



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**HAFİF ÇELİK BİNALARDA ŞERİT
ÇAPRAZLI PANELLERİN YATAY YÜK
PERFORMANSININ NÜMERİK VE
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

Ahmet Mesut YORULMAZ

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Mesut YORULMAZ tarafından hazırlanan “Hafif Çelik Binalarda Şerit Çaprazlı Panellerin Yatay Yük Performansının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 21/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Danışman

Prof. Dr. Ali KÖKEN
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Üye

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA
Aksaray Üniversitesi

.....

Üye

Prof. Dr. Fatih Kürşat FIRAT
Aksaray Üniversitesi

.....

Üye

Doç. Dr. Günnur YAVUZ
Konya Teknik Üniversitesi

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 221104053 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet Mesut YORULMAZ
21.01.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

HAFİF ÇELİK BİNALARDA ŞERİT ÇAPRAZLI PANELLERİN YATAY YÜK PERFORMANSININ NÜMERİK VE DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Ahmet Mesut YORULMAZ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ali KÖKEN

2025, 110 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Prof. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

Doç. Dr. Günnur YAVUZ

Hafif çelik yapılar son yıllarda önemli ölçüde artmaktadır. Bu binalar diğer yapı elemanlarına göre nispeten daha hafif olması, kolay ve hızlı montajları ve tasarım esnekliği sunması gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Şerit çaprazlı panel elemanlar ise sistemin yatay yüklerini karşılamak üzere tasarlanmaktadır. Bu çalışmada hafif çelik yapılarda şerit çaprazlı panel elemanların deneyleri ve bunlara ait nümerik analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda farklı konfigürasyonlara sahip beş farklı panel eleman irdelenmiştir. Panel elemanda şerit çaprazın olup olmadığı, her iki yüzde çaprazın olup olmadığı gibi durumlarla birlikte farklı en-boy oranına sahip numuneler test edilmiştir. Bunun için tersinir çevrimsel yükleme esas alınmış olup, elde edilen sonuçlar yük-deplasman eğrileri ile gösterilmiştir. Bu eğrilere göre elemanlara ait dayanım ve rijitlik değerleri hesaplanmıştır. Bunlarla birlikte çalışmada numunelerin göçme modlarına yer verilmiş olup deneysel sonuçlar nümerik analiz sonuçları ile mukayese edilmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlara göre hesaplanan davranış katsayısı üzerinden bir değerlendirmeye yer verilmiştir. Deneysel sonuçlara göre 1:1 en-boy oranına sahip her iki yüzünde de şerit çapraz bulunan panelin diğer elemanlara göre dayanım yönünden daha iyi olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlara istinaden afet durumlarında geçici olarak yapılan ancak kalıcı binalara dönüşen hafif çelik yapılar için basit ve etkili bir güçlendirme önerisine yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Davranış katsayısı, hafif çelik yapılar, şerit çaprazlı panel, yatay yük

ABSTRACT

PhD THESIS

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF STRAP BRACED COLD FORMED STEEL SHEAR WALLS

Ahmet Mesut YORULMAZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ali KÖKEN

2025, 110 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Prof. Dr. Mehmet KAMANLI

Prof. Dr. Mehmet Emin KARA

Prof. Dr. Fatih Kürşat FIRAT

Assoc. Prof. Dr. Günnur YAVUZ

Light steel structures have significantly increased in recent years. These buildings stand out due to their relatively lower weight compared to other structural elements, ease and speed of assembly, and design flexibility. Strap-braced panel elements are designed to resist the lateral loads of the system. In this study, experiments and numerical analyses of strap-braced panel elements in light steel structures were conducted. Within this scope, five different panel elements with various configurations were examined. Specimens with and without strap braces, those with braces on both sides, and samples with different aspect ratios were tested. Reversible cyclic loading was applied, and the results were presented through load-displacement curves. Based on these curves, the strength and stiffness values of the elements were calculated. Additionally, the failure modes of the specimens were analyzed, and the experimental results were compared with numerical analysis outcomes. Furthermore, an evaluation was made based on the behavior factor calculated from the experimental results. According to the findings, the panel with a 1:1 aspect ratio and strap braces on both sides exhibited superior strength compared to other elements. Based on these results, a simple and effective strengthening proposal is presented for light steel structures, which are initially constructed as temporary buildings but later become permanent in disaster situations.

Keywords: Behaviour factor, cold formed steel, lateral loads, strap-braced walls

ÖNSÖZ

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Prof. Dr. Ali Köken'e; değerli katkıları için tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Mehmet Emin Kara ve Doç. Dr. Günnur Yavuz'a; süreç boyunca destekleri için İnşaat Mühendisi Murat Kızıllarslan'a; malzeme temini noktasında Tatmetal Çelik firmasına; profil üretimleri için İrem Çelik Yapı firmasına ve değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ahmet Mesut YORULMAZ
KONYA-2025



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	1
2. HAFİF ÇELİK YAPILAR.....	3
2.1.Dünyada ve Türkiye’de Hafif Çelik Yapı.....	3
2.2 Kaynak Araştırması	5
3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİNE GÖRE HAFİF ÇELİK YAPILAR	13
3.1. Genel Hususlar.....	13
3.2. Panellerin Tasarım Esasları	19
3.3. Yatay Yük Taşıyan Paneller İçin Uyulması Gereken Koşullar	26
4. DENEYSEL ELEMANLARININ TASARLANMASI	28
4.1. Tasarım Kriterleri	28
4.2. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panele Ait Elemanlar	31
4.3. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panel Elemanının Dayanımının Teorik Hesabı.....	32
4.4. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panel Elemanının Rijitliğinin Teorik Hesabı	37
4.5. Deney Elemanların Kesit Özellikleri ve Şematik Gösterimleri.....	40
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	45

5.1. Genel Bilgiler.....	45
5.2. Malzeme Özellikleri	45
5.3. Şerit Çaprazlı Panel Deneyleri.....	47
5.3.1. Deney Düzeneği.....	47
5.3.2. Çevrimsel Yükleme Deneyi.....	51
5.3.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması	54
5.3.4. Deney Sonuçları.....	63
5.3.4.1. W0 Deney Elemanı	64
5.3.4.2. W1 Deney Elemanı	65
5.3.4.3. W2 Deney Elemanı	70
5.3.4.4. W3 Deney Elemanı	76
5.3.4.5. W4 Deney Elemanı	80
5.3.4.6. W5 Deney Elemanı	83
5.3.4.7. Dayanım ve Rijitlik Değerlerinin Deneysel Veriler Doğrultusunda Değerlendirilmesi.....	88
5.3.4.8. Davranış Katsayısının Deneysel Veriler Doğrultusunda Değerlendirilmesi.....	90
6. NÜMERİK ÇALIŞMA.....	92
6.1. Sonlu Eleman Ağ Modeli	92
6.2. Malzeme Modeli	94
6.3. Mesnet Koşullarının ve Temas Yüzeylerinin Modellenmesi	95
6.4. Analiz Sonuçları	96
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	106
KAYNAKLAR	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	: Enkesit alanı
A_{etk}	: F_n gerilmesinde etkin alan
A_g	: Brüt enkesit alanı
A_{net}	: Net enkesit alanı
b	: Profil başlık genişliği
bp	: Kaplama genişliği
C, C_i	: Basınç kuvveti
c	: Birinci kenar berkitmesinin başlığa dik uzunluğu
cd	: İki dikme arasındaki en büyük uzaklık
D	: Dayanım fazlalığı katsayısı
d	: İkinci kenar berkitmesinin yatay uzunluğu
ds	: Profil gövde yüksekliği
dv	: Karakteristik vida çapı
dw	: Pul veya vida başı çapının büyük olanı
E	: Çelik elastisite modülü
E_d	: Deprem etkisi
F_e	: Eğilmeli burkulma sınır durumu için karakteristik basınç dayanımı
F_n	: Karakteristik basınç dayanımı
F_u	: Çelik kopma dayanımı
F_{u1}	: Vida başı ile temas eden sacın kopma dayanımı
F_{u2}	: Vida başı ile temas etmeyen sacın kopma dayanımı
F_y	: Çelik akma gerilmesi
G	: Kaplama malzemesinin kayma modülü
G	: Sabit yük
H	: Zemin yatay itkisi
h	: Panel yüksekliği
h_i	: Profil gövde yüksekliği
I	: Atalet momenti
K	: Etkin burkulma boyu katsayısı
L	: Dikmenin tutulu olmayan boyu
M_i	: Panel devrilme momenti
M_n	: Dikme eksenel basınç dayanımı
P_n	: Dikme eksenel basınç dayanımı
$P_n, \text{çapraz}$	: Çapraz elemanın eksenel kuvvet hesap dayanımı
$P_{net, \text{çapraz}}$	: Çapraz elemanın net enkesit hesap dayanımı
P_{nov}	: Sacdan vida başını karakteristik çekip-çıkarma dayanımı
P_{not}	: Sacdan vida ucunu karakteristik çekip-çıkarma dayanımı
P_{ns}	: Vidanın karakteristik kayma dayanımı
P_{ns1}	: Yan yatma sınır durumu için vidanın karakteristik kayma dayanımı
$P_{ns2,3}$	: Ezilme sınır durumları için vidanın karakteristik kayma dayanımı
P_{nt}	: Vidanın karakteristik kurtulma dayanımı
$P_n, \text{tasarım}$	: Tasarıma esas eksenel kuvvet
P_s	: Vida tasarım kayma dayanımı

