



## Geleneksel Bir Yapıdaki Ahşap Taşıyıcı Sistem Panelinin Yanal Yük Kapasitesinin Analizi

### Analysis of Lateral Load Capacity of a Timber Load-Bearing System Panel in a Traditional Building

Mehmet Fethi Ertenli<sup>1\*</sup>, Enes Melik Köseoğlu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 26/12/2024

Kabul / Accepted: 18/01/2024

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/01/2024

Son Versiyon/Final Version: 31/01/2024

#### Öz

Bu çalışmada Eflani-Karacapınar Köyü'nde yer alan tarihi bir yapıdaki ahşap taşıyıcı panelin yanal itki kapasitesi incelenmektedir. Bina, Kültür Varlıklarını Koruma Kurulu tarafından resmi olarak koruma altına alınmıştır. Bu nedenle ahşap taşıyıcı panelin sayısal modeli literatür kaynakları kullanılarak doğrulanmıştır. Panelin kuvvet-deformasyon ilişkisi, yapısal bir analiz programı kullanılarak doğrusal olmayan statik itme analizi yoluyla kurulmuştur. Analiz, mevcut panelin 7,56 kN yanal itki taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Sayısal sonuçlar, paneldeki diyagonal elemanların çekme kuvvetlerini etkili bir şekilde aktarmasını sağlamak için özel önlemlerin uygulanması yoluyla yanal itki taşıma kapasitesinin 2,6 ila 3,5 kat artırılabilirliğini göstermiştir. Ahşap taşıyıcı paneldeki çapraz elemanların çekme kuvvetlerini etkili bir şekilde aktarılmasına olanak sağlayacak şekilde takviye edilmesi, tüm bina sisteminin yanal itme taşıma kapasitesini arttırmada etkili bir yöntemdir. Tarihi yapıların uzun yıllar etkili bir şekilde stabil kalabilmesi belirli periyotlarla bakımlarının yapılması ve gerektiğinde uygun güçlendirme tekniklerinin kullanımı ile mümkündür.

#### Anahtar Kelimeler

“Geleneksel yapı, Bilgisayar destekli yapısal analiz, İtme analizi”

#### Abstract

This study examines the lateral thrust capacity of the timber bearing panel in a historical building located in Eflani Karacapınar Village. The building has been officially designated as a protected area by the Cultural Heritage Preservation Board. Due to restrictions imposed by the protection board, the numerical model of the timber load-bearing panel was validated using literature sources. Therefore, the numerical model of the panel was validated using literature. The force-deformation relationship of the panel was established through nonlinear static pushover analysis using a structural analysis software. The analysis indicates that the current panel has the capacity of 7.56 kN. Numerical results indicates that the capacity can be enhanced by 2.6 to 3.5 times through the implementation of specific measures to ensure that the diagonal members in the panel effectively transfer tensile forces. Reinforcing the diagonal members in the panel in a way that allows them to effectively transfer tensile forces is an effective method to increase the lateral thrust bearing capacity of the entire building system. It is possible for historical structures to remain effectively stable for many years by maintaining them at regular intervals and using appropriate strengthening techniques when necessary.

#### Key Words

“Traditional structure, Computer aided structural analysis, Pushover analysis”

## 1. Giriş

Geleneksel yapılar belirli bir bölgede, inşa edildiği dönemin kültürünü ve tarihini yansıtan yapıları tanımlamaktadır. Uzun yıllar boyunca uygulanagelmış bulunan yapı sistemine sahip geleneksel yapılara olan ilgi, günümüzde yaygın olarak tercih edilen betonarme ve çelik yapı sistemlerine nazaran azalmıştır. Karabük ili Eflani ilçesi Karacapınar köyünde yer alan tarihi yapılar incelendiğinde, birçoğunun mühendislik hizmeti almadığı, ustalarının tecrübelerinden izler taşıdığı görülmektedir. Bu bağlamda bölgedeki yapılarda farklı yapısal malzemeler kullanılarak taşıyıcı sistemlerin kurgulandığı gözlenmiştir. Tarihsel ve kültürel açıdan kıymetli varlıkların bulunduğu bölgelerde, taşınmaz tabiat ve kültür varlıklarından korunması gerekli görülenler ilgili kurul tarafından tespit edilerek koruma altına alınmaktadır, bu tür yapılara “tescilli yapı” denilmektedir. Geleneksel yapılar milli, tarihi ve kültürel açıdan önemli olan somut, mimari değerlerimizdir ve gelecek nesillere bu değerlerin aktarılması gerekmektedir. Maalesef ki tarihi ahşap yapılara gerektiği kadar önem verilmediği, bu kültürel ve mimari mirasın son yıllarda özellikle beşerî sebeplerle unutulmaya yüz tuttuğu görülmektedir.

