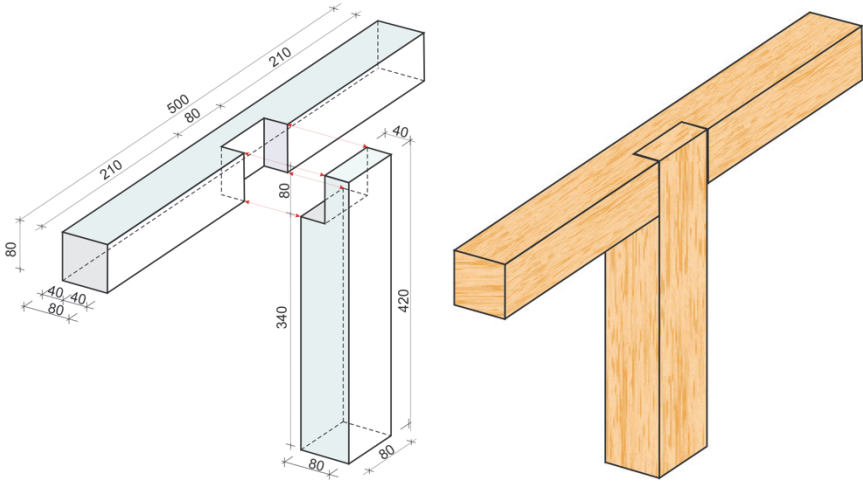
Deneysel çalışmalarda kullanılan yarım geçmeli birleşim, elde edilecek birleşimin kalınlığı birleşen elemanlardan en kalınına eşit olacak şekilde ahşap elemanların her birinden malzeme çıkartılmasıyla yapılır. Genellikle, yarım geçmeli birleşimlerde birleşen elemanlar aynı kalınlıktadır ve her bir elemanın kalınlığının yarısı oranında malzeme çıkarılarak birleşim oluşturulur (Şekil 7).

Deneylerde kullanılmak üzere geometrik özellikleri birbiriyle tamamen aynı dört adet test numunesi üretilmiştir. Test numunelerinin boyutları Yük ve Deplasman Hücresinin uygulayabileceği maksimum kuvvet değerleri ve etkiye doğrultuları dikkate alınarak [36] yönetmeliğince belirlenmiştir. Test numunelerinde kullanılan düşey ve yatay ahşap eleman uzunlukları sırasıyla 420 mm ve 500 mm dir. İlk grup (N01 ve N02) test numuneleri 80 x 80

mm kare kesitli masif ahşaptan, ikinci grup (N03 ve N04) test numuneleri 40 x 80 mm'lik iki masif ahşap elemanın yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Ahşap elemanlar yarım geçmeli olarak marangozluk yaklaşımıyla T şeklinde üst üste birleştirilmiştir. İlk grup test numuneleri monotonik yükleme altında, ikinci grup test numuneleri ise çevrimsel yükleme altında deneyleri yapılmıştır. Şekil 8'de deney numunelerinin geometrik özellikleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 7 - Yarım geçmeli "T" birleşim



Şekil 8 - Deney numunesinin geometrik özellikleri

Tutkal ile yapıştırılan numunelerde, piyasada deniz tutkalı olarak da adlandırılan, tek bileşenli, poliüretan tutkalı (4,4'-methylenediphenyl diisocyanate / metilen difenil diizosiyanat) kullanılmıştır. Kullanılan tutkalın suya ve çözücülere karşı yüksek direnç göstermesi (D4 sınıfı), iyi yapışma direncine sahip olması, kolaylıkla uygulanabilmesi ve akışkan yapısı tercih sebebi olmuştur [51]. Uygulama yapılacak ahşap yüzey planyadan ve kalibre işleminden geçirilerek yüzey düz ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Sonrasında deniz tutkalı yüzeye uygulanmış ve mengene aparatları ile sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Tutkalın kuruması için 2-4 saat aralığında beklenmiştir.

4.2. Malzeme Özellikleri

Geleneksel ahşap birleşimlerin davranışının deneysel olarak değerlendirilmesi ve elde edilen bulguların güvenilirliğinin sağlanması için, birleşimlerde kullanılan ahşap malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Saha çalışmalarında incelenen tarihi ahşap çatı sisteminde genellikle meşe ve çam cinsi ahşapların kullanıldığı tespit edilmiş ve bu elemanlarla benzer malzeme özelliklerini temsil edebilmesi amacıyla test numunelerinde Sarıçam türü ahşap kullanılmıştır. Ancak, malzeme özellikleri test numunelerini oluşturan ahşaplara özgü olduğundan, birleşim davranışının güvenilir bir şekilde belirlenebilmesi için gereken mekanik değerler deneysel yöntemlerle elde edilmiştir.

Ahşap elemanların malzeme deneyleri Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Kültür Varlıkları ve Sanat Eserleri Malzeme Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda yürütülmüştür. Malzeme deneylerinde kullanılan test numune boyutları TS EN 408:2010+A1 [52] standardına uygun olarak hazırlanmış ve her bir deneyde üç test numunesi kullanılmıştır. Ahşap malzemenin eğilme dayanımı Zwick/Roell Z330 universal test cihazı kullanılarak 4 noktalı eğilme deneyleriyle belirlenmiştir. Bu deneyde ahşap test numunesine uygulanan kuvvet desteklere simetrik olarak yerleştirilen çeneler yardımıyla verilmiştir. Deneylerde 20x20mm kesitli 380 mm uzunluğunda test numunesi kullanılmış ve destekler arasındaki açıklık 340 mm olarak alınmıştır. Destek noktaları ile yükün uygulandığı çeneler arasındaki mesafe 60 mm olup, yük iki noktadan uygulanmıştır. Ahşap malzemenin liflere paralel yöndeki çekme testi Zwick/Roell Z330 universal test cihazının kafalarının test numunelerine uygun biçimde ayarlanmasıyla iki uçtan çekme kuvveti uygulanarak ölçülmüştür. Çekme testlerinde kesiti 15x50 mm uzunluğu 450 mm olan beş adet test numunesi ilgili yönetmeliğe uygun şekilde hazırlanmıştır. Ancak iki numunede gözlemlenen budaklar nedeniyle bu numuneler dikkate alınmamıştır. Ahşap malzemenin liflere paralel ve liflere dik doğrultudaki basınç dayanımları da TS EN 408:2010+A1 [52] standartlarına uygun belirlenmiştir. Liflere paralel doğrultudaki basınç deneylerinde 40x40mm enkesitinde 240mm uzunluğunda, liflere dik doğrultudaki basınç deneylerinde ise 45x70mm enkesitinde 90mm uzunluğunda üçer adet test numunesi kullanılmıştır.