P_t	: Vida tasarım çekip-çıkarma dayanımı
p	: Birleşim elemanlarının ara dikmelerdeki aralığı
Q	: Hareketli yük
R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
r	: Dikme enkesitinin atalet yarıçapı
r_p	: Profil iç büküm yarıçapı
S	: Kar yükü
s	: Birleşim elemanlarının kenar dikmelerdeki aralığı
T, T_i	: Çekme kuvveti
t	: Sac et kalınlığı
t_c	: Vida başı veya pul ile temasta olmayan sacın et kalınlığı
t_{dikme}	: Dikme et kalınlığı
$t_{kaplama}$	: Kaplama malzemesi kalınlığı
t_1	: Vida başı ile temas eden sacın et kalınlığı
t_2	: Vida başı ile temas etmeyen sacın et kalınlığı
V_d	: Duvara etkiyen toplam yatay yük
V_c	: Panel kesme kuvveti kapasitesi
v_c	: Birim boya ait karakteristik kayma dayanımı
v_d	: Birim boya ait kayma talebi
λ	: Narinlik oranı
ϕ	: Dayanım katsayısı
Ω	: Güvenlik katsayısı

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Amacı

Tüm disiplinlerde olduğu gibi, teknolojik ve akademik gelişmeler İnşaat Mühendisliği özelinde de hızla ilerlemektedir. Özellikle çelik yapılardaki gelişmeler ile birçok yapısal sorunlara ve mimari kaygılara çözüm üretilmeye devam edilmektedir. Çelik yapıları ise sıcakta haddelenmiş geleneksel yapısal çelik ve soğukta işlem görmüş hafif çelik olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür. Hafif çelik sistemler geleneksel yapısal çeliğe göre oldukça hafif ve montaj kolaylığı sağlamaktadır. Bu yüzden ülkemizde de kullanımı artmaya devam etmekte ve yakın gelecekte de bu durum rakamlarda görülecektir. Hafif çelik yapıların artan kullanım oranlarına karşın yönetmelik ve akademik çalışmaların henüz yetersiz olduğu söylenebilir. Halen birçok firma henüz şartname ve yazılımların olgunlaşmaması nedeniyle tip projeler üzerinden tasarım ve imalatlarına devam etmektedirler. Oysaki tasarımda can güvenliğini sağlamakla yükümlü olan inşaat mühendisleri ülkemiz için hafif çelik yapılar özelinde henüz olgunlaşmamış tasarım esaslarından yoksun analizler yapmak durumunda kalmaktadırlar.

Tezin amacının daha iyi anlaşılabilmesi için Hafif Çelik Yapıların avantajlarından da bahsedilmesi gerekmektedir (Sultan, 2017).

- Hafif çelik yapılar adında da anlaşılabileceği üzere hadde çelik ve betonarmeye kıyasen çok daha hafiftir. Bu durum deprem kuşağında yer alan Ülkemiz için son derece önemlidir. Zira bildiğimiz gibi yapı ağırlığı herhangi bir depremde meydana gelecek atalet kuvvetleriyle doğrudan orantılıdır.
- Çoğu zaman imalat ve nakliye diğer yapı sistemleri için sorun teşkil ederken, bu durum hafif çelik için son derece kolaydır.
- Aynı zamanda hafif çelik yapılar hızlı montaj ve kurulum kolaylığı sağlar.
- Kurulum için herhangi bir kalıp maliyeti gerektirmez.
- Elemanların galvanizli olmaları nedeniyle korozyona karşı dayanıklıdır.
- Hafif çelik yapıları doğru tasarım ve montajla modüler haline getirilip, sökülüp tekrar kurulumun yapılması mümkündür.

Çalışma kapsamında TBDY-2018 Bölüm 10'da bahsedilen “Deprem Etkisi Altında Hafif Çelik Bina Taşıyıcı Sistemlerinin Tasarımı İçin Özel Kurallar” başlığı altında bulunan hafif çelik binaların yatay yük taşıyıcı sistemlerinden olan şerit çaprazlı sistemlerin

detaylı olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma sonucunda deney elemanlarının dayanım ve rijitlikleri elde edilerek göçme modlarının incelenmesi hedeflenmektedir. Elde edilen sonuçların Ülkemiz için ilerde hazırlanması muhtemel hafif çelik yapılar özelindeki yönetmeliğe referans teşkil etmek çalışmanın en önemli amacıdır.



2. HAFİF ÇELİK YAPILAR

2.1.Dünyada ve Türkiye’de Hafif Çelik Yapı

Dünyada üretilen çelik büyük oranda yapı alanında kullanılmaktadır. Bu yapılarda kullanılan çelik çoğunlukla donatı olarak betonarme yapılarda kullanılmaktadır. Malzeme olarak çeliğin mekanik özellikleri ve geri dönüşüm imkanı göz önüne alındığında, sektörde çelik yapıların artan bir potansiyele sahip olduğu açıktır.

Hafif çelik yapılar, soğukta şekil verilmiş profillerden oluşan taşıyıcı sistemlerdir. Sac malzemenin roll-form makinelerinde çekilmesi suretiyle üretilen profiller yapı endüstrisi ile birlikte birçok endüstride kullanılmaktadır.

Soğukta şekil verilmiş profiller hafif ve hızlı olması nedenleriyle başlangıçta bölme duvarlarda ve çatı sistemlerinde kullanılmıştır. Daha sonraları ise başta Amerika olmak üzere tüm dünyada taşıyıcı elemanlar olarak kullanılmaya başlamıştır (Yıldırım, 2013).

İlk teorik ve teknik örnekleri 1930’lu yıllarda Amerika’da başlanılan hafif çelik yapılar için standart çalışmaları 1950 yıllarına kadar süregelmiş ve AISI tarafından geliştirilmiştir. Malzemenin farklı mekanik özelliklerine sahip olması bu sürenin uzamasına neden olduğu düşünülmektedir. II. Dünya savaşı sonrası ise hafif çelik yapılar ile ilgili çalışmalar Japonya, Almanya gibi ülkelerde de yapılmış ve bugünkü elde edilen sektörün temelleri 1980 yıllarını bulmuştur (Terim, 2006).

Hafif çelik özelinde ilk şartname 1946 yıllarında Amerika Demir Çelik Enstitüsü (AISI) himayelerinde Cornell Üniversitesinde hazırlanmıştır (Yu, 2000). AISI tarafından yayınlanan bu şartnamede “Load and Resistance Design Factor (LRFD)” ve “Allowable Stress Design (ASD)” olmak üzere iki farklı metoda yer verilmiştir.

Hafif çelik yapı tasarımına ilişkin uluslararası nitelikli aşağıdaki standartlar kullanılmaktadır (Yıldırım, 2013).

- Prescriptive method for residential cold formed steel framing, NASFA (North American Steel Framing Alliance),2000
- Low-rise residential construction details, NASFA (North American Steel Framing Alliance), 2000
- Load and resistance factor design specification for structural steel buildings. AISC-LRFD, 1996.

- Specification for the design of cold-formed steel structural members, AISI (American Iron and Steel Institute), 2004
- Specifications for the design, fabrication and erection of structural steel for buildings, AISC (American Institute of Steel Construction Inc.)
- Code of standard practice for cold-formed steel structural framing practice, AISI (American Iron and Steel Institute), 2006
- Specification for structural steel buildings, ANSI/AISC 360-05, AISC (American Institute of Steel Construction), 2005
- Acceptance criteria for steel deck roof and floor systems, ICC (International Code Council) evaluation service, AC 43, 2008
- Cold-formed steel details, SSMA (Steel Stud Manufacturers Association)
- Product technical information ICBO ER-4943P, SSMA (Steel Stud Manufacturers Association)
- The lightweight steel frame house construction handbook, CSSBI (Canadian Sheet Steel Building Institute), 2005
- Lightweight steel framing details, CSSBI (Canadian Sheet Steel Building Institute), 2004
- Lightweight structural framing system for commercial and residential construction, *The Bailey Group of Associated Companies*, Kanada
- CSA-S136 cold formed steel structural members limit states design
- ASTM A446, A653

Türkiye’de ise inşaat sektörü 1999 depreminden sonra atılım yapmış ve dünya standartları ve trendleri çokça incelenmiştir. Bunun sonucu olarak az katlı konutlara rağbet artmıştır. Hafif çelik yapılar ise az katlı konutlardaki bu artışın alternatif yapımı olarak tezahür etmiştir.

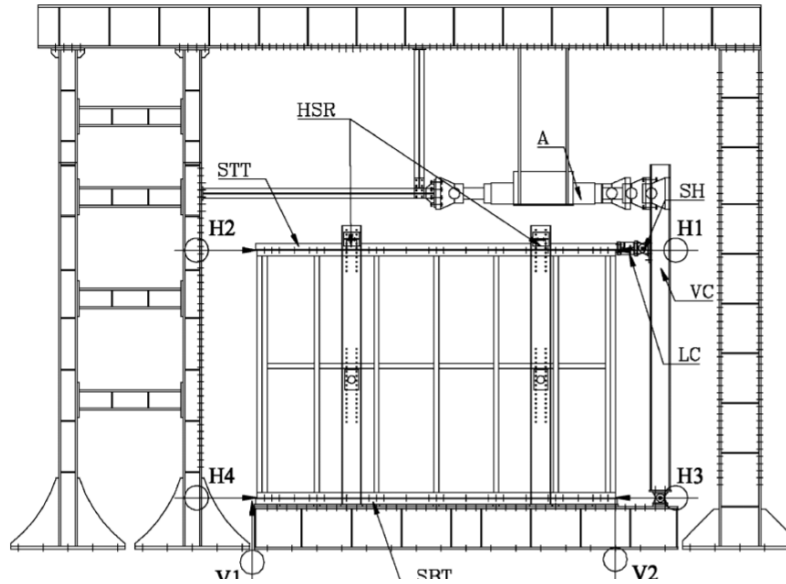
Sistemin hafifliği, hızlı üretim imkanı, daha az atık ve temiz şantiye koşulları nedenleriyle talep sürekli artmaktadır. Hafif çelik yapılar için sektörde depreme dayanıklı yapılar olarak pazarlansa da mimari esneklikler yönüyle de öne çıkmaktadır.