Dowrick (1987), yaptığı çalışmada çeşitli depremlerin etkisi altında ahşap yapıların dayanımlarının düşük olmasının sebeplerini araştırmış ve bunun başlıca nedenlerini şu şekilde sıralamıştır; (i) zemin büyümesi, (ii) altyapı bütünlüğünün eksikliği; (iii) asimetrik yapısal form, (iv) ahşap yapıya entegre bacaların yetersiz mukavemeti, (v) yetersiz yapısal bağlantılar, (vi) uygun destek çerçevesine sahip olmayan ağır çatıların kullanılması, (vii) çürüme veya haşere saldırısı nedeniyle ahşabın dayanıklılığının bozulması, (viii) depremden kaynaklanan yangınlara karşı yetersiz dayanım ve (ix) inşaat aşamasında yetersiz denetim. Şahin, (1996) doktora çalışmada, ahşap yapıların güçlendirilmesi ve deprem etkilerine karşı dirençli kalmasını sağlamak amacıyla birtakım koruma sistem ve yöntemleri üzerine çalışmıştır. Bu koruma sistemleri; Aktif Kontrol Sistemleri, Yapı İçerisine Konulan Pasif Enerji Sönümleyici Sistemler ve Taban Koruma Sistemleri şeklinde ifade edilmektedir. Çakır, (2000) geleneksel Karadeniz ahşap yapı inşa yönteminin teknolojik gelişmeler ışığında değerlendirilmesini yaptığı çalışmada, ahşap yapı malzemesinin Anadolu’da ortalama %70’lik bir oranla en fazla tercih edilen malzeme türü olduğunu ifade etmiştir. Ambraseys ve Jackson (2000) tarafından yapılan Marmara denizinin depremselliği üzerinde odaklanılan çalışmada, son yüzyıllık süreçte ahşap yapı malzemesinin dayanımının sıklıkla kullanılan beton çeşitlerinin dayanımlarına yaklaştığını belirtmiştir. Ayrıca ahşap yapısal malzemenin beton malzemesine oranla daha hafif olması sayesinde sağlamlık/ağırlık oranı daha yüksek olması gibi nedenlerle betona göre çok daha iyi bir yapı malzemesi olduğu yorumunu yapmıştır. Doğanın vd. (2006) tarafından yapılan, geleneksel ahşap yapıların deprem sonrası hasar durumlarının incelendiği çalışmada, ahşap taşıyıcı sistemli binaların deprem kuvveti etkisindeki davranışlarının farklı bölgelere göre kıyaslama yapıldığında değişiklik gösterse de oluşan hasar durumları değerlendirildiğinde genel bir sınıflandırma yapılabileceğini belirtmiştir. Santos vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada ahşap bağlantı elemanlarının yarı statik bir yüklem altındaki mekanik davranışı incelenmiş, deney gerçekleştirilen tek dübelli ahşap yapı birleşim elemanlarının; sünekliği, kayma modülü gibi çeşitli mekanik özellikleri üzerinde değerlendirme yapmıştır. Bu değerleri Avrupa’nın ahşap yapı standardı olan Eurocode 5’te önerilen değerler ile karşılaştırmıştır. Çalışma kapsamında incelediği ahşap bağlantı elemanının üç boyutlu sonlu eleman modelini oluşturup sonlu elemanlar analizini gerçekleştirmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırmış ve nümerik sonuçların deneysel veriler ile tutarlılığını göstermiştir. Ali vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada geleneksel Dhajji-Dewari ahşap yapı sistemlerinin (dolgu duvarlı ahşap çaprazlı çerçeve sistemler) düzlem içi davranışı incelenmiştir. Bahse konu çalışmada yazarlar “Dhajji” adı verilen geleneksel yapılar için bir dizi deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirerek “Dhajji” yapısının düzlem içi yanal yük tepkilerini değerlendirmiştir. Deneysel çalışma kapsamında üç adet 1/1 ölçekli duvar üzerine düzlem içi yarı statik çevrimsel yüklem uygulanmıştır. Ayrıca araştırmacılar tarafından çalışma kapsamında ana bağlantıların gerilme ve eğilme davranışını izlemek için de testler yapılmıştır. Çalışmanın nümerik analiz kısmında, dolgu duvarın etkisini göz ardı eden ve bağlantıların elastik-plastik davranış gösteren yük-deplasman ve moment-dönme eğrilerini kullanarak incelenen ahşap paneller için basitleştirilmiş sayısal modellerle doğrusal olmayan statik itme analizinde kapasite değerlendirmesi yapılabileceğini belirtilmiştir. Deneysel veriler sonucunda Dhajji yapılarının yanal yük taşıma kapasitelerinin değerlendirmesini kolaylaştırmak amacıyla basitleştirilmiş analitik araçlar geliştirilmiş ve doğrusal olmayan statik itme analizinde kullanılmıştır. Ahmad vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada “Dhajji” adı verilen ahşap yapı sistemlerinin taşıyıcı panellerinin SAP2000 programı kullanılarak sayısal modeli oluşturulmuş ve hem doğrusal olmayan statik itme analizleri ile panelin yanal kuvvet-şekil değiştirme karakteristikleri değerlendirilmiş hem de doğrusal olmayan dinamik zaman tanım alanında analiz (time history analizi) yapılarak “Dhajji” isimli yapıların ahşap taşıyıcı panellerinin sismik performansının değerlendirmesini yapmak adına basitleştirilmiş sayısal modeller önerilmiştir. Çelik ve Birdal (2017) çalışmada ahşap taşıyıcı sisteme sahip tarihi Yanıkoğlu Camii’nin güçlendirilmesi konusunda bir vaka çalışması yapmıştır. Bu kapsamda yazarlar tarafından ahşap sütunlu tarihi caminin statik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının mevcut durumunu temsil edecek sayısal veriler (ahşap malzeme özellikleri ve kesit boyutları vs.) SAP2000 programına girilerek analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlara göre yapının takviye edilmesi gerektiği yönünde bir değerlendirme yapılmıştır. Bu kapsamda örnek yapının tarihi dokusuna zarar vermeden uygun güçlendirme tekniklerinin kullanılması tavsiyesinde bulunulmuştur. Meriç (2019) ahşap taşıyıcı sisteme sahip bir yapıyı Eurocode 5 (EC5) ve TSE 647’ye göre analiz edip sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Bu kapsamda yapısal analiz programı olarak SAP2000 programını kullanan araştırmacı, ahşap yapı tasarımlarında kullanılan yönetmelikler (EC5 ve TS647) ve TS 498 standardı dikkate alınarak analizler yapmıştır. Araştırmacı elde ettiği sonuçlara göre EC5’in daha güvenli bir hesap yöntemini ortaya koyduğunu belirtmiştir. Meng vd. (2019) Çin’de Song hanedanlığı döneminde uygulanan bir inşaat tekniği olan kolon-çerçeve katmanlı ve Dou-Gong katmanlı ahşap bir binanın 1/2 ölçekli modelini üreterek deneyler gerçekleştirmiş ve bahse konu ahşap yapı sisteminin yanal yapısal performansını araştırmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçları, ahşap yapının nihai yüklem durumunun kolon çerçeve katmanının yanal yer değiştirmesi tarafından kontrol edildiğini göstermiştir. Ayrıca araştırmacılar kolon çerçeve katmanının zamana bağlı davranışının ve rijitlik özelliklerinin genel yapıya oldukça benzediğini ifade etmiştir. Çalışkan vd. (2019) ahşap yapıların geçmişten bugüne ve geleceğine dair bir derleme ve değerlendirme yaptıkları çalışmalarında Türkiye’de ve dünyada ahşap yapı tasarımında kullanılan standartlara değinmiştir.

Çalışmalarında ahşabın diğer yapı malzemelerine kıyasla daha eski bir yapı malzemesi olmasından bahisle doğadan temininin kolay olmasına, mekanik özelliklerinin sağladığı avantajlara, kolay şekil verilebilir ve hafif bir malzeme olmasına işaret etmiştir. Saatci vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada; Türkiye'deki farklı türlerdeki geleneksel ahşap taşıyıcı sistemlerin yapısal davranışa etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda Safran Konak özelinde bir vaka çalışması yapan araştırmacılar Anadolu'da yaygın bir şekilde kullanılan farklı türdeki ahşap karkas sistem modellerini ticari bir yapısal analiz programı kullanarak analiz etmiştir. Araştırmacılar elde ettikleri bulgularda; ahşap payandaların taşıyıcı sisteme etki eden deprem yüklerinin karşılanması, dağıtılması ve temele aktarılmasındaki önemine değinmiş olup payandaların bulunduğu bina modellerinde kat deplasmanlarının daha az olduğunu ifade etmiştir. Köseoğlu (2022) geleneksel yapıların taşıyıcı sistemine ait yapı elemanlarını incelediği çalışmasında özellikle konut tipi ahşap yapıların iç mekanlarında yer alan ahşap sedirlerin yapının ahşap taşıyıcı paneline sabitlenmesi ile yapıdaki yanal deformasyonun sınırlandırılacağı önerisinde bulunmuştur.

Bu güncel çalışmanın amacı mühendislik hizmeti alınmadan inşa edilmiş tescilli geleneksel yapılar içerisinde bir örnek yapının ahşap taşıyıcı panelinin, yanal itki taşıma kapasitesini nümerik olarak belirlemek ve panelin kapasitesini artırmak için öneri sunmaktır. İncelenen örnek yapının tescilli bir yapı olması ve bu bağlamda tescilli yapıların incelenmesinde koruma kurulunun getirdiği sınırlamalar, deneysel çalışma için örneklem alanından ve incelenen yapıdan numune alınmasına imkân vermemiştir. Bu nedenle ahşap taşıyıcı panelin sayısal modeli literatür kaynakları kullanılarak doğrulanmıştır.

## 2. Metodoloji

Eflani ilçesinin Karacapınar köyünde koruma amaçlı imar planı sınırlarına dahil olan çeşitli tescilli yapılar içerisinde belirlenen bir örnek yapının taşıyıcı sistemi incelenmiş, gerekli ölçü ve bilgiler yerinde alınmış ve örnek yapının bir taşıyıcı paneli yapısal analiz programında (SAP2000) modellenmiş ve analiz edilmiştir.