Elde edilen malzeme mekanik özellikleri her deney serisi için üç numunenin ortalama değerleri ve standart sapmaları cinsinden Tablo 2'de sunulmuştur. Ayrıca bu çalışmada analiz edilen birleşim davranışında liflere dik doğrultudaki basınç dayanımının belirleyici rol oynaması nedeniyle, ilgili basınç deneylerine ait fotoğraflar ve test numunelerde meydana gelen hasarlar Şekil 9'da verilmiştir.

Tablo 2 - Ahşap malzemenin mekanik özellikleri

Eğilme			Basınç		Çekme	
E_b	f_m	$E_{c,0}$	$f_{c,0}$	$f_{c,90}$	E_t	f_t
Ort.	Ort.	Ort.	Ort.	Ort.	Ort.	Ort.
(S.S)	(S.S)	(S.S)	(S.S)	(S.S)	(S.S)	(S.S)
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
6493,3	74,8	6922,5	60,3	7,18	5940	27,95
(1038)	(9,07)	(974)	(5,45)	(0,27)	(1030)	(18,9)



Şekil 9 - Liflere dik doğrultudaki basınç deneyi

4.3. Deney Düzeneği

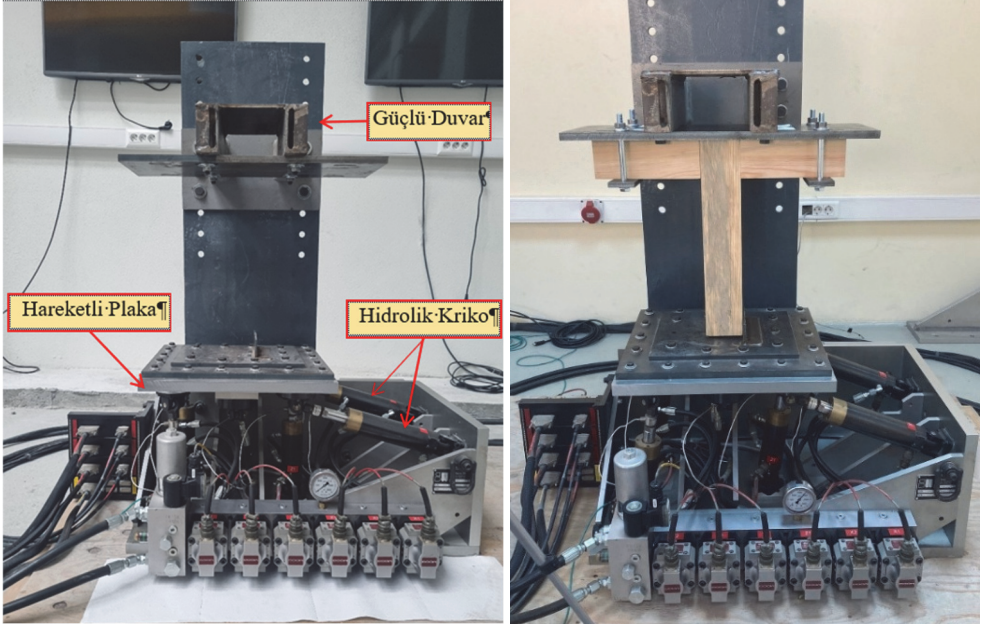
Deneysel çalışmalar Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Yapı Mekaniği ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan altı serbestlik dereceli yük ve deplasman hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, tamamı çelik profiller ve levhalardan oluşan, bulonlarla yük ve deplasman hücresine sabitlenen güçlü duvar ünitesi sayesinde test numunesi ile sistem arasında sabit ve rijit bir bağlantı sağlanmıştır. Yük ve deplasman hücresi deney numunesine üç eksen doğrultusunda öteleme/kuvvet ve üç eksen etrafında dönme/moment olarak aldığı komutları uygulayabilmektedir. Deneyler deplasman ve kuvvet kontrollü olarak yapılabilmektedir. Deneylerde kullanılan yük ve deplasman hücresine ait fotoğraf Şekil 10'da, teknik kapasite değerleri ise Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3 - Yük ve deplasman hücresinin teknik kapasitesi

	<i>X doğrultusu</i>	<i>Y doğrultusu</i>	<i>Z doğrultusu</i>
<i>Yerdeğiştirme</i>	± 50 mm	± 25 mm	± 25mm
<i>Dönme</i>	± 11.6°	± 9.4°	± 20.4°
<i>Kuvvet</i>	18.6/31kN (B/Ç)	9.3/15.6kN (B/Ç)	27.9/46.8kN (B/Ç)
<i>Moment</i>	2.2 kNm	2.6 kNm	2.2 kNm

Deneyler, düşey ahşap elemanın serbest ucundan yük ve deplasman hücresinin hareketli plakası vasıtasıyla yatay deplasman uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla hareketli plaka üzerine yatay yükü verebilmek için çelik levha ve korniyerden oluşan bir düzenek oluşturulmuştur. Ayrıca yarım geçmeli T birleşimin yatay elemanı rijit davranış göstermesi amacıyla deney düzeneğinde güçlü duvar görevi gören çelik konstrüksiyona sabitlenmiştir. Deney numunesini bağlamak için üretilen çelik levhalar Şekil 10'daki deney düzeneği

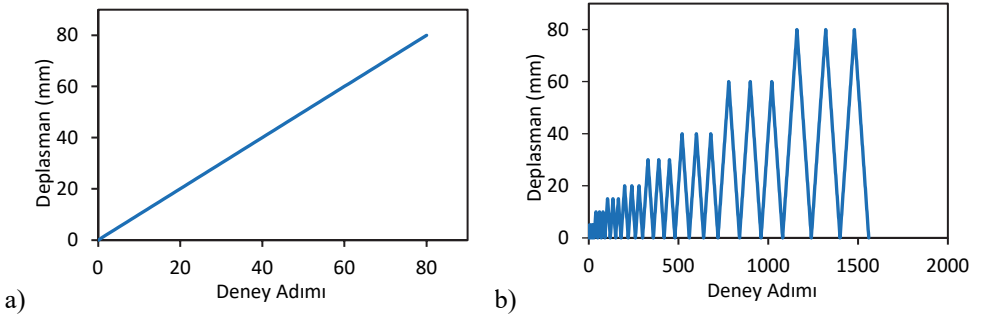
üzerinde görülmektedir. Yatay ahşap eleman M12 bulonları yardımıyla çelik plakaya tamamen tutulu olacak şekilde sabitlenmiştir. Ahşap test numunelerini deney düzeneğine rijit ve sabit olarak bağlayabilmek için üretilen bağlantı detay levhalarına ait detaylı bilgi [53] çalışmasında yer almaktadır.