Ülkemizde yapısal çeliğin kullanımı çoğunlukla sanayi yapılarda görülmektedir. Bu anlamda projelendirme ve uygulama noktasında oldukça tecrübeli firmalar ve teknik elemanlar mevcuttur. Bu tecrübenin hafif çelik yapı endüstrisine de aktarılmaya

başlandığı görülmektedir. Şüphesiz bu alanda yapılacak olan akademik çalışmalar buna öncülük edecektir.

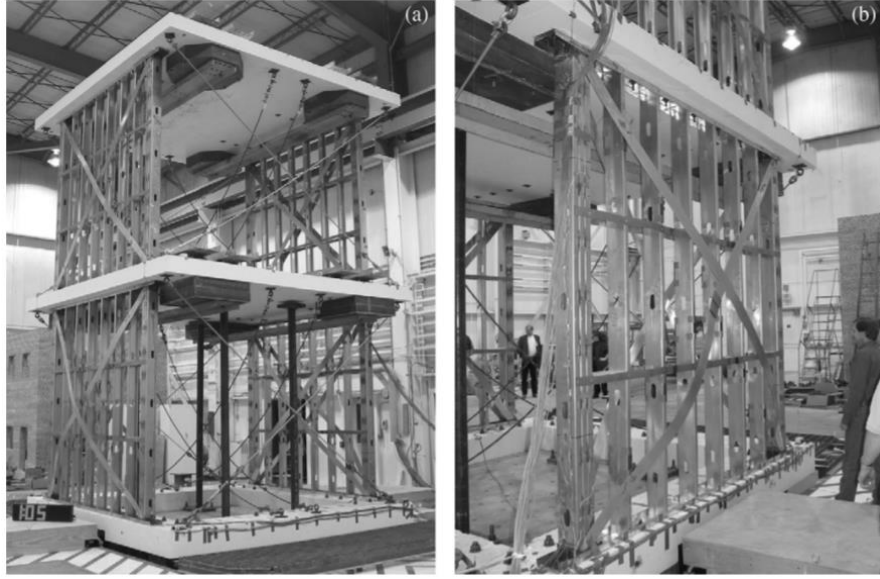
2.2 Kaynak Araştırması

Lülöp ve Dubina (2004) tarafından yapılan çalışmada sürekli artan konut ihtiyacının hafif çelik yapılarla karşılanabileceği vurgulanarak, kaplamalı panellerin çevrimsel ve monotonik yüklemeleri altında alçıpan ve OSB kaplamaların deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler kesme kuvveti aktaran ankrajların önemini bir kez daha göstermiştir. Ayrıca kenar dikmelerin eksenel yük kapasitelerinin artırılması hususu öne çıkan başka bir sonuçtur. Göçme modlarının genelde birleşim bölgelerinde görülmesi ile birleşim tasarımlarının detaylandırılması panel kapasitesinin kullanmak adına son derece önemli görülmüştür. Şekil 2.1’da ilgili çalışmaya ait deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.1. Deney düzeneği görünümü

Kim ve diğ. (2006) tarafından yapılan çalışmada sarsma tablasında tam ölçekli iki katlı bir hafif çelik yapının sonuçları paylaşılmıştır. Özellikle şerit tipi çaprazlar çevrimsel yüklemeler altında sünek davranış sergilemişlerdir. Ancak dikmelerde burkulmalar gözlemlenmiştir. Deneysel verileri desteklemek adına nonlinear analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler deneysel verileri destekleyerek doğru tasarımla hafif çelik yapıların deprem yüklerini güvenli bir şekilde karşılayabileceği belirtilmiştir. Şekil 2.2’de çalışılan gerçek boyutlu numunelerin deney sonrası şerit çaprazların deforme olmuş hali yer almaktadır.



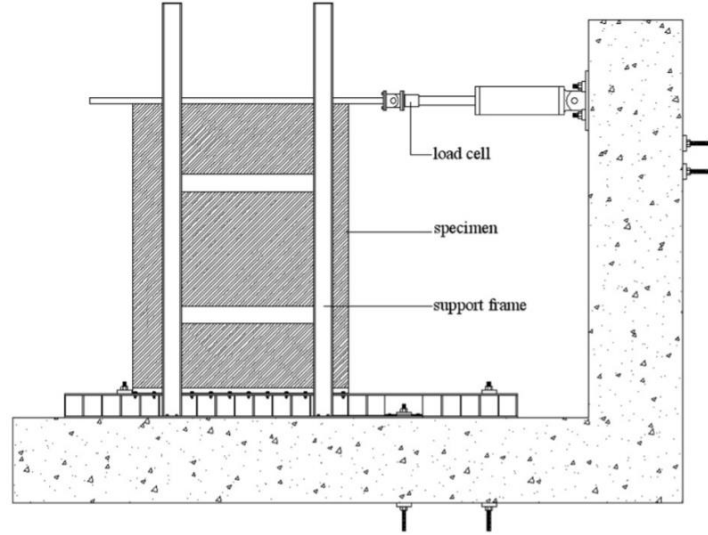
Şekil 2.2. Test sonucu şerit çaprazların deforme olmuş hali.

Stojadinovic ve Tipping (2008) tarafından yapılan çalışmada, sinüs oluklu sac üzerinde deneyler yapılmış ve deney sonuçlarına göre dayanım fazlalığı katsayısı (D) 2.5 olarak, deprem yükü azaltma katsayısı (R) 5.5 olarak önerilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonunda sinüs oluklu sac kaplama için karakteristik tasarım tablosuna yer verilmiştir. Şekil 2.3’de test düzeneği yer almaktadır.



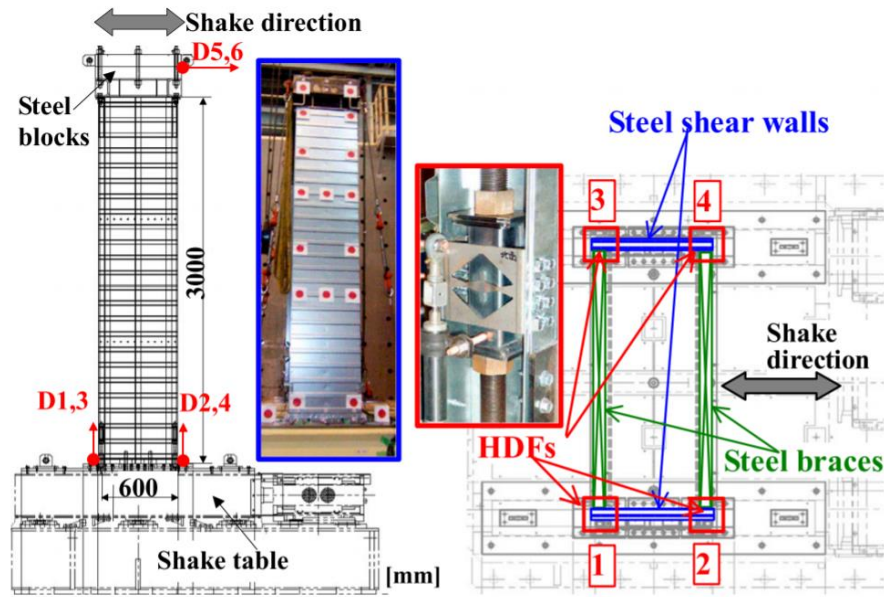
Şekil 2.3. Test düzeneği görünümü

Pan ve Shan (2011) tarafından yapılan çalışmada, 1:1 ve 2:1 olmak üzere iki farklı en-boy oranına odaklanılmışlardır. Bunun için alçıpan, kalsiyum silikat panel ve OSB olmak üzere üç farklı değişik malzeme 9 mm ve 12 mm olarak test edilmiştir. Her bir numune için kapasite dayanımı, rijitlik, enerji tüketimi ve süneklik oranları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Sonuç olarak süneklik oranları birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 2.4’de test düzeneği gösterilmiştir.



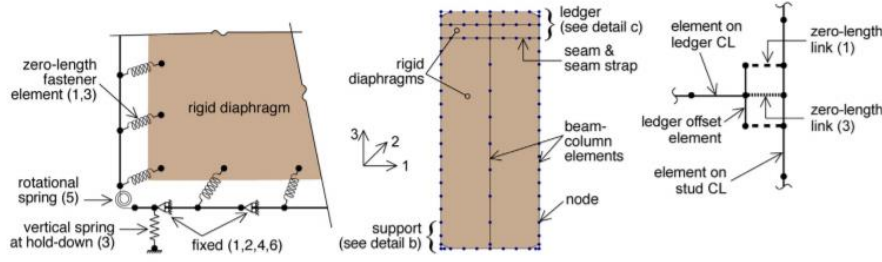
Şekil 2.4. Test düzeneği görünümü

Fuminobu ve Yoshimichi (2013) tarafından yapılan çalışmada hafif çelik yapılar için bir hasar kontrol sistemi önerilmiştir. HDF adı verilen yatay deplasmanı kontrol eden bu sistem elemanların hasar görmesini azaltmayı hedeflemektedir. Bunun için tek katlı gerçek boyutlu numunelerin deneyleri sarsma tablasında gerçekleştirilmiştir. Çeşitli parametreler bağlı olarak HDF’lerin plastikleşmesinin kayma gerilmelerini nispeten azalttığı görülmüştür. Şekil 2.5’de ilgili çalışmada bahsedilen sistemin genel görünümü yer almaktadır.