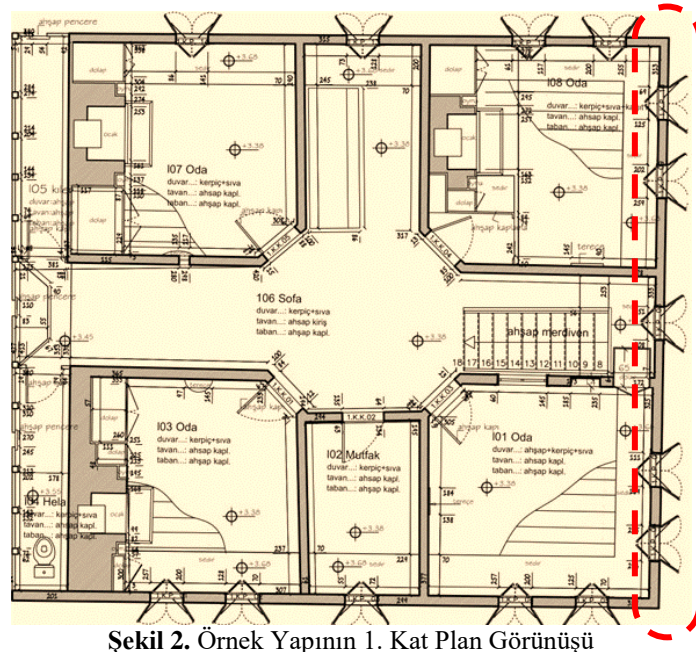
### 2.1. Örnek yapının özellikleri

Karabük ilinin Eflani ilçesine bağlı Karacapınar Köyü sınırlarındaki 198/3 ada-parsele kayıtlı olan tescilli yapı bu güncel vaka çalışması kapsamında örnek yapı olarak ele alınmış olup bahse konu ahşap taşıyıcı sisteme sahip bina Ankara Koruma Kurulu Büro Müdürlüğüne 1989'da tescillenmiş ve koruma altına alınmıştır. Örnek bina; zemin kat, ara kat ve 1. kattan oluşmakta olup zemin katın inşasında yığma taş duvar ile ahşap hatıllar kullanılmıştır. Ara katı ile 1. katta ise ahşap çatki sistem ve taş dolgu kullanılmıştır. Örnek yapının arka cephesinde yine ahşap malzeme kullanılarak kaplama yapılmıştır. Tarihsel süreç içerisinde kullanıldığı dönem boyunca aslına uygun formda kalması sağlanan yapıda tarihi dokusunu değiştirecek önemli bir müdahalede bulunulmamış olmakla birlikte zamanla çatıdaki kiremitlerin marsilya tipi kiremit ile değiştirildiği belirlenmiştir. Binanın dış cephesinde ise yatay tahta parçalarının kullanımıyla bağdadi bir mimari doku kazandırılmaya çalışılmıştır. Örnek yapı Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Örnek Yapının Görünüşü

Örnek yapının 1.inci kat planı Şekil 2'de gösterilmektedir. Yapıda 1. kat 8 bağımsız bölümden oluşmaktadır. Bunlar Şekil 2'de sunulan 1. Kat plan görüntüsünden görülmektedir. Yapının 1. katında; I01, I03, I07 ve I08 olarak isimlendirilen 4 adet oda ve birer adet mutfak (I02), hela (I04), kiler (I05) ve sofa (I06) mekanları bulunmaktadır. Söz konusu mahallere sofadaki ahşap kapı vasıtasıyla geçilebilmektedir. Tüm mahallerde; tavanlar ahşap kirişleme, döşemeler ahşap kaplama ve duvarlar ise ahşap + kerpiç + sıva kullanılarak inşa edilmiştir. Çalışma kapsamında Şekil 2'de kırmızı kesikli çizgi ile gösterilen kısımdaki ahşap panel yapısal analiz programında (SAP2000) modellenerek doğrusal olmayan statik itme analizi yapılmıştır.

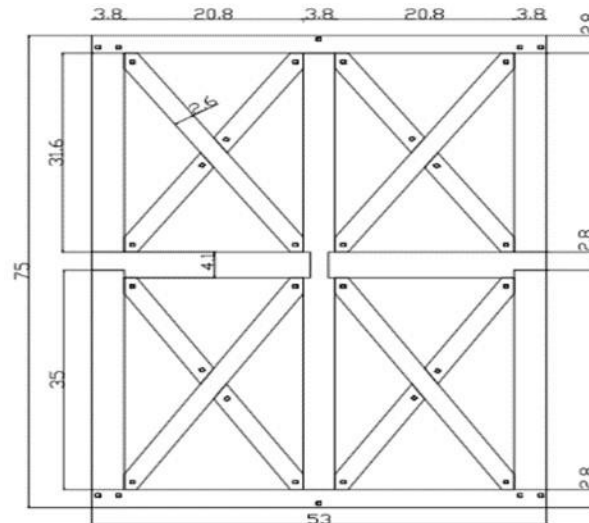


Şekil 2. Örnek Yapının 1. Kat Plan Görünüşü

Sonlu elemanlar programı kullanılarak yapılan çalışmalarda analiz sonuçlarının tutarlılığı ve doğruluğunun tespit edilmesi diğer bir ifade ile sonuçların valide edilmesi gerekmektedir. Bu tür araştırmalarda validasyon çalışması kapsamında, incelenmekte olan panel laboratuvar ortamında teste tabi tutulabileceği gibi literatürde bulunan ve çalışma konusu ile benzerlik gösteren deneysel bir çalışmanın sonuçlarından faydalanılarak da doğrulama yapılabilir. İncelenen örnek bina koruma kurulumca tescillenmiş bir taşınmaz olduğu için örnek yapıdan numune alınıp deneysel bir çalışma yapılması mümkün olamamıştır. Bu doğrultuda literatüre yönelinmiş olup Cruz vd. (2001) ve Ali vd. (2012) tarafından yapılmış deneysel çalışmalar temel alınmıştır.

## 2.2. Doğrulama çalışmaları

Doğrulama çalışmaları kapsamında ele alınan iki çalışmadan birincisi olan Cruz vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada harç dolgu ahşap duvarların yük taşıma kapasiteleri incelenmiş ve yüklem sonrası hasar alan ahşap paneller FRP ile güçlendirildikten sonra tekrar deneye tabi tutulmuş ve kapasitelerindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar deney numunelerinde dolgu malzemesi olarak Portekiz'de yıkılan yapıların molozlarından ürettikleri harcı kullanmıştır. Laboratuvar ortamında üretilen ahşap taşıyıcı panel eleman düşey yük altında deneye tabi tutulmuş, farklı yük değerleri altındaki deformasyonları kaydedilmiştir. Ardından ilk yüklemde hasar alan paneller FRP kumaş kullanılarak takviye edilmiş ve tekrar benzer yüklem prosedürüne maruz bırakılmıştır. Doğrulama çalışması için ele alınan Cruz vd. (2001) çalışmasında kullandıkları moloz dolgu malzemesinin mekanik özellikleri hakkında açık bir bilgi paylaşılmamış olup deneyin başlangıcında yüklemenin etkisiyle dolgu malzemesi ile ahşap karkas arasındaki bağlantının açıldığı belirtilmiştir. Bu sebeple dolgu malzemesi analiz edilen SAP2000 modellerinde dikkate alınmamıştır. Cruz vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada kullanılan panelin detayı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Cruz vd. (2001) Tarafından Deneyi Gerçekleştirilen Ahşap Panellere İlişkin Detay

### 2.3. Ahşap malzeme modelinin tanımlanması

Sonlu elemanlar modeli yöntemi kullanılarak yapılan bu güncel çalışmada modelin doğruluğunu test etmek için literatürden yararlanılmıştır. Bu kapsamda doğrulama çalışması için ele alınan Cruz vd. (2001) çalışmasında ahşap malzeme türü olarak Sekoya ağacını kullanmıştır. Bu bağlamda Tablo 1’de sunulan Sekoya ağacına ait mekanik özellikler literatürden temin edilmiş ve SAP2000 programına tanımlanmıştır. Benzer şekilde Cruz vd. (2001)’nin deneyinde kullanılan eleman kesitleri ve yapı geometrisi de bire bir ilgili çalışmadan temin edilmiştir.

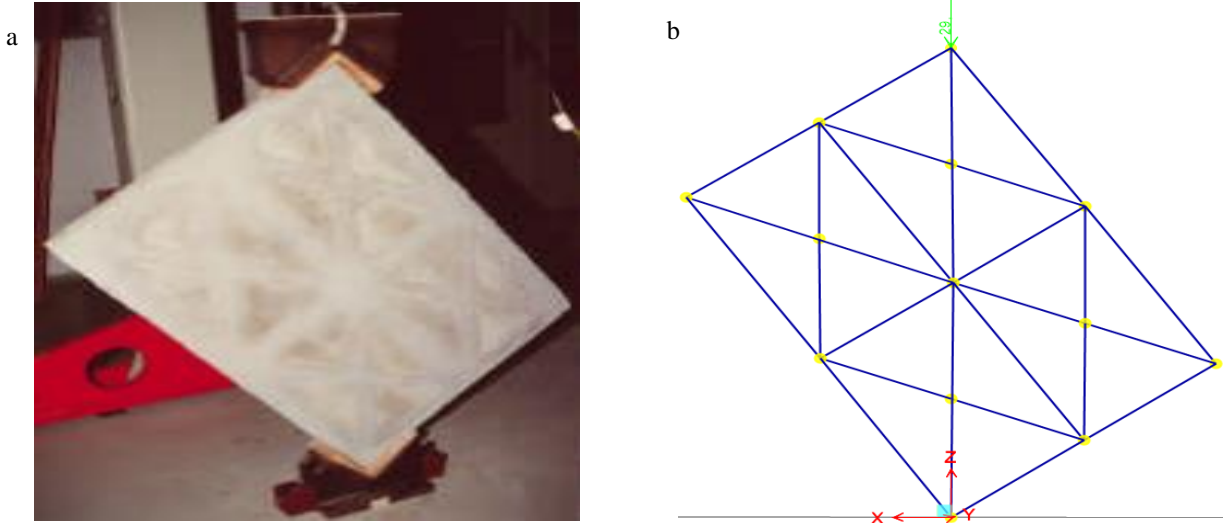
**Tablo 1.** Sekoya Ağacının Mekanik Özellikleri