Şekil 10 - Yük ve deplasman hücresi fotoğrafı

4.4. Deney Yöntemi

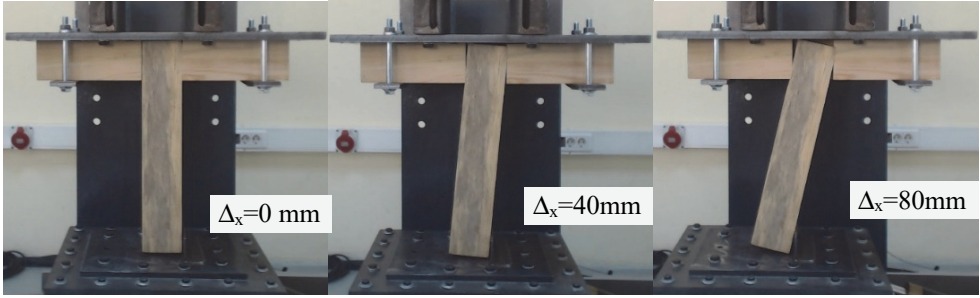
Tarihi ahşap çatı birleşimlerinde kullanılan geleneksel bağlantı tiplerinden geçmeli birleşimin davranışını tanımlamak için hem monotonik hem de çevrimsel deneyler gerçekleştirilmiştir. Tek yönde artan monotonik deneylerde test numunesi düşey elemanın serbest ucu 80 mm'ye kadar 1mm deney adım aralığı ile itilmiştir. Çevrimsel deneyler için



Şekil 11 - Yükleme protokolleri a) Monotonik yükleme b) Çevrimsel yükleme

EN12512:2001 [54] yönetmeliğinde verilen yükleme profili kullanılmış ve deplasman kontrollü tek doğrultulu çevrimsel yükleme gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan monotonik ve çevrimsel yükleme profilleri Şekil 11’de gösterilmiştir.

N01 ve N02 test numune deneyleri monotonik yükleme altında yapılmıştır. Bu deneylerde düşey elemanın serbest ucundan yük ve deplasman hücresinin hareketli yüzeyine yatay eksende ötelemesi, Δ_x olan 1 birimlik deplasman verilmiş ve oluşan kuvvet değerleri her bir hidrolik krikonun ucunda bulunan yük ölçerler yardımıyla hesaplanmıştır. Bu şekilde N01 ve N02 test numuneleri yatay eksende 1 mm deplasman adımıyla 80 mm’ye kadar itilmiştir. Şekil 12’de N01 test numunesine ait $\Delta_x=0$, $\Delta_x=40$ ve $\Delta_x=80$ mm deney adımları gösterilmiştir.



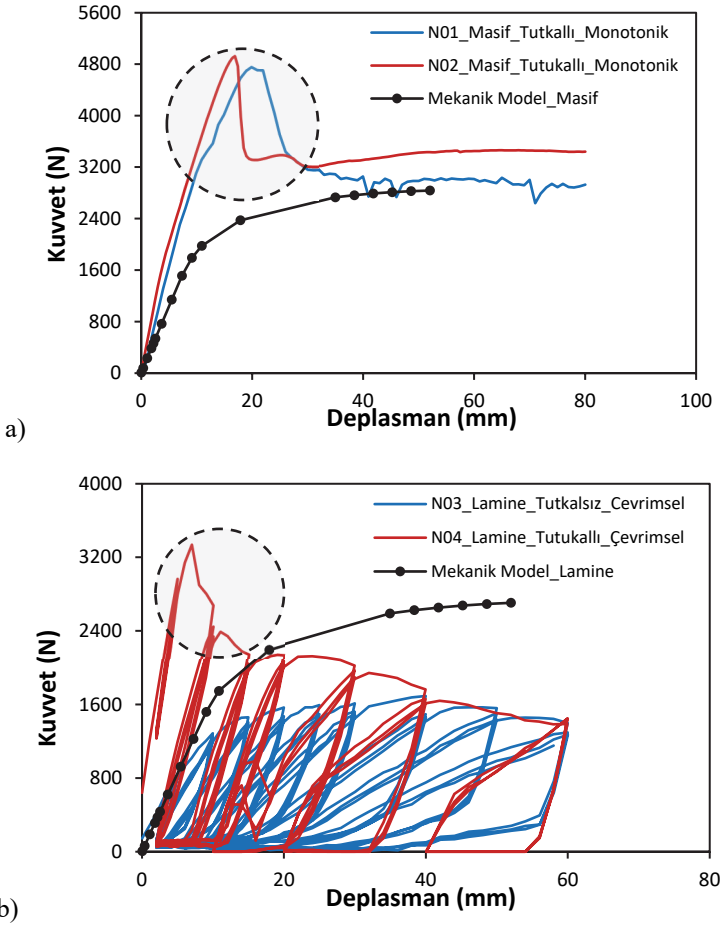
Şekil 12 - $\Delta_x=0$ / $\Delta_x=40$ / $\Delta_x=80$ mm deney adım görselleri

İkinci grup N03 ve N04 test numunelerinin çevrimsel yükleme altında deneyleri deplasman kontrollü olarak yürütülmüştür. Her bir deplasman aralığında üç çevrim döngüsü kullanılmış ve her bir çevrimde yük sıfırlanacak şekilde döngüler oluşturulmuştur. Deneyler sonucunda geçmeli geleneksel ahşap birleşimlerin kuvvet-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

4.5. Deney Sonuçları

Tarihi ahşap yapı ve çatılarda kullanılan geleneksel yarım geçmeli birleşim davranışının belirlenmesi için gerçekleştirilen monotonik ve çevrimsel deneylerin sonuçları yatay yük taşıma kapasitesi, deformasyon ve hasar mekanizmaları açısından değerlendirilmiştir. Monotonik yükleme altında deneyleri yapılan N01-N02 masif test numunelerine ait kuvvet deplasman eğrileri Şekil 13a’da, çevrimsel yükleme altında deneyleri yapılan N03-N04 iki parçalı masif (lamine) test numunelerinin sonuçları ise Şekil 13b’de verilmiştir.