Bucmys ve Saucuenas (2013) tarafından yapılan çalışmada, hafif çelik yapıların birleşimleri üzerinde durulmuştur. Kiriş-kiriş, kiriş-kolon ve makas bağlantı detaylarının göçme modları incelenmiştir. Birleşimlerin rijitliğini etkileyen ana faktörün cıvata delikleri olduğu belirtilerek, bu durumun yarı rijit olarak değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Şekil 2.6’da deney numunelerin birine ait kiriş kolon birleşimindeki yerel burkulma gösterilmiştir.

Buonopane ve Bian (2015) tarafından yapılan çalışmada, hafif çelik panel sistemlerin simetrik bir yay elemanı olarak modellenmesiyle nonlinear analiz modeli üstünde durulmuştur. İlgili çalışmalar OpenSees programı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yük-deplasman eğrileri elde edilerek göçme modları irdelenmiştir. Deneysel ve sayısal modelleme sonuçları birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Şekil 2.7’de çalışmanın temelini oluşturan sayısal modellemeye ait genel görünüme yer verilmiştir.



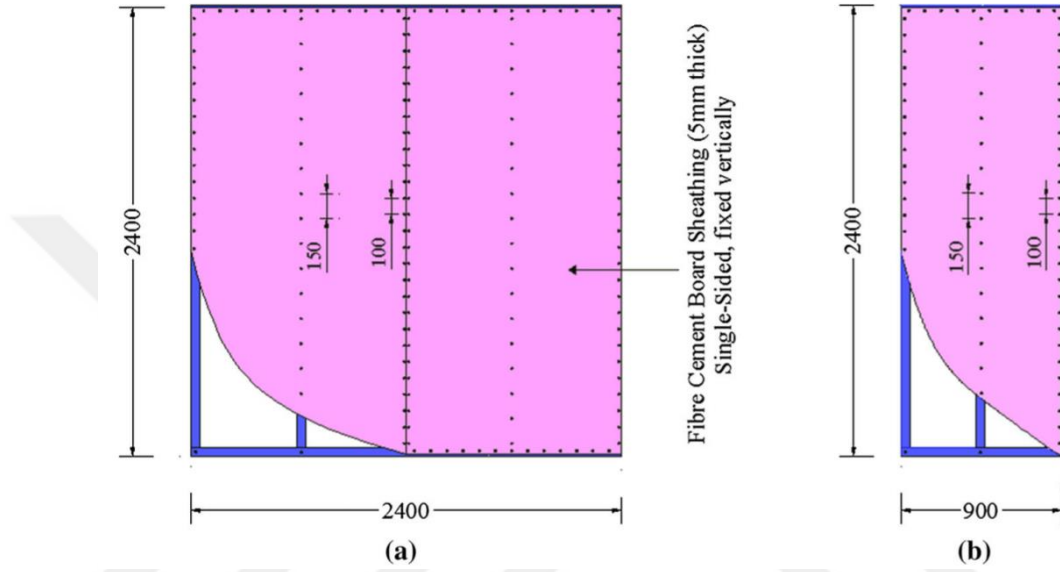
Şekil 2.7. Yay modeli genel görünümü

Mirzaei ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada AISI şartnamesine göre şerit tipi çaprazlı hafif çelik yapılar AISI S213 ve revize hali olan AISI S400 standartlarına göre irdelenmişlerdir. Her iki standart da kapasiteye dayalı tasarım prosedürü kullanarak şerit elemanın sadece çekme altında tasarımına müsaade ederek bunların inelastik sigorta elemanı olarak kullanılmasını öngörmektedir. Deneysel çalışmalar bu durumun düşük en-boy oranına sahip elemanlarda geçerli olduğunu, yüksek en-boy oranına sahip elemanlarda büyük momentlerin ortaya çıktığı ve şerit çaprazların akmadan farklı göçme modları görülmüştür (Şekil 2.8). Yapılan çalışmada oluşan büyük momentler için kapasite tasarımının ve sigorta elemanın geçerliliği için basit bir metot tanımlanmıştır.



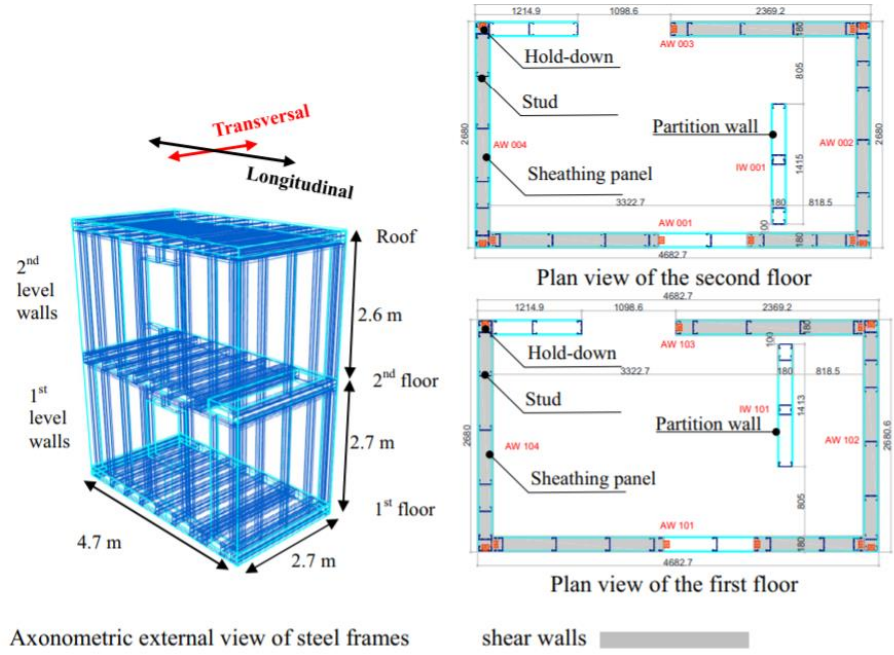
Şekil 2.8. Şerit çapraz bağlantı detayı

Shahi ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada önemli bir konu olan performansa dayalı tasarımı hafif çelik yapılar için değerlendirilmiştir. Bunun için Doğrudan Deplasman Tabanlı Tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Yapılan deneylerde quasi-statik çevrimsel yükleme presedürleri kullanılmıştır. Elemanların yük deplasman eğrileri çıkarılarak her bir parametreye bağlı olarak zaman tanım alanında nonlineer analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar mukayese edilmiştir. Şekil 2.9'da kullanılan panel konfigürasyonu yer almaktadır.



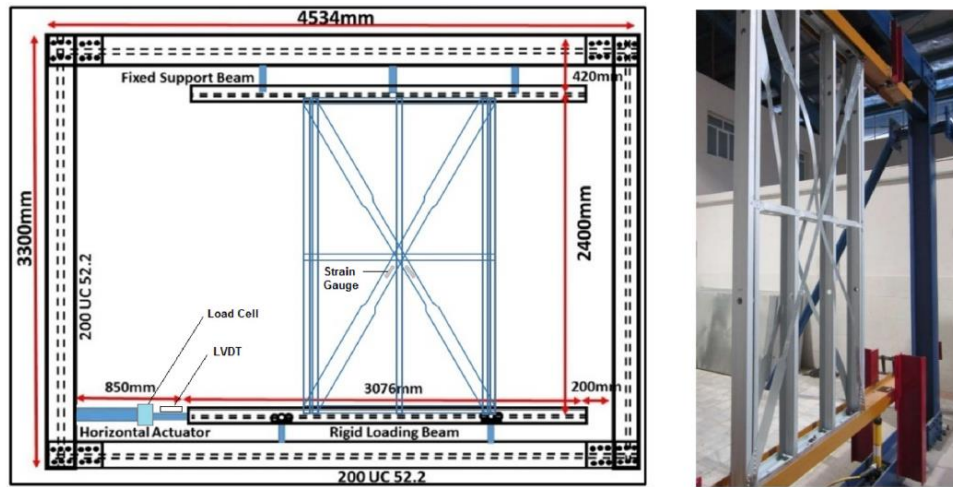
Şekil 2.9. Çalışmadan kullanılan panel konfigürasyonu

Fiorino ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada, dinamik özellikleri ve sismik tepkileri değerlendirmek için Napoli Üniversitesi ELISSA projesi kapsamında bir tanesi sadece taşıyıcı sistemden oluşan, diğeri ise mimari elemanların da yer aldığı tam ölçekli iki bina tasarlanmış ve sarsma tablasında testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar periyot ve sönüm oranı temel alınarak açıklanmaya çalışılmış, yapısal olmayan elemanların sisteme katkısının daha detaylı araştırılması ihtiyacı vurgulanmıştır. Şekil 2.10'de test edilen numunenin aksonometrik ve plan görüntüsü yer almaktadır.