İsim	Özgül Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson Oranı			Kırılma Modülü (kPa)	Boyuna Yönde Elastisite Modülü (MPa) $E_L$	$\frac{E_T}{E_L}$	$\frac{E_R}{E_L}$	$\frac{G_L}{E_L}$	$\frac{G_T}{E_L}$	$\frac{G_R}{E_L}$	Maksimum Yük Kapasitesi (KJ/m <sup>3</sup> )
		Boyuna	Radyal	Tanjant								
		$\mu_L$	$\mu_R$	$\mu_T$								
Sekoya Ağacı	0,38	0,346	0,373	0,400	52.000	8.100	0,089	0,087	0,066	0,077	0,011	51

Doğrulama çalışması kapsamında incelenen deneysel çalışmada kullanılan eleman kesitleri Tablo 2’de gösterilmektedir.

**Tablo 2.** Cruz vd. (2001) Çalışmasında Kullanılan Ahşap Eleman Kesitleri

Ahşap Elemanlar	Kesitler (mm)
Dikmeler	38x38
Yatay Elemanlar	41x41-28x28
Çapraz elemanlar	26x26



**Şekil 4.** Doğrulama Çalışması İçin Oluşturulan Model (a) Cruz vd. (2001) Tarafından Yapılan Deneysel Model; (b) SAP2000 Modeli

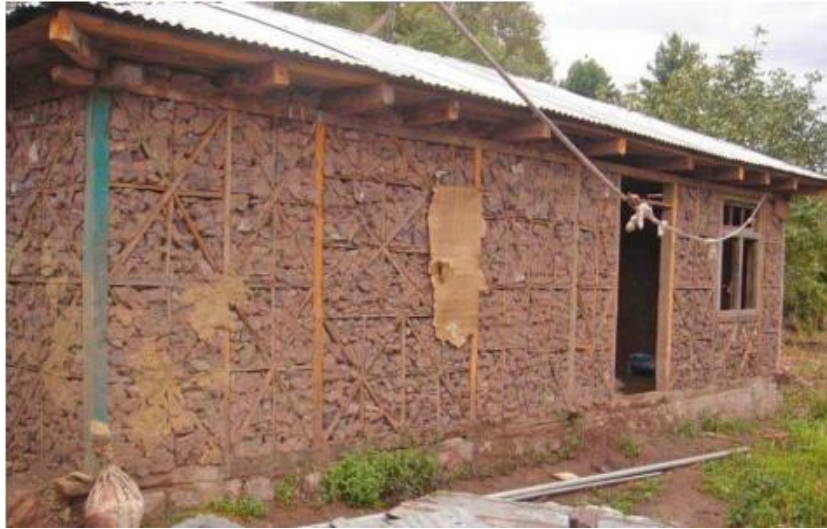
Bu güncel çalışmada Cruz vd. (2001) tarafından yapılan çalışmanın birinci kısımdaki testler SAP2000 programında simüle edilmiş bu kapsamda Şekil 4(a)’da gösterildiği gibi yüklemeye tabi tutulan numunelerin taşıdıkları maksimum kuvvetler altında yüklenme noktasının yaptığı deformasyon ile SAP2000 ile yapılan analiz sonuçları kıyaslanmış ve sonuçların tutarlılığı Tablo 3’te gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Cruz vd. (2001) Çalışması ile SAP2000 Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

No	(Cruz vd. (2001) deneysel sonuçları)		SAP2000 analizi sonuçları	
	Yük (kN)	Deplasman (mm)	Yük (kN)	Deplasman (mm)
I	29,0	24,3	29,0	26,2
II	33,5	25,0	33,5	30,2
III	27,1	25,0	27,1	24,5
IV	26,5	22,0	26,5	23,9
V	17,9	20,5	17,9	16,2

Tablo 3 incelendiğinde SAP2000 sonuçlarının deneysel sonuçlara %88 oranında yakınsadığını görülmektedir. %12'lik farkın numunelerde kullanılan harcın yıkılmış binalardaki atıklardan elde edilen bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Cruz vd. (2001) çalışmasında, moloz malzemeler kullanılarak üretilen dolgu harcına ait mekanik karakteristiklere yer vermemiş olup deneyin başında çerçevedeki dolgu harçlarının hasar aldığı, dolgu ile ahşap eleman arasındaki bağlantının açıldığı belirtilmektedir. Bu bağlamda dolgu malzemesinin çerçeve sistemin yük taşıma kapasitesine olumlu bir katkısından neredeyse hiç bahsedilmez. SAP2000 modeli oluşturulurken bu durum göz önüne alınmış ve dolgu malzemesi modele dahil edilmemiştir.

Bu güncel çalışma kapsamında yapılan diğer bir doğrulama analizi ise Ali vd. (2012) tarafından yapılan araştırmadan elde edilen deneysel sonuçlar olmuştur. İlgili çalışmada; Pakistan, Çin ve Hindistan'ın sınırlarının kesiştiği dağlık coğrafyada konumlanan Keşmir'in Kuzeyindeki bölgelerde yaygın olarak kullanılan "Dhajji" isimli tipik yapıların düzlem içi yanal yük tepkileri değerlendirilmiştir. Ali vd. (2012)'nin çalışmasında sunulan deneysel ve nümerik sonuçlar SAP2000 modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Ali vd. (2012)'nin yaptığı deneysel çalışma, üç adet 1/1 ölçekli ahşap panel üzerinde düzlem içi yarı statik çevrimsel yükleme testi ile bağlantılar üzerinde tek yönlü yükleme ve eğilme testlerini içermektedir. Ayrıca bu çalışmada ahşap panelin nümerik olarak modellenmesinde duvarlardaki dolgunun yapacağı katkının göz önüne alınmasına gerek olmadığına da değinilmektedir. Deneylerden elde edilen verilere göre araştırmacılar, "Dhajji" yapılarının düzlem içi yanal yük kapasitesinin değerlendirmesi için basitleştirilmiş analitik ifadeler geliştirmiş, nümerik modeller oluşturmuş ve söz konusu modellerin doğrusal olmayan statik itme analizlerini yapmıştır. Şekil 5'te çalışma kapsamında kullanılan "Dhajji" isimli yapılara ait bir görsel sunulmuştur.

**Şekil 5.** Geleneksel "Dhajji" Yapısına Bir Örnek, Ali vd. (2012)

Ali vd. (2012)'nin çalışmasında kullanılan ahşap malzeme özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

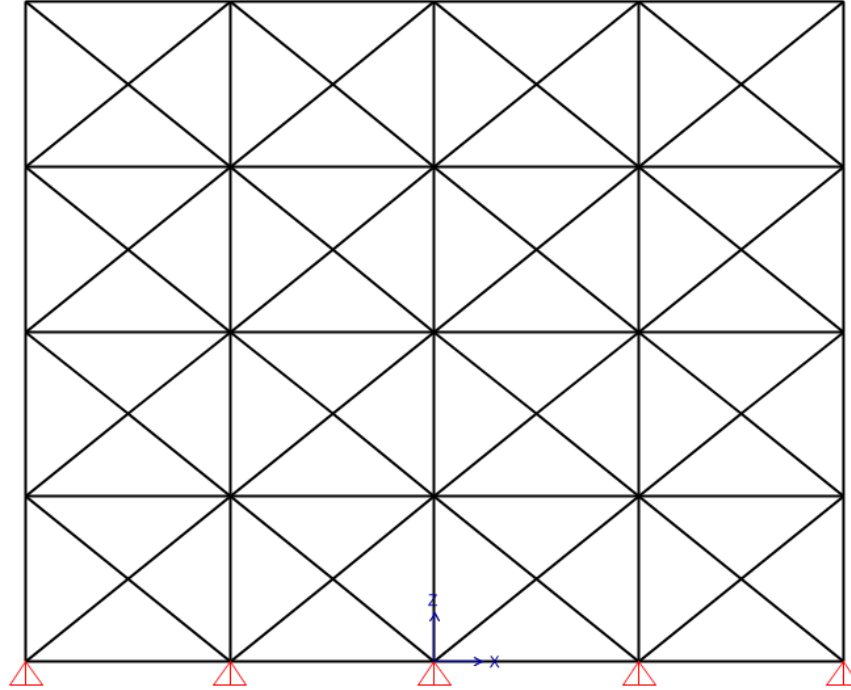
**Tablo 4.** Ali vd. (2012) Çalışmasından Kullanılan Ahşap Malzeme Özellikleri