Yarım geçmeli birleşime ait teorik kuvvet-deplasman değerleri, Bölüm 3’te açıklanan gömme teorisine dayalı mekanik model kullanılarak hesaplanmış ve Şekil 13a ve 13b üzerine çizdirilmiştir. Mekanik modelle birleşimde oluşan moment hesaplanırken ahşap malzemenin liflere dik doğrultudaki ortalama basınç dayanımı $f_{c,90}$ için malzeme deneylerinden elde edilen 7,18 MPa değeri kullanılmıştır. Liflere dik doğrultudaki ortalama elastisite modülü E_{90} değeri için ise, masif ve iki parçalı masif ahşap (lamine) malzeme için sırasıyla [36] numaralı yönetmelikte verilen 370 MPa ve 300 MPa dikkate alınmıştır. Bu değerlere göre Hooke yasası kullanılarak masif ve lamine numunelere ait akma dönmeleri θ_y sırasıyla 0,01946 rad ve 0,0240 rad olarak hesaplanmıştır.



Şekil 13 - Yarım geçmeli birleşim a) Monotonik b) Çevrimsel deney sonuçları

Literatürde ek uzunluk katsayısı a için $1,5/L_c - 5,5/L_c$ aralığında değerler önerilmiş, bu çalışmada $4/L_c$ kullanılmıştır. Ayrıca ahşap malzemenin liflere dik basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin plastik ve elastik bölgelerindeki eğimlerin oranı olarak tanımlanan R azalma katsayısı, 0,05 kabul edilmiştir.

Mekanik modelde kuvvet-deplasman eğrisi elde edilirken, birleşimin dönme açısı 0,001 rad ile 0,150 rad aralığında 18 farklı adımda artırılmıştır. Her bir dönme adımı için birleşimde oluşan moment değeri aşağıdaki hesaplama adımları izlenerek belirlenmiştir.

- İlk olarak, ilgili dönme değeri için birleşime ait Şekil 6'da gösterilen geometrik boyutlar hesaplanmıştır.
- Daha sonra, elastik hacim deformasyonları Denklem 4 ve 5, plastik hacim deformasyonları ise Denklem 6 ve 7 aracılığıyla belirlenmiştir.

- Hacim deformasyonlarına bağlı olarak temas yüzeylerinde oluşan gömme kuvvetleri Denklem 2 yardımıyla hesaplanmış ve bu kuvvetler Denklem 8'e yerleştirilerek birleşimde oluşan moment değeri belirlenmiştir.
- Son adımda, 340mm olan moment kolu kullanılarak, momentten yatay kuvvete geçilmiş ve 340mm uzunluğundaki ahşap elemanın elastik yatay deplasmanları da hesaba katılarak, yatay deplasmanlar belirlenmiştir.

Bu hesaplama yöntemine göre N01-N02 nolu masif ahşap yarım geçmeli birleşimlere ait teorik moment değerleri Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4 - N01-N02 nolu yarım geçmeli birleşimlere ait teorik moment değerleri

θ rad	L_θ mm	l_1 mm	δ mm	l_{p1} mm	V_{p1} mm ³	V_{1e} mm ³	V_{2p} mm ³	V_{2e} mm ³	M Nmm	F N	$Depl.$ mm
0,0001	40,0	40,0	0,0	0,0	0	3	0	3	2638	8	0,0
0,0010	40,0	40,0	0,0	0,0	0	32	0	29	26344	77	0,4
0,0030	39,9	39,9	0,1	0,0	0	96	0	86	78827	232	1,1
0,0050	39,9	39,9	0,2	0,0	0	159	0	143	131035	385	1,8
0,0060	39,9	39,9	0,2	0,0	0	191	0	171	157036	462	2,2
0,0070	39,9	39,9	0,3	0,0	0	222	0	200	182968	538	2,6
0,0100	39,8	39,8	0,4	0,0	0	317	0	285	260349	766	3,7
0,0150	39,7	39,7	0,6	0,0	0	473	0	426	387934	1141	5,5
0,0200	39,6	39,6	0,8	0,7	0	627	0	567	513623	1511	7,4
0,0250	39,5	39,5	1,0	8,4	35	745	19	688	608721	1790	9,2
0,0300	39,4	39,4	1,2	13,4	108	822	63	783	672002	1976	10,9
0,0500	39,0	39,0	1,9	23,4	548	971	365	1030	807176	2374	17,9
0,1000	38,0	37,8	3,8	30,1	1812	1056	1426	1289	928263	2730	35,0
0,1100	37,8	37,6	4,1	30,5	2058	1060	1655	1315	939585	2763	38,4
0,1200	37,6	37,3	4,5	30,9	2298	1062	1885	1336	948545	2790	41,8
0,1300	37,4	37,1	4,8	31,1	2533	1062	2117	1353	955515	2810	45,2
0,1400	37,2	36,8	5,2	31,3	2763	1061	2348	1367	960777	2826	48,6
0,1500	37,0	36,6	5,5	31,4	2986	1059	2579	1377	964552	2837	52,0

Şekil 13a ve 13b'deki grafiklerde görülen birleşimin yatay yük taşıma kapasitesi, ahşap malzemeye, birleşim bölgesinin tutkallı olup olmamasına ve yükleme profillerine göre değerlendirilmiştir.