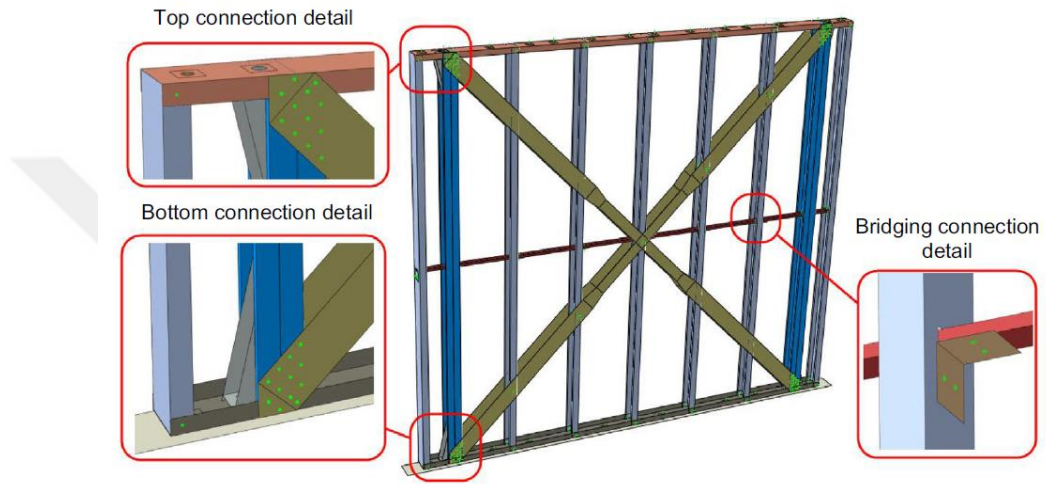
Şekil 2.10. Genel görünüm

Kasaeian ve diğ. (2020) tarafından yapılan çalışmada, şerit çaprazlı panel elemanların deneylerine yer verilmiştir. Bunun için farklı konfigürasyonlarda 6 adet deney yapılmıştır (Şekil 2.11). Sonuç olarak oluşan deformasyonlara yer verilmiş ve eleman kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre ana hasar mekanizması şerit çaprazların akması olan elemanlar oldukça sünek davranış sergilemiştir. Ancak şerit çaprazın kalınlığının artması sünek davranışı olumsuz olarak etkilemiştir.



Şekil 2.11. Deney düzeneği görünümü.

Papargyriou ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, şerit çaprazlı panel elemanların yatay yük altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla plastik malzeme, başlangıç geometrik kusurları ve ikincil momentler dikkate alınarak ayrıntılı bir sayısal model geliştirilmiş ve detayları şekil 2.12’de yer verilen bu model daha önce yapılan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Doğrulanmış bu model referans kabul edilerek parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Söz konusu bu çalışmada, dikme sayısı, şerit çapraz kalınlığı, başlık kalınlığı gibi parametreler ele alınmış ve kapasite sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.



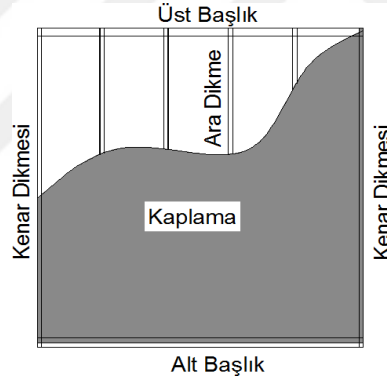
Şekil 2.12. Geliştirilen sonlu eleman model deteyları.

3. TÜRKİYE BİNA DEPREM YÖNETMELİĞİNE GÖRE HAFİF ÇELİK YAPILAR

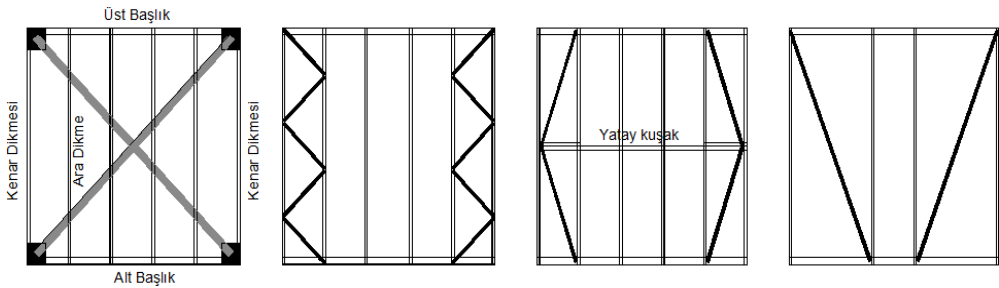
3.1. Genel Hususlar

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine göre hafif çelik binaların taşıyıcı sistemleri, depreme karşı davranışları bakımından iki sınıfa ayrılmıştır. (Afet ve Acil Durum Başkanlığı, 2018)

1. Deprem etkilerinin tamamının vidalı, bulonlu OSB veya kontrplak duvar panelleri ile karşılandığı hafif çelik binalar süneklik düzeyi yüksek sistemler olarak sınıflandırılmıştır. (Şekil 3.1)
2. Deprem etkilerinin tamamının çaprazlı paneller veya alçı levhalar içeren kaplamalı paneller ile karşılandığı hafif çelik binalar süneklik düzeyi sınırlı sistemler olarak sınıflandırılmıştır. (Şekil 3.2)



Şekil 3.1. Süneklik düzeyi yüksek sistemler.



Şekil 3.2. Süneklik düzeyi sınırlı sistemler.

TBDY-2018'e göre soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların malzemesi, TS EN 10025, TS EN 10346 ve TS EN ISO 1461 ile tanımlanmış, et kalınlıkları 0.45 mm ile 16 mm arasında değişen çelik yassı mamullerin şekillendirme makinelerinde bükülmesi ile

elde edilen yapı malzemesi olarak tarif edilmiştir. Bu çelik elemanların malzeme özellikleri aşağıdaki minimum koşulları sağlamak zorundadır.

-Minimum akma gerilmesi 235 MPa olmalıdır.

-Kopma dayanımının akma gerilmesine oranı en az 1.08 olmalıdır.

-Kopma birim uzama oranı minimum %10 olan malzemeler normal sünek malzeme, kopma birim uzama oranı minimum %16 olan malzemeler ise yüksek sünek malzeme olarak adlandırılırlar.

-Normal sünek malzemeler sadece aşık, cephe kuşakları ve taşıyıcı olmayan dikmelerde kullanılabilirler.

-Birleşimlerde matkap uçlu vidalar ve/veya bulonlar kullanılacaktır. Bu vidalar, şekil 3.3’de verilen minimum değerleri sağlamak zorundadır.

Uluslararası No.	Vida Çapı (mm)	Minimum Tork Dayanımı (Nm)	Minimum Rockwell Yüzey Sertliği	Minimum Rockwell Çekirdek Sertliği
6	3.5	2.7	C 50	C 32
8	4.2	4.7		
10	4.8	6.9		
12	5.5	10.4		
1/4"	6.3	16.9		

Şekil 3.3.Matkap uçlu vidalar için koşullar (TBDY-2018)

Yönetmelikte anılan enkesit koşulları aşağıda belirtilmiştir:

- Soğuk şekillendirilmiş profillerden oluşan elemanlarda başlık genişliği/başlık et kalınlığı, gövde yüksekliği/gövde et kalınlığı ve kenar berkitmesi uzunluğu/kenar berkitmesi et kalınlığı oranlarına ilişkin sınır değerler şekil 3.4’de belirtilmiş olup bunun yanında kenar berkitmelerinin etkin katkısının sağlanması için denklem 3.1 ve 3.2’de belirtilen koşullara da uyulması gerekmektedir.

$$0,20 \leq c/b \leq 0,60 \quad (3.1)$$

$$0,10 \leq d/b \leq 0,30 \quad (3.2)$$

- $c / b < 0.20$ veya $d / b < 0.10$ olması durumunda kenar berkitmelerinin katkısı gözardı edilecek olup $c = 0$ veya $d = 0$ olarak alınması gerekmektedir.

-Profillerin iç büküm yarıçapları $r_p < 5t$ ve $r_p < 0,1b$ olması durumunda, bunların enkesit özelliklerine etkisi, $r_p = 0$ alınarak ihmal edilecektir.

- Profillerin gövdelerinde açılacak delikler mutlaka gövdenin düşey eksenini ortalayacaktır.

- Profildeki dairesel delik çapı R_d ve profilin düz olan gövde yüksekliği, h olmak üzere $R_d / h < 0,70$ olacaktır.

- Delik açılması durumunda $h / t < 200$ enkesit koşulu sağlanacaktır.

- Delikler arasındaki uzaklık eksenden eksene en çok 600 mm olacaktır.

- Delikler arası net uzaklık en az 450 mm olacaktır.

- Dairesel deliklerin çapı en çok 150 mm olacaktır.

- Delikler profillerin ucundan en az 300 mm net uzaklıkta açılacaktır.

- $R_d / h < 0,38$ olması durumunda, dayanım hesaplarında deliğin etkisi ihmal edilebilir.

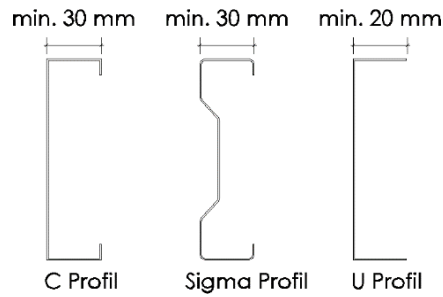
- Dairesel olmayan deliklerde, delik yüksekliği en fazla 65 mm, delik boyu ise en fazla 115 mm olacaktır.

- Dairesel olmayan deliklerde köşelerin iç büküm yarı çapları $r_d > 2t$ koşulunu sağlayacaktır.

-Profillerin minimum başlık genişlikleri ise Şekil 3.5’de belirtilen minimum değerleri sağlamak zorundadır.

<i>ENKESİT ÖZELLİKLERİ</i>		<i>Sınır Değerler</i>
		$b/t < 50$
		$b/t < 60$ $c/t < 50$
		$b/t < 90$ $c/t < 60$ $d/t < 50$
		$b/t < 500$
		$h_i/t < 500 \cdot \sin(\phi)$ $45 < \phi < 90$

Şekil 3.4. Enkesit koşulları.



Şekil 3.5. Profillerin minimum başlık genişlikleri.