	Liflere Paralel Yönde Basınç Dayanımı (MPa)	Liflere Dik Yönde Çekme Dayanımı (MPa)	Kırılma Modülü (MPa)	Elastikiyet Modülü (MPa)
Ahşap	26,87	1,96	66,19	3345,24

Ali vd. (2012)'nin çalışmasında kullanılan eleman kesitleri Tablo 5'te verilmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan mesnet şartları SAP2000 modeline birebir uygulanmıştır. Ali vd. (2012) nin incelediği "Dhajji" evine ait ahşap taşıyıcı panelin SAP2000 modeli Şekil 6'da gösterilmektedir.

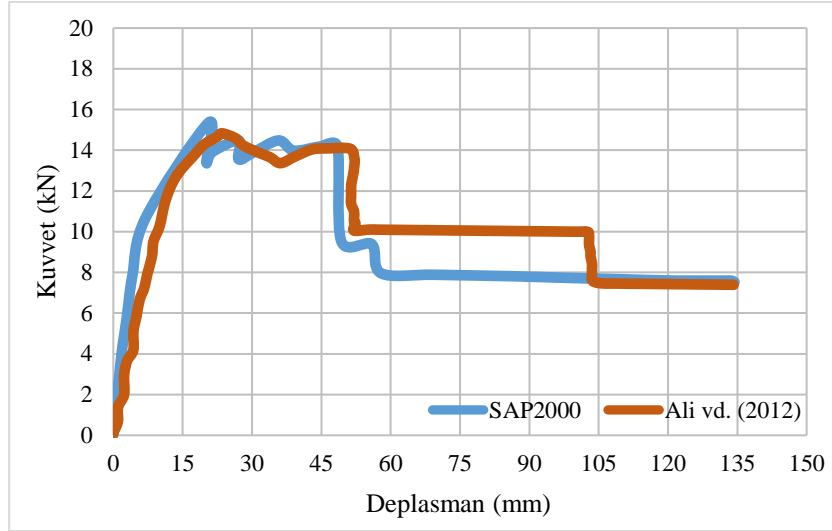
**Tablo 5.** Ali vd. (2012) Çalışmasında Kullanılan Ahşap Eleman Kesitleri

Ahşap Eleman	Kesit (mm)
Yatay Eleman	50x100
Dikme	50x100 – 100x100
Diyagonal	25x100

**Şekil 6.** Ali vd. (2012)'nin Deney Numunesinin SAP2000 Modeli

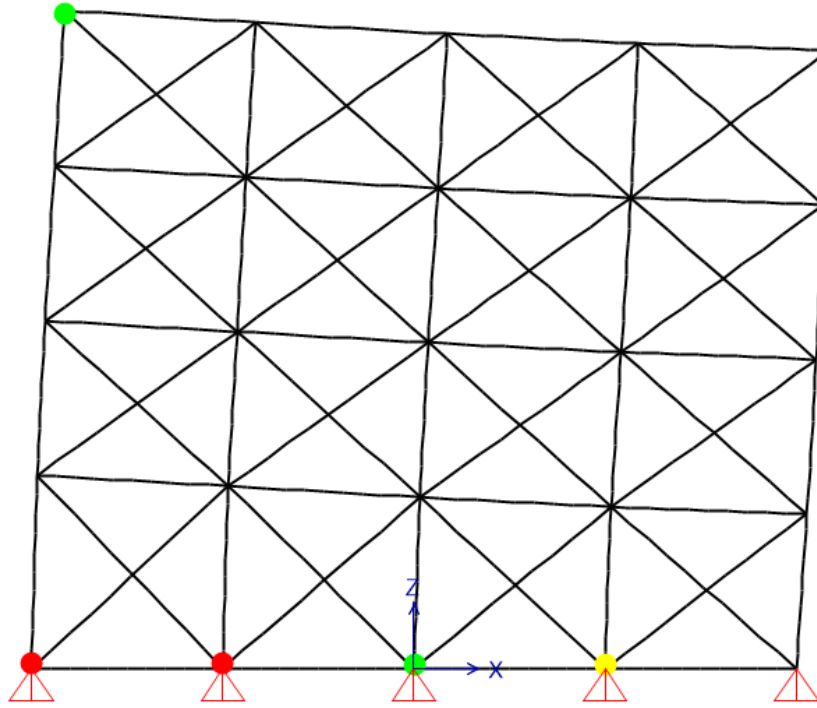
SAP2000 yapısal analiz programı kullanılarak doğrusal olmayan statik ve doğrusal olmayan doğrudan entegrasyon zaman alanı analizleri için, kullanıcılar çubuk elemanlara sayıca istenildiği kadar ve istenilen konumda yığılı plastik mafsalları ataması yaparak elastik ötesi davranışı simüle edebilmektedir. Başlangıçta eleman boyunca elastik bir davranış gözlemlenmektedir. Yüklemenin ilerleyen safhalarında elastik sınır aşıldığında elastik ötesi şekil değiştirme ayrı konumlarda modellenen plastik mafsallar içerisinde ortaya çıkmaktadır. Elastik ötesi davranış, tipik olarak eleman boyunca tasarımcı tarafından tanımlanan bir mafsallık uzunluğu içinde meydana gelen plastik şekil değiştirme ve eğriliğin entegrasyonu ile elde edilmektedir. Eleman boyunca dağıtılan plastikleşmeyi yakalamak için bir dizi mafsallık modellenmektedir. Çalışma kapsamında yapının elastik ötesi davranışını izlemek için yığılı plastik mafsallık modeli tercih edilmiştir. Yığılı plastik mafsallık davranışı, çubuk eleman formunda modellenebilen yapı elemanlarında doğrusal olmayan davranışı modellemede sıklıkla tercih edilmektedir. Bahse konu mafsallık tipinde elemanda iç kuvvetlerin plastik kapasiteye ulaştığı sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı biçimde oluştuğu kabul edilmektedir. Bunun yanı sıra sadece aksel kuvvet etkisine maruz kalarak plastik şekil değiştirme yapan elemanların plastik mafsallık boyu, elemanın serbest boyuna eşit alınmaktadır. Yığılı plastik mafsallık davranışında plastik deformasyonların çubuk elemanın uç bölgelerinde toplandığı ve bu uç noktalarda moment-eğrilik ilişkileri değerlendirilerek tanımlanmaktadır.

SAP2000 programında bir veya daha fazla çerçeve elemanın uzunluğu boyunca uç noktalara plastik mafsallık ataması yapılarak modellenen taşıyıcı sistemin doğrusal olmayan davranışının simüle edilebilmesi mümkündür. SAP2000 programında çeşitli tiplerde mafsallık tanımlaması yapılabilmektedir. Her bir plastik mafsallık, 6 serbestlik derecesinin herhangi bir veya birkaçı için belirlenen plastik özelliklere sahip olabilir. Örneğin aksel kuvvet ve iki yönde (kuvvetli ve zayıf ekseninde) eğilme momenti, bir etkileşim yüzeyi aracılığıyla birleştirilebilmektedir. Doğrulama çalışmasında Ali vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada belirtilen kuvvet/deplasman ve moment/dönme eğrilerinden yararlanılarak verilerin idealize edilmiş formları kullanılmıştır. Şekil 6'da verilen panele ilişkin doğrusal olmayan statik itme analizi neticesinde belirlenen kuvvet/deplasman grafiği ve panelin deformasyon şekli ile plastik mafsallık hasar sınırları sırası ile Şekil 7-9 sunulmuştur.