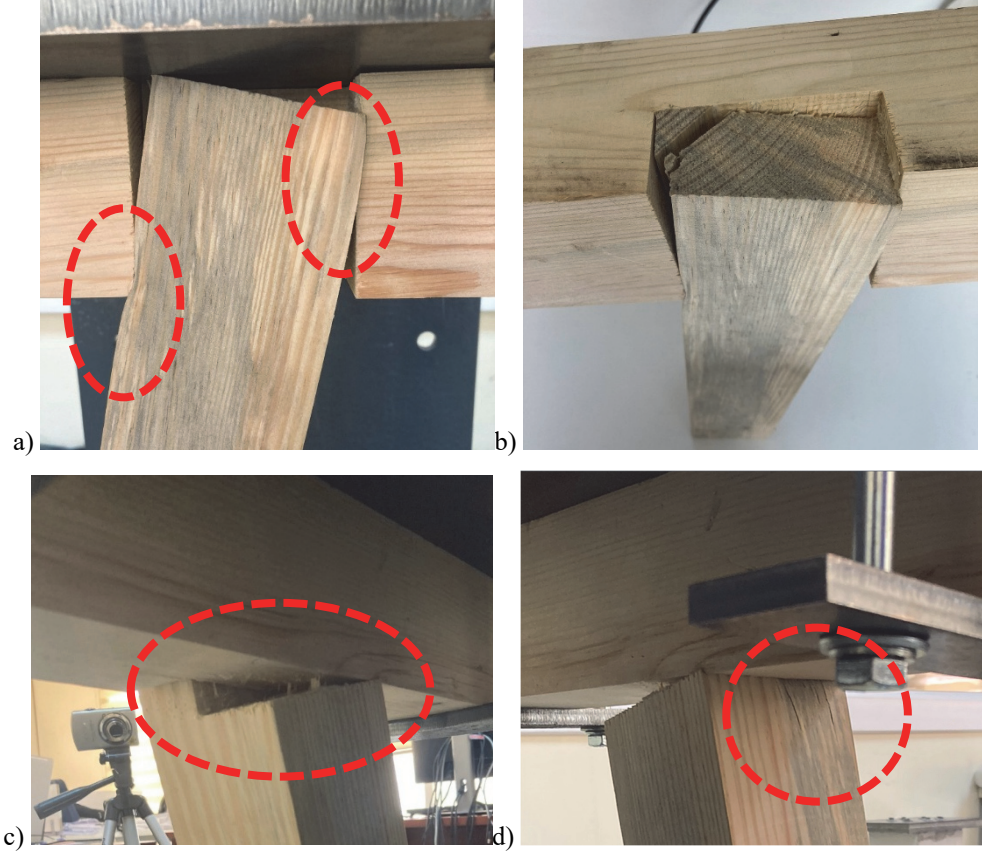
- Deney sonuçları yarım geçmeli ahşap birleşimin yatay yük taşıma kapasitesi ve genel davranışı açısından incelendiğinde masif ahşap malzemeli N01-N02 test numunelerinin benzer davranış sergilediği gözlemlenmiştir. N01-N02 numunelerini monotonik yükleme altındaki deney sonuçlarında başlangıçta her bir yük adımına karşılık gelen

davranış lineer ve elastik olmuştur. En büyük yatay yük taşıma kapasitesi N01 numunesinde 19,9 mm deplasmanda 4747,7 N ve N02 numunesinde 16,9 mm deplasmanda 4919,5 N elde edilmiştir. Test numunelerinde bu değerlere ulaşıldığında birleşimin yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş gözlemlenmiştir. Sonrasında birleşim ilave yük almaya dahi şekildeğiştirme yapmaya devam etmiştir. Birleşimin toplam taşıma kapasitesinin %40'ını ani olarak kaybetse de kalan %60 kapasitesini akma yerdeğiştirmesinin 4 katı olan 80mm ye kadar korumuştur. Bu sonuçlar neticesinde birleşimin tahmin edilenin üzerinde süneklik gösterdiği gözlemlenmiştir.

- N01-N02 masif test numunelerinin mekanik modelinden elde edilen sonuçlarıyla, deney sonuçları başlangıç rijitliği ve ileri deplasman bölgelerindeki yük taşıma kapasitesi yeterli yakınsaklıkta elde edilmiştir. Ancak ilk akma bölgesinde (daire içi) farklılar mevcuttur. Deney sonuçlarında gözlemlenen bu davranışın birleşimin geçme bölgesinde kullanılan tutkaldan kaynaklandığı düşünülmektedir. Mekanik model sadece gömme temas yüzeylerinin etkisini dikkate alınmasıyla kurulduğu için analitik sonuçlarda tutkal etkisi gözlemlenmemiştir. Deney sonuçlarında geçme bölgesindeki tutkalın çekme dayanımına ulaşana kadar birleşimin yatay yük taşıma kapasitesini arttırdığı ve bu değere ulaştıktan sonra ani bir düşüşle mekanik modele yakınsadığı görülmüştür.
- Buna karşın iki parçalı ahşap malzemeli (lamine) N03-N04 test numunelerinin taşıma kapasitelerinde ve genel davranışlarında farklılaşma gözlemlenmiştir. N03-N04 numuneleri çevrimsel yüklem altında deney sonuçları incelendiğinde en büyük yatay yük taşıma kapasitesi N03 test numunesinde 40 mm deplasmanda 1693,4 N ve N04 test numunesi 6,96mm deplasmanda 3341,1 N elde edilmiştir. Bu numuneler arasındaki tek fark geçme bölgesinin tutkallı olup olmamasıdır. Birleşimin geçme bölgesinin tutkallı olması yatay yük taşıma kapasitesini etkilemiştir. N03-N04 numunelerinin deney sonuçları mekanik model sonuçlarıyla karşılaştırıldığında taşıma kapasitelerinin mekanik modelin altında kaldığı görülmüştür. Bu durumun deneylerin çevrimsel yüklem altında yapılmasından ve ahşap elemanların lamine olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu hususun yapılacak ilave çalışmalar ile araştırılmasında fayda vardır.
- Geçme bölgesi tutkallı iki parça masif ahşap (lamine) N04 numunesinin davranışı geçme bölgesi tutkalsız N03 numunesinden farklılaşmış olsa da (Şekil13b) geçme bölgesi tutkallı masif N01-N02 numunelerine benzer davranış göstermiştir. Geçme numunesi, tutkalı masif N01-N02 numunelerinin sırasıyla %70 ve %68'i kadar yatay yük taşımıştır. N04 numunesinin de en büyük yatay yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra taşıma kapasitesinde %40 azalma olsa da deney sonuna kadar kalan kapasitesini korumuştur.

Yapılan dört deney ve analitik model sonuçlarının karşılaştırılmasında en büyük farklılığın, tutkallı numunelerin başlangıç rijitliğinde ve akma kuvvetlerinde ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu farklılığın temel nedeninin analitik modelde tutkal etkilerinin modellenmemesi olduğu düşünülmektedir. Tutkal kullanımıyla birleşim davranışında meydana gelen üç önemli değişiklik; i) başlangıç rijitliğinin artması, ii) ilk akma kuvvetinin yaklaşık iki kat artması, iii) akma sonrasında taşıma kapasitesinde görülen ilave artışın gevrek şekilde kaybedilmesi. Bu gözlemler ışığında, özellikle geleneksel geçmeli ahşap birleşimlerde tutkal kullanımının tasarım aşamasında nasıl dikkate alınması gerektiği

konusunda ilave çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamda tutkallı yüzeylerin analitik modelde modelleme yaklaşımlarının ve tutkalın birleşim elemanlarında liflere dik doğrultuda oluşturduğu çekme gerilmelerinin etkilerinin araştırılması yer almaktadır. Ayrıca tutkallı birleşimlerde taşıma kapasitesindeki ilave artışın çok gevrek bir biçimde kaybedildiği göz önüne alınmalıdır. Bunun yanında tasarım aşamasında tutkalın etkileri göz önüne alınmaz ve yerinde tutkallı bir birleşim uygulanırsa, akma kapasitesinde oluşabilecek ciddi artışın yapının diğer taşıyıcı elemanlarında herhangi bir güvenlik sorunu yaratmayacağı gösterilmesi önemlidir.