Tüm çağdaş yönetmeliklerde olduğu gibi Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğinde de soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları ve birleşimleri, yapının işletme ömrü boyunca kendinden beklenen tüm fonksiyonları belirli bir *güvenlik* altında yerine getirebilecek düzeyde dayanım, stabilite ve rijitliğe sahip olması gerekmektedir. Taşıyıcı

sistem tasarımında (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018) tarafından yayınlanan yönetmelikte tanımlanan Güvenlik Katsayıları ile Tasarım (GKT) veya Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) yöntemlerinden biri kullanılabilir. GKT yönteminde kullanılacak yük birleşimleri denklem 3.3 ve 3.4’de belirtilmiştir. Aynı şekilde YDKT yönteminde kullanılması gereken yük birleşimleri ise denklem 3.5 ve 3.6’da yer verilmiştir.

$$G + 0,75Q + 0,75S + 0,75(0,7Ed) \quad (3.3)$$

$$0,6G + 0,7E_d + H \quad (3.4)$$

$$1,2G + Q + 0,2S + E_d^{(H)} + 0,3E_d^{(Z)} \quad (3.5)$$

$$0,9G + H + E_d^{(H)} - 0,3E_d^{(Z)} \quad (3.6)$$

Deprem hesabı eşdeğer deprem yükü yöntemi kullanılarak yapılacak olup, birbirine dik deprem doğrultularında binaya etkiyen depremler için ayrı ayrı uygulanacaktır. Bu amaçla toplam eşdeğer deprem yükü denklem 3.7’ye göre bulunacaktır. Burada bahsedilen m_t binanın denklem 3.8’e göre hesaplanan toplam kütlelerine tekabül etmekte olup, m_i i’nci kat döşemesinin toplam kütleleridir.

$$V_{tE}^{(X)} = m_t \cdot S_{aR} \cdot (T_p^X) \geq 0,04 \cdot m_t \cdot I \cdot S_{DS} \cdot g \quad (3.7)$$

Bununla birlikte elastik tasarım spektral ivmesinin hesabı için $T=0,2s$ alınarak denklem 3.7’ye göre bulunan eşdeğer deprem yükü esas alınacaktır. Eşdeğer deprem yükü kaplama malzemelerinin veya çaprazlı panellerin birim boya ait yatay yük taşıma kapasitelerine ve plandaki konumlarına bağlı olarak taşıyıcı sistem elemanlarına dağıtılması gerekmektedir. Bu analizlerde ve boyutlandırmada uygulanacak Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R) ve Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) şekil 3.6’da verildiği gibidir.

$$m_t = \sum_{i=1}^N m_i \quad (3.8)$$

Deprem yüklerinin binanın tabanında meydana gelen toplam devrilme momenti denklem 3.9’a göre hesaplanacaktır.

$$M_o^{(X)} = \sum_{i=1}^N F_{iE}^{(X)} \cdot H_i \quad (3.9)$$

Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulandığı tüm binalarda denklem 3.7’de yer alan ve gözönüne alınan (X) deprem doğrultusunda binanın hakim doğal titreşim periyodunu ifade eden $T_p^{(X)}$ daha kesin bir hesap yapılmadıkça denklem 3.10’a göre bulunacaktır. Burada i’nci kata etkiyen fiktif yükü gösteren $F_{fi}^{(X)}$ herhangi bir değer (örneğin 100) konularak elde edilmesi gerekmektedir. Binanın denklem 3.10’dan hesaplanan hakim doğal titreşim periyodu $T_p^{(X)}$ deprem hesabında gözönüne alınacak en büyük değeri denklem 3.11’de verilen T_{pA} periyodunun 1,4 katından daha fazla olmaması gerekmektedir. Ayrıca DTS=1, 1a, 2, 2a ve $BYS \geq 6$ olan binalarda ve DTS =3, 3a, 4, 4a olan tüm binalarda hakim doğal titreşim periyodu denklem 3.10’dan hesaplanmaksızın doğrudan denklem 3.11’de verilen ampirik T_{pA} periyodu olarak alınabilir. Burada taşıyıcı sistemi sadece betonarme çerçevelerden oluşan binalarda $C_t=0,1$, çelik çerçevelerden veya çaprazlı çelik çerçevelerden oluşan binalarda $C_t=0,08$, diğer tüm binalarda ise $C_t=0,07$ alınması gerekmektedir.

$$T_p^{(X)} = 2\pi \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N m_i d_{fi}^{x^2}}{\sum_{i=1}^N F_{fi}^{(X)} d_{fi}^{(X)}} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

$$T_{pA} = C_t \cdot H_N^{3/4} \quad (3.11)$$

Bina Taşıyıcı Sistemi	Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı R	Dayanım Fazlalığı Katsayısı D	İzin Verilen Bina Yükseklik Sınıfları BYS
D. HAFİF ÇELİK BİNA TAŞIYICI SİSTEMLERİ			
D1. Süneklik Düzeyi Yüksek Taşıyıcı Sistemler			
Deprem etkilerinin tamamının vidalı, bulonlu sac, OSB veya kontrplak (plywood) duvar panelleri ile karşılandığı süneklik düzeyi yüksek hafif çelik binalar	4	2	BYS = 8
D2. Süneklik Düzeyi Sınırlı Taşıyıcı Sistemler (Bkz.4.3.4.1)			
Deprem etkilerinin tamamının alçı levhalar içeren kaplamalı veya çaprazlı panellerle karşılandığı süneklik düzeyi sınırlı hafif çelik binalar	3	2	BYS = 8

Şekil 3.6. Hafif çelik bina taşıyıcı sistemler için R ve D katsayıları (TBDY-2018, Tablo 4.1)

3.2. Panellerin Tasarım Esasları

Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerle oluşturulan paneller için tasarım yaklaşımı, bir kattaki toplam kesme talebinin o kattaki panellerin görelî taşıma kapasitelerine göre dağılımını esas almaktadır. Buna göre;

-Bir panelin kesme kapasitesi, bu panele gelen kesme kuvveti talebinden daha büyük olacaktır.

-Dikmelerin aksenel kuvvet taşıma kapasiteleri, dikmelere etkiyen aksenel kuvvetlerden daha büyük olacaktır.

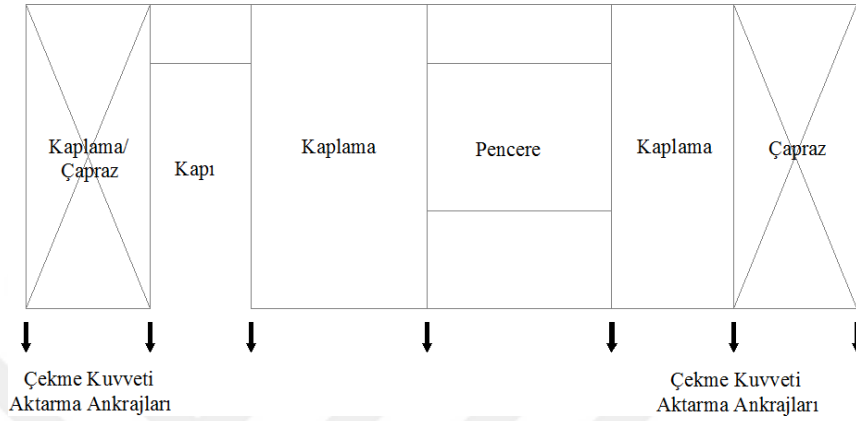
-Kesme kuvveti aktaran ankrajlar ile temel ve kat bağlantı ankrajlarının tasarımı, taban kesme kuvvetini, kat kesme kuvvetini ve devrilme momentini karşılayacak şekilde yapılacaktır.

Kaplamalı tipik bir kayma paneli şekil 3.7’de yönetmelikte olduğu şekliyle gösterilmiştir. Panelin kayma rijitliği ve dayanımı birleşim elemanlarının aralığına bağlı olarak belirlenir.

Kaplamanın taşıyıcı olarak ele alınabilmesi için en büyük dikme aralığı 625 mm olması gerekmektedir. Taşıyıcı dikmeler, et kalınlığı en az 0.8 mm, gövde yüksekliği en az 70 mm olan C veya Σ enkesitli elemanlardan oluşacaktır ve bu elemanların kenar berkitme boyu en az 9 mm olacaktır. Daha farklı bir enkesit kullanılması durumunda, kullanılan enkesitin hesap yükünü güvenli olarak taşıdığı gösterilmesi gerekmektedir.

Panel alt ve üst başlığı, en küçük et kalınlığı 0.8 mm olan U veya C enkesitli elemanlardan oluşacak olup daha farklı enkesit kullanılması durumunda, seçilen enkesitin hesap yükünü güvenli olarak taşıdığı gösterilmesi gerektiği belirtilmektedir.

Tam kat yüksekliğindeki taşıyıcı panel bölümlerinin kesme kuvveti karşılama kapasitesine sahip olduğu kabul edilir. Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi, her taşıyıcı panel bölümü için, kenar dikmelerde çekme kuvveti aktarma ankrajları kullanılacaktır. Ayrıca, kaplamalı panel ve çaprazlı panellerin yan yana kullanılması durumunda da panellerin ortak kenar dikmelerinde en az bir adet çekme kuvveti aktarma ankrajı bulunacaktır.



Şekil 3.9. Çekme kuvveti aktarma ankrajları.

Paneldeki kesme kuvveti talebi, seçilecek tasarım yöntemine göre GKT yöntemi için denklem 3.12 ve YDKT yöntemi için denklem 3.13'den uygun olanı seçilmek suretiyle hesaplanan kesme kuvveti kapasitesinden küçük olması gerekmektedir.

$$V_c = \frac{1}{\Omega} \cdot V_c \cdot \sum l_i \quad (3.12)$$

$$V_c = \phi v_c \cdot V_c \cdot \sum l_i \quad (3.13)$$

Birim boya ait karakteristik kayma dayanımı olan V_c şekil 3.12'de yer verilmiş olup; deprem durumu için ilgili katsayılar ise şekil 3.11'den alınarak denklem 3.12 ve 3.13'de kullanılacaktır.