Şekil 7. Ali vd. (2012)'nin Deney Numunesinin SAP2000 Analizi Sonucu Elde Edilen Kuvvet/Deplasman Grafiklerinin Karşılaştırması

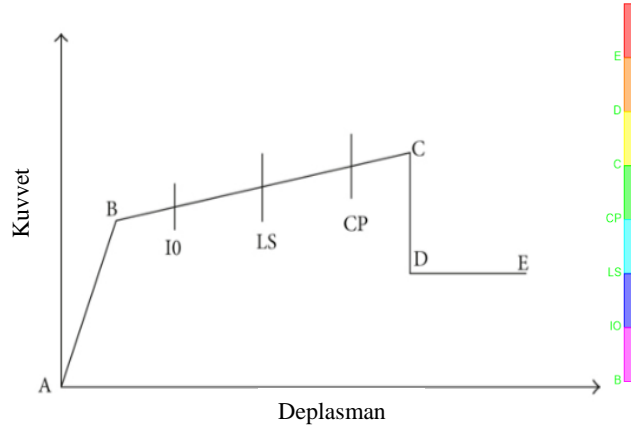
Ali vd. (2012)'nin deney sonuçları ile SAP2000 analizi sonuçlarının karşılaştırmalı sonuçlarını gösteren Şekil 7'de verilen grafikler incelendiğinde deney sonuçları ile SAP2000 analizi arasında belirgin bir uyumun olduğu görülmektedir.



Şekil 8. Ali vd. (2012)'nin Deney Numunesinin SAP2000 Analizi Sonrası Durumu

Şekil 8'de ahşap panelin SAP2000 modelinde yapılan doğrusal olmayan statik itme analizi sonrasında mafsallaşmaların oluştuğu bölgeler görülmektedir. İlk mafsallaşma deplasmanın uygulandığı tarafta yer alan mesnette oluşmuştur. Analizin ilerleyen aşamalarında uygulanan deplasmanın artmasıyla takip eden diğer mesnetlerde de mafsallaşmalar ortaya çıkmıştır. Panelde mafsallaşma arttıkça yanal itki kapasitesinin net bir şekilde azaldığı Şekil 7'de sunulan grafikte görülmektedir. Yapılan analiz ile panelin yanal itki kapasitesi 15.34 kN olarak belirlenmiştir.



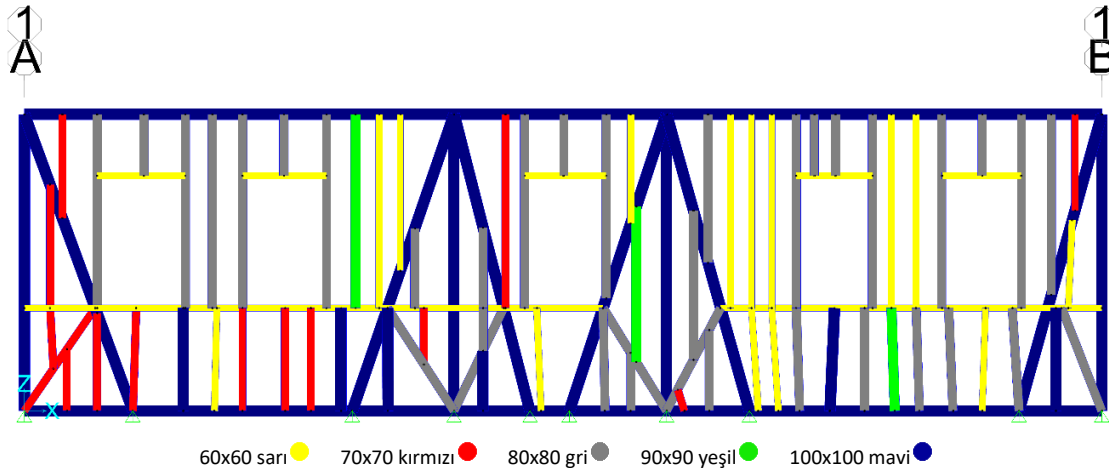


Şekil 9. Plastik Mafsal Hasar Sınırları Zhang vd. (2018)

Şekil 9’da elemanda oluşan plastik mafsallar için hasar bölgeleri gösterilmektedir. Şekil 9 incelendiğinde; A ile B noktası arasında elastik bölgeyi temsil eden bir davranış söz konusudur. B ile C noktası arası sünekliğin elastik olmayan fakat lineer bir tepkisini ifade etmektedir. Bu noktalar arasında (IO), (LS) ve (CP) olarak tanımlanan noktalar doğrusal olmayan davranışı ifade etmektedir. C ile D noktası arası dayanımda ani bir düşüşün olduğu sonrasında D noktasında mukavemetin azaldığı görülmektedir. D ile E arasında ise dayanımda artışın olmadığı görülmektedir.

#### 2.4. Örnek yapıdaki ahşap taşıyıcı panelin sayısal modeli

Bu güncel çalışmada, Kültür Varlıklarını Koruma Kurulunca sit alanı olarak ilan edilen Eflani Karacapınar Köyü’ndeki geleneksel ahşap yapıların yanal itme kapasiteleri araştırılmaktadır. Örneklem alanı içerisinde seçilen ahşap taşıyıcı panelin SAP2000 modeline ilişkin görsel Şekil 10’da verilmiştir. Şekil 10’da farklı renklerle gösterilen ahşap elemanların kesit ölçüleri mm biriminde şeklin altında gösterilmiştir.



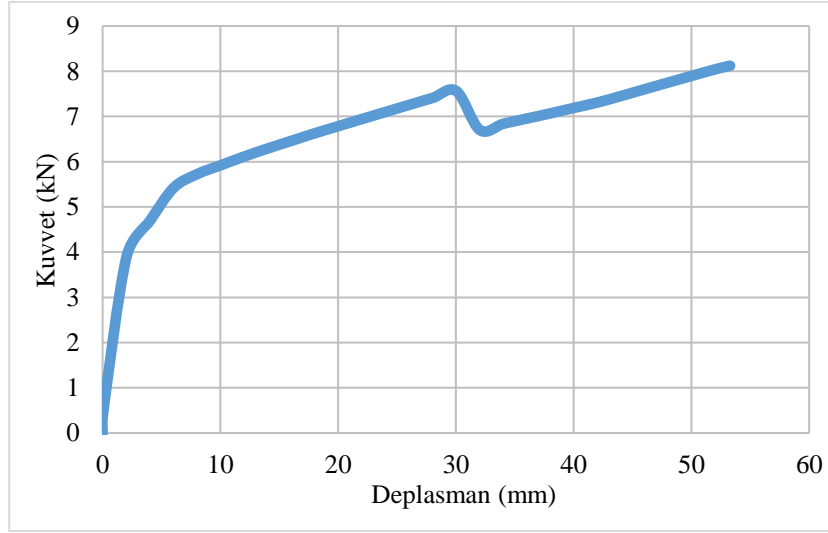
Şekil 10. Örnek Binadaki Ahşap Panelin SAP2000 Modeli

Çalışma kapsamında ele alınan ahşap taşıyıcı panelin elastik ötesi davranışının incelenmesi için sisteme plastik mafsal tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda yapılan doğrulama çalışmasından da yararlanarak 3 farklı tipte plastik mafsal modeli oluşturulmuş ve modele tanımlanmıştır. Plastik mafsal tanımları Ali vd. (2012)’nin çalışması baz alınarak elde edilmiş olup Tablo 6’da özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. Plastik Mafsal Tanımları

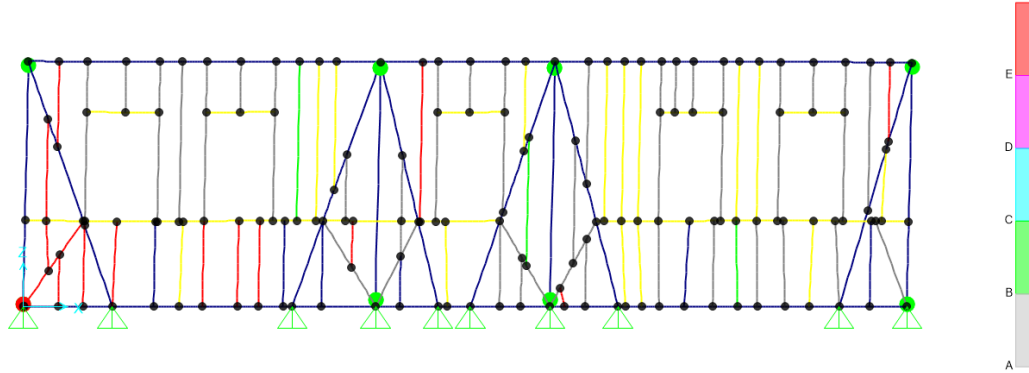
Mafsal tipi	Moment-Dönme		Mafsal tipi	Kuvvet-Deplasman	
	Moment (kN-m)	$\theta$ (rad) x 1000		Kuvvet (KN)	Deplasman (mm)
Tip 1 (M3)	0,37	10	Tip 1 (P)	1,70	0,95
Tip 2 (M3)	0,58	13	Tip 2 (P)	4,80	4,10
Tip 3 (M3)	0,20	14	Tip 3 (P)	4,00	1,90

Birinci durumda panel mevcut haliyle modellenmiş olup yapılan doğrusal olmayan statik itme analizi sonrası elde edilen kuvvet-deplasman grafiği Şekil 11’de sunulmuştur.