Şekil 14 - Deney numunelerinde meydana gelen hasarlar ve yerleri

Deneyler tamamlandıktan sonra test numuneleri üzerinde meydana gelen deformasyonlar, yerleri ve hasar oluşumları detaylı olarak incelenmiştir. Tüm test numunelerinde deney esnasında ve sonrasında benzer hasar oluşumları gözlemlenmiştir. Birleşim bölgesindeki momentin etkisiyle düşey ahşap eleman geçmenin içinde dönmüş ve Şekil 14a'da kırmızı daireler içinde görülen kesitlerde temas yüzeyleri oluşmuştur. Geçmeli birleşimlerin temas eden tüm yüzeylerinde ezilme/gömme hasarı meydana gelmiştir. Deney sonuçları yarım geçmeli geleneksel birleşim davranışının ezilme/gömme özelliklerine bağlı olduğunu açıkça

göstermiştir. Şekil 14b ve 14c’de birleşim bölgesindeki dönme etkisiyle düşey elemanda meydana gelen hasarlar görülmektedir. Şekil 14d’de ise Bölüm 3’te verilen analitik modelde açıklanan gömme etkisi nedeniyle dolaylı olarak yüklenen temas yüzeyinde oluşan hasarlar görülmektedir. Bu hasarlar düşey elemanın liflere paralel doğrultusunda oluşmuştur.

5. SONUÇ

Tarihi ahşap yapılar ülkemizin ve dünyanın birçok bölgesinin kültürel mirasını oluşturan önemli öğelerdir. Bu çalışmada tarihi ahşap yapıların ve çatı sistemlerinin davranışında belirleyici rol oynayan geleneksel birleşimlerin mekanik özellikleri analitik ve deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında İstanbul’un önemli tarihi yapılarından Beylerbeyi Sarayı’nın ahşap çatı sistemi üzerinde saha incelemeleri yapılmış, çatı sisteminde kullanılan farklı geleneksel birleşim tipleri yerinde tespit edilerek detaylı olarak incelenmiş ve bu birleşimlerden yarım geçmeli birleşim tipi davranışını değerlendirmek üzere seçilmiştir. İncelenen yarım geçmeli geleneksel birleşim tipi, yalnızca çatı sistemlerinde değil, aynı zamanda duvar sistemlerinde, özellikle düşey taşıyıcı elemanların ve çapraz kuşakların birleşim bölgelerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle analitik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların söz konusu birleşimlerin yer aldığı tarihi ahşap yapıların davranışının anlaşılmasına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışma analitik ve deneysel olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür. İlk aşamada yarım geçmeli geleneksel birleşimlerin gömme teorisine dayalı analitik modeli kurularak teorik moment kapasiteleri elde edilmiştir. Analitik modelde dolaylı olarak yüklenen ek uzunluğun deformasyonu üstel bir fonksiyonla tanımlanmış ve böylece birleşim bölgesindeki yüzey deformasyonu literatürdeki benzer modellere kıyasla daha gerçekçi biçimde yansıtmıştır. Kullanılan model belirli birleşim geometrileri ve malzeme özellikleri için yeterli yakınsaklıkta sonuçlar vermiş olsa da farklı geleneksel birleşim tiplerini kapsayan kapsamlı bir analitik model geliştirilebilmek amacıyla farklı geometri ve malzeme özelliklerini içeren ilave deneysel ve parametrik çalışmalara ihtiyaç vardır.

Çalışmanın ikinci aşamasında geometrik özellikleri tamamen aynı olan dört adet test numunesi üzerinde monotonik ve çevrimsel yükleme deneyleri yapılmış ve kuvvet-deplasman eğrileri bulunmuştur. Deneysel sonuçlar birleşimin genel davranışı ve yatay yük taşıma kapasitesi açısından değerlendirildiğinde, masif ahşap N01-N02 test numunelerinin benzer davranış sergilemesine rağmen iki parça masif ahşap (lamine) N03-N04 test numunelerinin ise farklılaştığı gözlemlenmiştir. Bu farklılaşmanın ahşap elemanların masif/lamine olmasından ve birleşimin geçme bölgesinin tutkallı/tutkalsız olmasından kaynaklandığı belirlenmiştir. Geçme bölgesi tutkallı olan N01-N02 ve N04 numunelerinde doğrusal sınır aşıldıktan sonra dayanımda ve rijitlikte ani düşüş gözlemlenmiştir. Birleşimler maksimum yatay taşıma kapasitesinin yaklaşık %40’ını hızlı olarak kaybetmiş ancak kalan %60’lık kapasiteyi yüksek süneklilikle korumuştur. Bu durumun yarım geçmeli birleşimde maksimum yük aşıldıktan sonra devreye giren basınç ezilmesine çalışan gömme yüzeylerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Analitik model ile dört deney sonucunun karşılaştırılması, özellikle tutkallı numunelerde başlangıç rijitliği ve akma kuvvetlerinde belirgin farklar olduğunu göstermiştir. Bu farkın temel nedeni, analitik modelde tutkal etkilerinin dikkate alınmamış olmasıdır. Ayrıca deneylerin çevrimsel yükleme altında gerçekleştirilmesi ve lamine ahşap elemanların kullanımı da sonuçları etkilemiştir. Tarihi

ahşap yapılarda kullanılan geleneksel birleşim davranışlarının daha gerçekçi anlaşılması için özgün malzeme ve detaylar kullanılarak ilave deneysel çalışmaların yapılması önerilmektedir.