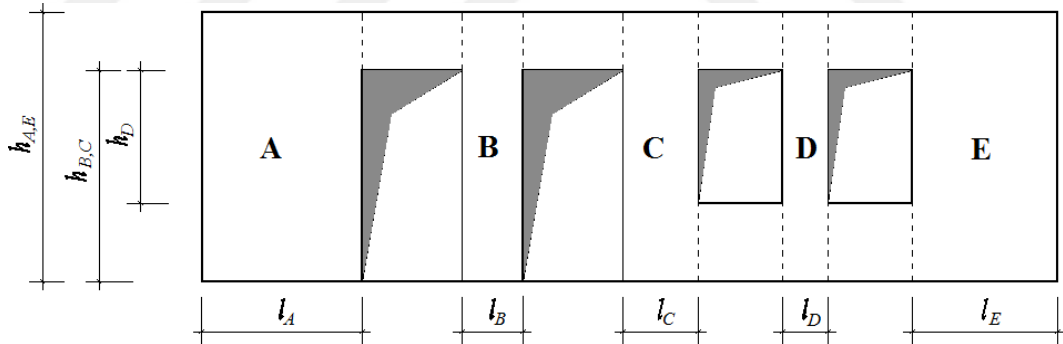
Tasarım Yöntemi		Deprem
Güvenlik Katsayıları ile Tasarım Yöntemi (GKT)	Ω	2.5
Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım Yöntemi (YDKT)	ϕ	0.6

Şekil 3.11. Güvenlik ve dayanım katsayıları (TBDY-2018, Tablo 10.4)

Panel Malzemesi	h/l	Panel kenar dikmeleri için/ ara dikmeler için kaplama vida aralıkları (mm)				Dikme minimum et kalınlığı (mm)	Minimum vida çapı (mm)
		Birim boya ait kayma dayanımı (kN/m)					
12.5 mm Alçı Levha	2:1	200/300	150/300	100/300	100/100		
		2.7	3.1	3.4	-	0.9	3.5
12 mm kontrplak	2:1	150/300	100/300	75/300	50/300		
		11.4	14.4	-	-	0.9	4.2
		13.0	19.4	25.9	32.0	1.1	4.2
11 mm OSB	2:1	150/300	100/300	75/300	50/100		
		10.2	13.4	-	-	0.9	4.2
		12.0	18.0	22.6	30.0	1.1	4.2
		18.0	27.0	33.7	45.0	1.4	4.8
		150/300	100/300	75/300	50/300		
0.46 mm sac	2:1	5.7	-	-	-	0.9	4.2
0.68 mm sac	4:1		14.6	15.8	17.1	0.9	4.2

Şekil 3.12. Panellerin birim boya ait kayma dayanımları (kN/m) (TBDY-2018, Tablo 10.5)

Tasarımda genişliği $\ell \geq 30$ cm olan ve yükseklik/genişlik oranı $h / \ell \leq 4$ koşulunu sağlayan panellerin katkısı dikkate alınması gerekmektedir. Yükseklik/genişlik oranı $2 \leq h / \ell \leq 4$ aralığında olan panellerin birim boya ait kayma dayanımı Şekil 3.12’den elde edilen değerler $2\ell / h$ oranı ile çarpılması suretiyle bulunacaktır. (Şekil 3.13)



Şekil 3.13. Panel yükseklik/genişlik oranı

Panellerin birim boya ait kayma dayanımları ve bu değerlerin elde edilmesinde kullanılan minimum koşullar Şekil 3.12’de verilmiş olup; verilen bu değerler panelin tek yüzüne kaplama yapılmasına karşı gelen değerlerdir ve aşağıda belirtilen kurallara uyulması gerekmektedir.

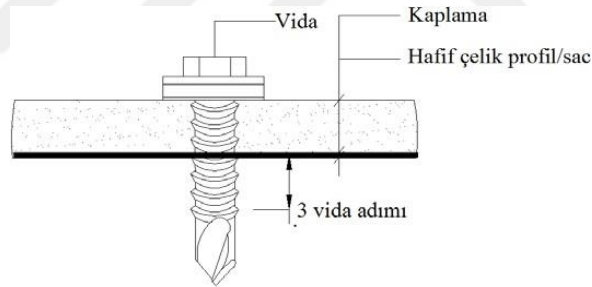
- Panelin aynı yüzüne birden fazla kaplama uygulanması durumunda, sadece panel yüzü ile temas eden malzeme için Şekil 3.12’de verilen dayanım değerleri kullanılacaktır.

-Panelin her iki yüzüne aynı kaplamanın, aynı vida yerleşimi ile kaplanması durumunda, şekil 3.12’de tek yüz için verilen birim boya ait kayma dayanım değerleri her iki yüz için toplanarak kullanılır. Bu durumda, panel kenar dikmelerinin, alt ve üst başlık profillerinin oluşan kayma kuvvetini güvenli bir şekilde karşıladığı hesapla gösterilmesi gerekmektedir.

- Panelin iki yüzünde farklı kaplama malzemesi kullanılması durumunda, birim boy için kayma dayanımının hesabı için, şekil 3.12’de verilen dayanım değerleri kullanılarak, küçük kayma dayanımına sahip kaplama malzemesi dayanımının 2 katı ile büyük kayma dayanımına sahip kaplama malzemesinin kayma dayanımı karşılaştırılacak ve bunlardan büyük olan değer alınacaktır.

- Panel yapımında kullanılacak minimum vida çapları aynı şekilde (şekil 3.12) verilmiştir.

- Panellerin kaplamaları yapılırken birleşim vidalarının kaplamanın içine gömülmesine izin verilmeyecek ve vidaların profil/sac içine minimum 3 vida adımı ilerlemesi sağlanacaktır. Uygulamada, vida önce kaplamaya sonra sac malzemeye girmesi istenmektedir. (şekil 3.14)



Şekil 3.14. Birleşim vida adımı

Dikme tasarımında ise yatay yüklerden dolayı kenar dikmelerde oluşan eksenel kuvvetler denklem 3.14 ve 3.15’e göre hesaplanacaktır. (şekil 3.15)

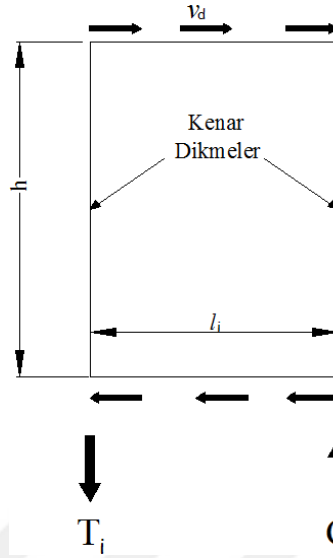
$$M_i = v_d \cdot l_i \cdot h \quad (3.14)$$

$$T_i = C_i = \frac{M_i}{l_i} \quad (3.15)$$

Bu şekilde hesaplanan eksenel kuvvetler ve düşey yüklerden oluşan eksenel kuvvetlerin toplamı altında dikme tasarımı YDKT yöntemine göre denklem 3.16’ya; GKT yöntemine göre ise denklem 3.17’ye göre yapılmalıdır.

$$P_n = 0,85 \cdot A_{etk} \cdot F_n \quad (3.16)$$

$$P_n = 0,56 \cdot A_{etk} \cdot F_n \quad (3.17)$$



Şekil 3.15. Kenar dikmeler.

Dikmenin F_n karakteristik basınç dayanımı denklem 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22 ile hesaplanacaktır.

$$F_n = (0,658^{\lambda_c^2}) \cdot F_y \quad (\lambda_c \leq 1.5 \text{ için}) \quad (3.18)$$

$$F_n = \left(\frac{0,877}{\lambda_c^2}\right) \cdot F_y \quad (\lambda_c > 1.5 \text{ için}) \quad (3.19)$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{F_y}{F_e}} \quad (3.20)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{(KL/r)^2} \quad (3.21)$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (3.22)$$

Yönetmelikteki bir diğer önemli husus birleşimlerin tasarımlarıdır. Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar vida ve/veya bulonlarla birleştirilecektir. Birleşimlerde, vidalar veya bulonlar kendilerine etkiyen kuvvetler altında tasarlanacaktır. Vida veya bulonların taşıyacağı kuvvetler farklı göçme biçimleri için farklı denklemler kullanılarak hesaplanacaktır. Her vida için tasarım kayma dayanımı P_s ve tasarım çekip-çıkarma dayanımı P_t vidanın kaplama ile temasta olduğu varsayımıyla YDKT yöntemi için

dayanım katsayısı 0,5 alınarak denklem 3.23 ve 3.24 ile; GKT yöntemi için dayanım katsayısı 3 alınarak denklem 3.25 ve 3.26 ile hesaplanacaktır.

$$P_{ns} = \min(P_{ns1}, P_{ns2}, P_{ns3}) \quad P_s = \phi P_{ns} \quad (3.23)$$

$$P_{nt} = \min(P_{nov}, P_{not}) \quad P_t = \phi P_{nt} \quad (3.24)$$

$$P_{ns} = \min(P_{ns1}, P_{ns2}, P_{ns3}) \quad P_s = \frac{1}{\Omega} P_{ns} \quad (3.25)$$

$$P_{nt} = \min(P_{nov}, P_{not}) \quad P_t = \frac{1}{\Omega} P_{nt} \quad (3.26)$$

Karakteristik kayma dayanımı P_{ns} denklem 3.27, 3.28, 3.29 ile hesaplanacak olup, $t_2 / t_1 \leq 1$ olması durumunda 3.27, 3.28, 3.29 denklemlerinin minimum değeri; $t_2 / t_1 \geq 2.5$ olması durumunda 3.28 ve 3.29 denklemlerinin minimum değeri alınacaktır. t_1 vida başı ile temas eden sacın et kalınlığı; t_2 ise vida başı ile temas etmeyen sacın et kalınlığını ifade etmektedir.

$$P_{ns1} = 2.4 \cdot t_2 \cdot d_v \cdot F_u \quad (\text{yan yatma sınır durumu için}) \quad (3.27)$$

$$P_{ns2} = 2.7 \cdot t_1 \cdot d_v \cdot F_{u1} \quad (\text{ezilme sınır durumu için}) \quad (3.28)$$

$$P_{ns3} = 2.7 \cdot t_2 \cdot d_v \cdot F_{u2} \quad (\text{ezilme sınır durumu için}) \quad (3.29)$$

Sactan vida başını karakteristik çekip-çıkarma dayanımı için denklem 3.30; sactan vida ucunu karakteristik çekip çıkarma dayanımı için ise denklem 3.31 kullanılacaktır.

$$P_{nov} = 1.5 \cdot t_1 \cdot d_w \cdot F_{u1} \quad (3.30)$$

$$P_{not} = 0.85 \cdot t_c \cdot d_v \cdot F_{u2} \quad (3.31)$$

Kaplamalı panel sistemleri birleşimlerinde aşağıda belirtilen hususlara ayrıca uyulması gerekmektedir.