Şekil 11. Örnek Binadaki Mevcut Ahşap Panelin Kuvvet-Deplasman Grafiği

Şekil 11’den mevcut panelin 30 mm yanal deplasman yapana kadar yük taşıma kapasitesinin doğrusal olmayan bir şekilde sürekli arttığı görülmektedir. Eğride sürekliliğin bozulduğu, ilk kırılmanın ardından yük taşıma kapasitesinde bir düşmenin ortaya çıktığı ve sonra tekrar lineer bir şekilde yük taşıma kapasitesinde artışın olduğu görülmektedir. Eğrideki ilk kırılma ahşap taşıyıcı panelde kritik olan bir noktada mafsallaşmanın oluşmasından kaynaklanmaktadır. Eğride meydana gelen ilk kırılma anına kadar panelin düzlem içi yanal yük taşıma kapasitesi 7.56 kN’a kadar ulaşmıştır. Bu aşamada panelin düzlem içi yanal yük taşıma kapasitesi 7.56 kN olarak belirlenmiştir.

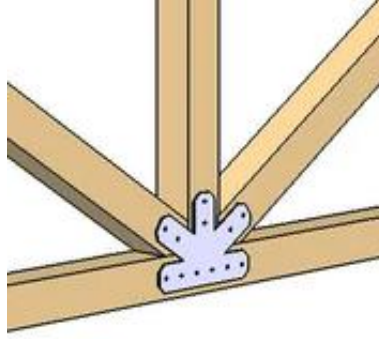


Şekil 12. Örnek Binadaki Mevcut Ahşap Taşıyıcı Panelin Analizinde Ortaya Çıkan Plastik Mafsallar

Örnek binanın mevcut ahşap taşıyıcı panelinin SAP2000 analizi sonrasında panelde oluşan mafsallar Şekil 12’de gösterilmektedir.

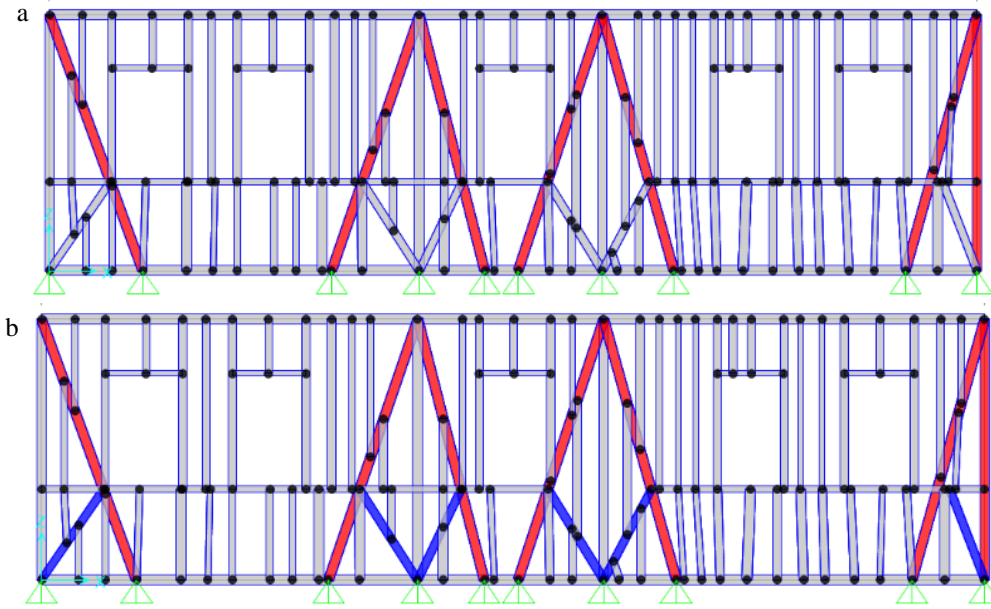
## 2.5. İncelenen ahşap taşıyıcı panelin güçlendirilmiş sayısal modeli

Mevcut ahşap karkas yapıdaki elemanların çekme kuvvetini aktarması için özel önlem alınmaksızın sadece basınç kuvvetini aktaracak şekilde inşa edilmiş olması nedeni ile SAP2000 modelinde paneldeki çapraz elemanlar sadece basınç kuvvetini aktaracak şekilde teşkil edilmiştir. TBDY-2018 bölüm 12’de panellerin tasarımına ilişkin olarak önerilen “özel önlem alınarak çekmeye çalıştırılmadığı durumlarda çapraz elemanlar sadece basınca çalışan eleman olarak göz önüne alınacaktır.” ifadesi dikkate alınarak çapraz elemanların çekme kuvvetini aktaracak şekilde özel bir imalat yapılması durumunda panelin yanal itki kapasitesinin ne kadar etkileneceği irdelenmiştir. Bu doğrultuda çapraz elemanların birleşim bağlantı bölgesinde Şekil 13’te gösterilen tarzda bir tür çelik bağlantı elemanının kullanılması ile ahşap panelde çapraz elemanların çekme kuvvetini taşıması ve aktarması sağlanabilir. Bu işlemler yapılırken koruma kurulunca tescilli yapının tarihi ve kültürel dokusuna zarar verilmeyecek şekilde yapılması gerekmekte olup her bir bağlantı bölgesi için uyumlu çelik bağlantı elemanları özel olarak imal edilmelidir. Birleşim elemanlarında kullanılan çelik malzemenin çekme kapasitesinin ahşap malzemeden çok daha yüksek olduğu bilinmektedir bu kapsamda SAP2000 modelinde panelin kapasitesini sınırlayıcı olan ahşap çaprazların çekme kapasiteleri dikkate alınmıştır.

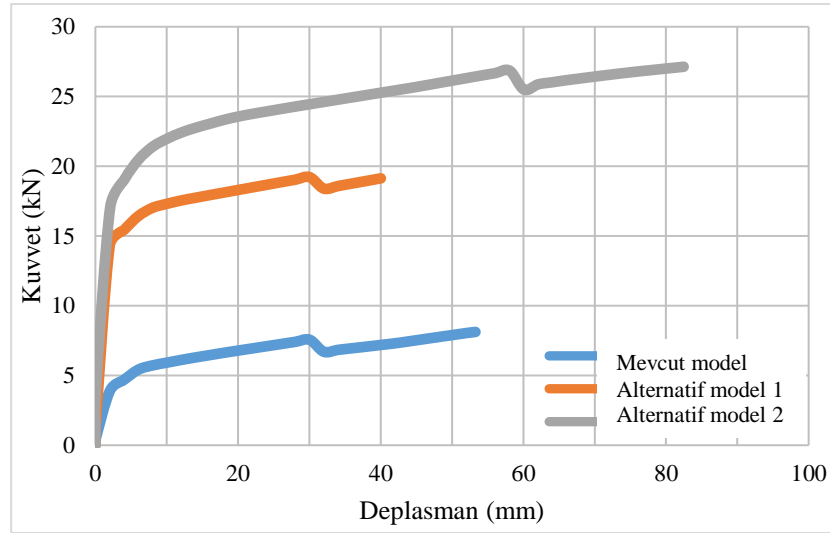


Şekil 13. Örnek Çelik Bağlantı Elemanı

Çalışma kapsamında ele alınan ahşap panelin yanal yük taşıma kapasitesini artırmak için 2 alternatif model oluşturulmuştur. Alternatif 1 modelinde mevcut panelde yer alan çapraz elemanlardan Şekil 14 (a)'da kırmızı renk ile belirtilen çapraz elemanlar çekme kuvvetini ahşap malzemenin çekme kapasitesi oranında aktaracak şekilde modellenmiştir. Alternatif 2 modelinde ise 1. alternatif modeldeki çaprazlara ilaveten panelde yer alan diğer çapraz elemanlar da (Şekil 14 (b)'de lacivert renkle belirtilen elemanlar) çekme kuvvetini taşıyacak ve aktaracak şekilde düzenlenmiştir. SAP2000 paket programı vasıtasıyla gerçekleştirilen doğrusal olmayan statik itme analizi sonucunda elde edilen bu iki modelin düzlem içi yanal itme kapasiteleri Şekil 15'te verilmiştir.