Ahşap, malzeme olarak esnek ancak gevrek bir davranışa gösterir. Bu nedenle özellikle tekrarlı yükler altında, ahşap birleşimlerin sünek bir davranış sergileyecek biçimde tasarlanması gerekmektedir. Bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar özellikle tutkalın etkisi çıkarılınca gömmeye dayalı çalışan yarım geçmeli birleşimlerin sünek davranış sergilediğini ortaya koymuştur. Bu bulgunun ilave deneylerle desteklenmesi gerekmele birlikte, sünek davranışın tarihi ahşap sistemlerin enerji sönümleme kapasitesini artırdığı için belirgin bir avantaj sağladığı düşünülmektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda, yarım geçmeli geleneksel ahşap birleşimlerde oluşan hasarın büyük ölçüde ezilme/gömmeye etkisinden kaynaklandığı ve birleşimin dönmesine bağlı olarak özellikle düşey elemanlarda liflere paralel doğrultuda geliştiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle birleşimlerin bakım ve onarım aşamalarında ahşabın doğal deformasyon kabiliyetini en az düzeyde etkileyecek bölgesel güçlendirme yöntemlerinin (örn. lokal yük aktarım bölgelerinin takviyesi) tercih edilmesi önerilmektedir. Güçlendirmede çelik plakalar, vidalar ve karbon veya cam elyaf takviyeli polimer (CFRP/GFRP) levhalar gibi malzemelerin birleşim dayanımını arttırdığı bilinmektedir. Ancak bu müdahaleler tarihi yapıların ve birleşimlerin özgünlüğünü bozmayacak ve mümkünse geri dönüştürülebilir nitelikte planlanmalıdır. Bununla birlikte ahşap elemanlardaki malzeme bozunma etkileri bu çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır. Tarihi ahşap yapıların korunması ve onarımına yönelik daha gerçekçi stratejilerin geliştirmesi amacıyla gelecekte yapılacak çalışmalarda bozunma etkilerinin de dikkate alındığı kapsamlı deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Teşekkür

Bu yayın FSMVU BAP birimi tarafından desteklenen 2023B1Ç01D nolu “Beylerbeyi Sarayı Ahşap Çatı Sistemi Birleşim Davranışının Değerlendirilmesi” projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalardan hazırlanmıştır. Yazarlar çalışma süresince gerekli izinler için ve verdikleri destekten dolayı Milli Saraylar İdaresi Başkanlığına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] ICOMOS Principles For The Preservation Of Historic Timber Structures, 12th General Assembly in Mexico, 1999.
- [2] Ökten, M.S., 19. Yüzyıl İstanbul’unda Tarihi Ahşap Çatı Sistem Örnekleri ve Onarımları, İstanbul Sabahattin Zaim Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 5, 1, 1-7, 2023.
- [3] Uzun, S., Tarihi Ahşap Yapı Taşıyıcı Sistemlerinin İncelenmesi ve Boğaziçi Örneği: Amcazade Hüseyin Paşa Yalısı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.
- [4] Aksoy, D., Geleneksel Ahşap Yapıların Deprem Davranışı, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.

- [5] Aras, F., Beylerbeyi Sarayının Geri Dönüşümlü Karma Teknolojilerle Depreme Karşı Korunması, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, 2007.
- [6] Aktaş Erdem, Y. D., Akyüz, U., Erdil, B., Türer, A., Şahin Güçhan, N. Assessment of Seismic Behavior of Traditional Timber Frame Ottoman Houses: Frame Tests. 1st International Conference on Structures and Architecture ICSA, 1157-1164, Portekiz, 2010.
- [7] Dışkaya, H., 19. Yüzyıl İstanbul Geleneksel Ahşap Karkas Yapılarında Deprem Etkisinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, MSGSÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [8] Kaplan, B., Geleneksel Osmanlı Mimarisine Sahip Ahşap Yalılarının Deprem Kuvveti Altında İncelenmesi ve Güçlendirme Teknikleri, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.
- [9] Sarıkaya A., Göçer C., İstanbul'da Tarihi Yarımada'daki Geleneksel Ahşap Konutların Deprem Performansının Değerlendirilmesi, KİÜ Fen, Mühendislik ve Teknoloji Dergisi, 1, 1, 17-32, 2024.
- [10] Schmidt, R.J., Miller, J.F., Capacity of Pegged Mortise and Tenon Joinery. Research Report, Department of Civil and Architectural and Engineering, University of Wyoming, Laramie, 2004.
- [11] Descamps, T., Lambion, J., Laplume, D., Timber Structures: Rotational Stiffness of Carpentry Joints, Engineered Wood Products Association, 2006.
- [12] Koch, H., Eisenbut, L., Seim, W., Multi-Mode Failure of Form-Fitting Timber Connections – Experimental and Numerical Studies on the Tapered Tenon Joint, Engineering Structures, 48, 727–738, 2013.
- [13] Feio, A. O., Lourenço, P. B., Machado, J.S., Testing and Modeling of Traditional Timber Mortise and Tenon Joint, Materials and Structures; 47:213–225, 2014.
- [14] Aslankaya, G., Influence of Joints on The Seismic Response of Traditional Timber Frames in Turkey, Doktora Tezi, Universitat Politecnica De Catalunya, 2019.
- [15] Parisi, M.A., Cordie, C., Mechanical Behavior of Double-Step Timber Joints, Construction and Building Materials, 24:8, 1364–1371, 2010.
- [16] Sobra, K., De Rijk, R., Aktas, Y.D., Avez, C., Burawska, I., Branco, J.M., Experimental and Analytical Assessment of The Capacity of Traditional Single Notch Joints and Impact of Retrofitting by Self-Tapping Screws, In Proceedings of the 2nd Int. Con. on Historic Earthquake-Resistant Timber Frames in the Mediterranean Region, HEART, LNEC Lisbon, Portekiz, 2015.
- [17] Verbist, M., Branco, J.M., Poletti, E., Descamps T., Lourenço P. B., “Single Step Joint: Overview of European Standardized Approaches and Experimentations” Materials and Structures, 50, 161, 2017.
- [18] Aira, J.R., Arriaga F., 'Iniguez-Gonzalez, G., Guaita, M., Failure Modes in Halved and Tabled Tenoned Timber Scarf Joint by Tension Test, Construction and Building Materials, 96, 360–7, 2015.