Şekil 14. Çekme Aktaran Elemanlar (a) Alternatif Model 1; (b) Alternatif Model 2



Şekil 15. Mevcut Model Ve Alternatif Modellerin Kuvvet-Deplasman İlişkisi

Şekil 15'ten mevcut paneldeki çapraz elemanların çekme kuvvetini taşıyacak ve aktaracak şekilde takviye edilmesi durumunda alternatif model 1'in tercih edilmesi ile panelin düzlem içi yanal itki kapasitesinin 2,6 kat, alternatif model 2'nin tercih edilmesi ile ise 3,5 kat arttığı görülmektedir.

### 3. Sonuçlar

Çalışma kapsamında Karabük ili, Eflani ilçesi-Karacapınar köyünde bulunan tescilli bir tarihi yapının ahşap taşıyıcı panelinin yanal itki taşıma kapasitesi SAP2000 programı yardımıyla incelenmiştir. Yapılan analizler ve doğrulama çalışmaları sonucunda edinilen bulgulara göre, anılan ahşap taşıyıcı panel sisteminin düzlem içi yanal itki kapasitesi 7,56 kN olarak tespit edilmiştir. Tescilli ahşap yapılarda, ahşap taşıyıcı panellerin mafsal noktalarının çelik levhalar kullanılarak güçlendirilmesi ile ahşap taşıyıcı panellerin düzlem içi yanal yük taşıma kapasiteleri artırılabilir, dolayısıyla ahşap yapı sisteminin dayanımının artırılması da sağlanabilmektedir. Bu kapsamda mevcut durumda sadece basınç kuvveti aktaracak şekilde düzenlenmiş olan ahşap diyagonal elemanların çekme kuvvetini de taşıyacak ve aktaracak şekilde düzenlenmesi durumunda düzlem içi yanal itki kapasitesinin değişimi alternatif 2 model kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada; TBDY-2018 Bölüm 12 Madde 12.4.2.11'de belirtildiği üzere “Özel önlem alınarak çekmeye çalıştırılmadığı durumlarda, çapraz elemanlar sadece basınca çalışan eleman olarak göz önüne alınacaktır.” ifadesi dikkate alınmış olup, analizler neticesinde elde edilen sonuçlar incelendiğinde, örnek yapı özelinde ahşap panelin düzlem içi yanal itki kapasitesini arttırmak adına çapraz elemanların çekme kuvvetini aktaracak şekilde tasarlanması ahşap panelin kapasitesine olumlu yönde etki yapmıştır. Ahşap yapıların takviye edilmesine ilişkin uygulamalarda yapının düzlem içi yanal kuvvet taşıma kapasitesini arttırmak için çelik malzemeden müteşekkil bağlantı elemanları kullanılarak takviye edilmesi mümkündür. Ahşap taşıyıcı sistemin takviyesi için önerilen 2 modelden alternatif model 1'in uygulanması ile ahşap panelin düzlem içi yanal itki kapasitesi 2,6 kat artmıştır. Diğer alternatif modelin analiz edilmesi durumunda ise panelin yanal itki kapasitesinin mevcut duruma göre 3,5 kat arttığı görülmüştür. Tescilli yapıların takviye edilmesinde; kiriş, kolon ve çapraz elemanların bağlantılarının doğru ve tam olarak yapılması ve takviye uygulamasının tarihi yapının dokusu ile uyumlu şekilde teşkil edilmesinin dikkat edilmesi gereken önemli hususların başında geldiği unutulmamalıdır.

### Referanslar

Ahmad, N., Ali, Q., & Umar, M. (2012). Simplified engineering tools for seismic analysis and design of traditional Dhajji-Dewari structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(5), 1503–1534. <https://doi.org/10.1007/s10518-012-9364-9>

Ali, Q., Schacher, T., Ashraf, M., Alam, B., Naeem, A., Ahmad, N., & Umar, M. (2012). In-plane behavior of the dhajji-dewari structural system (wooden braced frame with masonry infill). In *Earthquake Spectra* (Vol. 28, Issue 3, pp. 835–858). Earthquake Engineering Research Institute. <https://doi.org/10.1193/1.4000051>

Ambraseys, N. N., & Jackson, J. A. (2000). *Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500*.

Çakır, S. (2000). Geleneksel Karadeniz ahşap konut yapım yönteminin çağdaş teknoloji açısından değerlendirilmesi. In *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü*. Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Çalışkan, Ö., Meriç, E., & Yüncüler, M. (2019). Ahşap ve Ahşap Yapıların Dünü, Bugünü ve Yarını. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(1), 109–118. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.531012>
- Celik, A., & Birdal, F. (2017, November 2). Ahşap Taşıyıcı Sistemli Tarihi Camilerin Güçlendirilmesine Yönelik Bir Durum Çalışması. *6th International Symposium on Conservation and Consolidation of Historical Structures*. <https://www.researchgate.net/publication/321476982>
- Cruz, H., Machado, J. S., & Moura, J. P. (2001). *The use of FRP in the strengthening of timber-reinforced masonry load-bearing walls*. <https://www.researchgate.net/publication/265984253>
- Doğangün, A., Tuluk, Ö. I., Livaoglu, R., & Acar, R. (2006). Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 13(6), 981–996. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.04.011>
- Dowrick, D. J. (1987). Earthquake Resistant Design. In *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Second Edition). Wiley.
- EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Pub. L. No. Ref. No. EN 1995-1-1:2004: E, European Committee for Standardization (2004).
- EN 1995-1-2: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-2: General - Structural fire design, Pub. L. No. Ref. No. EN 1995-1-2:2004: E, European Committee for Standardization (2004).
- Köseoğlu, E. M. (2022). *Eflani-Karacapınar Köyü Geleneksel Yapılarda Taşıyıcı Sistem İncelenmesi: Tescilli Ekrem Safran Konağı Örneği*. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Meng, X. jie, Li, T. ying, & Yang, Q. shan. (2019). Lateral Structural Performance of Column Frame Layer and Dou-Gong Layer in a Timber Structure. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(2), 666–677. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-0259-4>
- Meriç, E. (2019). *Ahşap Bir Yapının TS 647 ve Eurocode 5'e Göre Analizi ve Karşılaştırılması*. Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Saatci, M., Gürsoy, Ş., & Turcan, Y. (2022). Investigation of the Effects of Different Types of Traditional Timber Load-Bearing Systems Used in Turkey on Building Behaviour. *Iconarp International J. of Architecture and Planning*. <https://doi.org/10.15320/iconarp.2022.199>
- Şahin, M. (1996). *Deprem etkilerine karşı geliştirilen pasif ve aktif kontrol sistemleri*.
- Santos, C. L., De Jesus, A. M. P., Morais, J. J. L., & Lousada, J. L. P. C. (2009). Quasi-static mechanical behaviour of a double-shear single dowel wood connection. *Construction and Building Materials*, 23(1), 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.005>
- TBDY 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Başkanlığı (2018)
- TS647 Ahşap Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları., Türk Standartları Enstitüsü (1979).
- Zhang, M., Liu, R., Li, Y., & Zhao, G. (2018). Seismic Performance of a Corroded Reinforce Concrete Frame Structure Using Pushover Method. *Advances in Civil Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7208031>