- [19] Poletti, E., Vasconcelos, G., Branco, J.M., Koukouviki, A.M., Performance Evaluation of Traditional Timber Joints Under Cyclic Loading and Their Influence on the Seismic Response of Timber Frame Structures. *Construction and Building Materials*, 127, 321–34, 2016.
- [20] Vieux-Champagne, F., Sieffert, Y., Grange, S., Polastri, A., Ceccotti, A., Daudeville, L., Experimental Analysis of Seismic Resistance of Timber-Framed Structures with Stones and Earth Infill, *Engineering Structures*, 69,102–15, 2014.
- [21] Lukic, R., Poletti, E., Rodrigues, H., Vasconcelos, G., “Numerical Modelling of The Cyclic Behavior of Timber-Framed Structures” *Engineering Structures* 165, 210-221, 2018.
- [22] Custodio J., Broughthon J, Cruz H., A review of factors influencing the durability of structural bonded timber joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 173-185, 2009.
- [23] C.Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, P.K. Vimalathithan Damage propagation analysis in the single lap shear and single lap shear-riveted CFRP joints by acoustic emission and pattern recognition approach *Materials (Basel)*., 13 (2020).
- [24] A. Kwiecień Shear bond of composites-to-brick applied with highly deformable, in relation to resin epoxy, interface materials *Mater. Struct. Constr.*, 47 (12) (2014), pp. 2005-2020
- [25] Parisi M.A., ve Piazza M., Seismic strengthening and seismic improvement of timber structures *Construction and building material* 2015.
- [26] Szabó, B., Kirizsán, I., European Historic Roof Structures: Concepts of Composition and Intervention, In *Proceedings of the International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, SAHC, Polonya*, 105–127, 2012
- [27] Serafini, A., Gonzalez Longo C., Seventeenth- and Eighteenth- Century Timber Roof Structures in Scotland: Design, Pathologies and Conservation, 10th Int. Conf. on Structural Analysis of Historical Constructions, Belçika, 2016.
- [28] Cestari C.B., Marzi T., Conservation of Historic Timber Roof Structures of Italian Architectural Heritage: Diagnosis, Assessment, and Intervention, *Int. Journal of Architectural Heritage*, 12, 4, 632-665, 2018.
- [29] Parisi, M.A., Piazza, M., Seismic Behavior and Retrofitting of Joints in Traditional Timber Roof Structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22, 1183-1191, 2002.
- [30] Branco, J.M., Piazza, M., Cruz, P.J.S., Structural Analysis of Two King-Post Timber Trusses: Non Destructive Evaluation and Load-Carrying Tests, *Const. and Building Materials*, 24, 371-383, 2010.
- [31] Parisi, M. A., Chesi, C., Tardini, C., Seismic Vulnerability of Timber Roofs, *Advanced Materials Research*, 778,1088-1095 2013.

- [32] Munafò, P., Stazi, F., Tassi C., Davi F., Experimentation on Historic Timber Trusses to Identify Repair Techniques Compliant with the Original Structural–Constructive Conception, *Const. and Building Materials*, 87, 54-66, 2015.
- [33] Cruz, H., D. Yeomans, E. Tsakanika, N. Macchioni, A. Jorissen, M. Touza, M. Mannucci, P. B. Lourenço, Guidelines for On-Site Assessment of Historic Timber Structures. *International Journal Architectural Heritage*, 9 ,3, 277–89, 2015.
- [34] Odabaşı, Y., Ahşap ve Çelik Yapı Elemanları, Beta Basım, İstanbul, 19.
- [35] Branco, J.M., Descamps, T., Analysis and Strengthening of Carpentry Joints, *Construction and Building Materials*, 97,34-47, 2015
- [36] ABTHYE-2025 Ahşap Binaların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Ankara.
- [37] Larsen, K.E., Marstein, N., Conservation of Historic Timber Structures: An Ecological Approach, Oslo, 2016.
- [38] Meisel, A., Moobrugger, T., Schickhofer, G. Survey and Realistic Modeling of Ancient Austrian Roof Structures. In: *Proceedings of Conservation of Heritage Structure (CSHM-3)*, Ottawa, Canada, 2010.
- [39] Palma, P., Cruz H., Mechanical Behaviour of Traditional Timber Carpentry Joints in Service Conditions - Results of Monotonic Test. *ICOMOS IWC-XVI International Symposium*, Floransa, 11-16 Kasım 2007.
- [40] Branco, J.M., Traditional Timber Trusses: Evolution, Behaviour and Strengthening with Composites. *Doktora Tezi*. University of Minho. 2008.
- [41] URL-1: <https://www.millisaraylar.gov.tr/Lokasyon/4/index.html>, Erişim Tarihi: 10.06.2024
- [42] Ogawa, K., Sasaki, Y., Yamasaki, M., Theoretical Modeling and Experimental Study of Japanese Watari-Ago Joints, *Journal of Wood Science*, 61(5), 481-491, 2015.
- [43] Komatsu, K., Kitamori, A., Jung, k., Mori, T., Estimation of the Mechanical Properties of Mud Shear Walls Subjecting to Lateral Shear Force, In *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009)*, İngiltere, 6-9 2009.
- [44] Sakata, H., Yamazaki, H., Ohashi, Y., A Study on Moment Resisting Behavior of Mortise-Tenon Joint with Dowel or Split Wedge, In *15th World Conference on Earthquake Engineering*, Portekiz, 24-28 September 2012.
- [45] Inayama M., *Wooden Embedment Theory and its Application*. Doktora tezi, The University of Tokyo, Japonya, 1991.
- [46] Tanahashi, H., Okamura, M., Suzuki. Y., Simple Formulation of Elasto-Plastic Embedment Behavior of Orthotropic Wood Considering Densification. In *World Conference on Timber Engineering, WCTE*, Japonya 2008.

- [47] Roche, S.N., Semi-Rigid Moment-Resisting Behavior of Multiple Tab-and-Slot Joint for Freeform Timber Plate Structures, Doktora Tezi, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, İsviçre, 2017.
- [48] Yu, P., Yang Q., Law, S., Lateral Behavior of Heritage Timber Frames with Loose Nonlinear Mortise-Tenon Connections, Structures, 33, 581-592, 2021.
- [49] Fang, D.L., Mueller, C.T., Brütting, J., Fivet, C., Moradei, J., Rotational Stiffness in Timber Joinery Connections: Analytical and Experimental Characterizations of the Nuki Joint." Structures and Architecture: Bridging the Gap and Crossing Borders – Proceedings of the 4th Int. Conference on Structures and Architecture, ICSA, 2019B
- [50] Gürgün B.N., Beylerbeyi Sarayı Ahşap Çatı Sistemi Birleşim Davranışının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, FSMVÜ Lisansüstü Enstitüsü, 2025.
- [51] Hıdır, A., Bal, B. C., & Avşaroğlu, E. (2024). Karaçam Odunundan Üretilen Çapraz Lamine Ahşabın Seçilmiş Mekanik Özellikleri Üzerine Rutubetin Etkisi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(2), 502-510. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1396980>
- [52] TS EN 408:2010+A1, Ahşap yapılar- Yapı kerestesi ve tutkallanmış lamine kereste - Bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin tayini, 2012
- [53] Gürgün B.N., Doğramacı Aksoylar N., Ökten M.S., Tarihi Ahşap Çatı Birleşim Davranışının Deneysel İncelenmesi, 7. Uluslararası Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devri Sempozyumu, Diyarbakır, 2024.
- [54] EN12512, Timber Structures-Test Methods - Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners,2001.