-Kenar dikmelerde vida aralığı en çok $s = 200$ mm olacaktır.

-İç dikmelerde vida aralığı en çok $p = 300$ mm olacaktır.

-Kayma panelinin kenarları boyunca vidaların kenar mesafesi en az 10 mm olacaktır.

-Paneli oluşturan sac elemanların birleşiminde kullanılacak vidanın boyu en az $2t + 10$ mm olacaktır. Ayrıca vidalar, vida başının temas etmediği sacın içine en az 3 vida adımı girecektir.

-Kaplama malzemesinin panele birleşiminde kullanılacak vidanın boyu en az $t_{\text{kaplama}} + 2 \cdot t_{\text{dikme}} + 10$ mm olacaktır. Ayrıca vidalar, vida başının temas etmediği sacın içine en az 3 vida adımı girecektir. (şekil 3.14).

-Kayma ankrajı, oluşan kesme kuvvetini aktaracak sayıda yerleştirilecektir.

3.3. Yatay Yük Taşıyan Paneller İçin Uyulması Gereken Koşullar

Çaprazlı panel sistemlerin elemanları ve birleşimleri aşağıda verilen kurallara uygun olarak boyutlandırılacaktır.

- Çapraz elemanların bağlandığı panel kenar dikmeleri, başlık elemanları ve birleşim elemanları, yatay yüklerden dolayı bu elemanlarda oluşan $P_{n,\text{tasarım}}$ eksenel kuvvetlerinin şekil 3.6’da verilen D dayanım fazlalığı katsayısı uygulanarak büyütülmesi ile hesaplanan kuvvetleri karşılayacak şekilde boyutlandırılacaktır.

-Çapraz elemanın eksenel kuvvet hesap dayanımı $P_{n,\text{çapraz}}$ eksenel kuvvetinin çekme olması durumunda GKT yöntemi için denklem 3.32; YDKT yöntemi için denklem 3.33’e göre hesaplanacaktır.

$$P_{n,\text{çapraz}} = \frac{1}{\Omega_t} \cdot A_g \cdot F_y \quad \Omega_t = 1,67 \quad (3.32)$$

$$P_{n,\text{çapraz}} = \phi_t \cdot A_g \cdot F_y \quad \phi_t = 0,90 \quad (3.33)$$

Eksenel kuvvetin basınç olması durumunda ise $P_{n,\text{çapraz}}$ hesap dayanımı seçilecek hesap yöntemine göre denklem 3.16 ve 3.17 kullanılarak hesaplanacaktır.

-Çekme kuvveti etkisi altında, çaprazların kenar dikmelerine ve başlık elemanlarına birleştirildiği noktada net enkesit hesap dayanım kontrolü yapılacak ve denklem 3.35’i sağladığı gösterilecektir.

$$P_{\text{net},\text{çapraz}} = A_{\text{net}} \cdot F_u \quad (3.34)$$

$$P_{\text{net},\text{çapraz}} \geq 1,20 \cdot P_{n,\text{çapraz}} \quad (3.35)$$

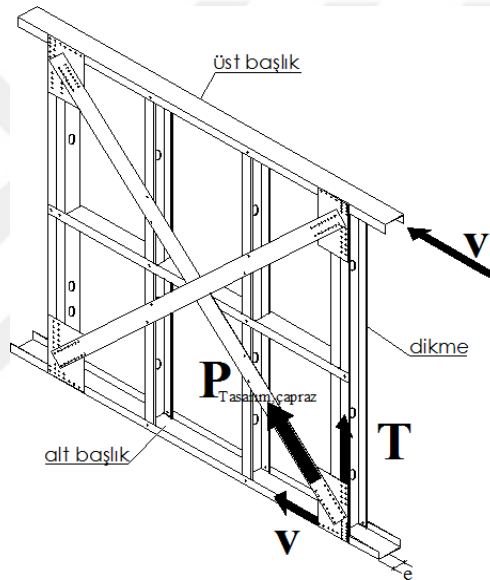
Tüm bunlarla birlikte çapraz elemanları sadece çekme etkisi altında olan çaprazlı panel sistemler için ek özel koşullar yer almaktadır.

- Panelin her iki tarafında şerit çapraz uygulanmaması durumunda, dış merkezlikten oluşacak moment etkisi $T \times e$ olarak dikme hesaplarında dikkate alınması gerekmektedir. (Şekil 3.16)

- Şerit çaprazların bağlantıları gergin bir şekilde yapılacaktır.

- Temeller şekil 3.6’da verilen D dayanım fazlalığı katsayısı uygulanarak büyütülen iç kuvvetler altında boyutlandırılacaklardır.

- Yatay yük taşıyan panel dikmelerinde, h panel yüksekliği olmak üzere en çok $h/2$ aralıklarda yatay kuşak konulacaktır. (Şekil 3.2)



Şekil 3.16.Sadece çekme etkisi altında olan çaprazlı panel sistem

4. DENEYSEL ELEMANLARININ TASARLANMASI

Bu bölümde deneysel çalışmanın planlanmasının açıklamalarına yer verilecek olup, tasarım yaklaşımları ve temel varsayımlara değinilecektir.

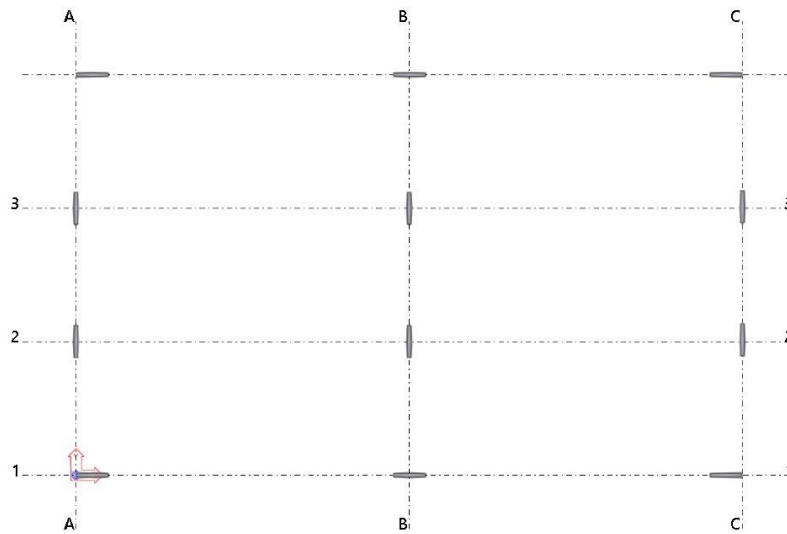
4.1. Tasarım Kriterleri

Yapılacak olan deneysel çalışmaya esas teşkil edecek hafif çelik yapının Kahramanmaraş İli, Pazarcık İlçesinde yapılacağı varsayılmış olup, yapı planının 15 m x 10 m boyutlarında olması düşünülmüştür. Bununla birlikte yapıda her iki yönde de yatay yükleri karşılamak üzere 6 adet panel elemanı yerleştirilmiştir. (Şekil 4.1)

Bölüm 3’de belirtildiği üzere elastik tasarım spektral ivmesinin hesabı için $T=0,2s$ alınarak denklem 3.7’ye göre bulunan eşdeğer deprem yükü esas alınması gerekmektedir. Teorik olarak hesaplanan yapı periyodu ise varsayılan yapı için 0,19 s olarak bulunmuştur. Deprem hesabına esas yapı ağırlığı yaklaşık olarak 600 kN olarak değerlendirilecektir.

Şekil 3.6 incelendiği takdirde bina taşıyıcı sisteminin D2 olduğu ve taşıyıcı sistem davranış katsayısının 3; dayanım fazlalığı katsayısının ise 2 olduğu görülmektedir.

Tüm bu parametreler neticesinde her bir panele gelen tasarım yükünün yaklaşık olarak 33 kN deprem yükü olduğu görülmüştür (Çizelge 4.3).



Şekil 4.1. Varsayılan yapı planı

Çizelge 4.1. Geometrik Parametreler

Ölçü	Birim	Değer
Plan Boyutları	m	15 x 10
Toplam Alan	m ²	150
Kat Yüksekliği	m	2,40
Panel Boyutları	m	2,40 x 2,40

Çizelge 4.2. Deprem hesabına esas parametre değerleri

Spektrum Parametreleri	Değer
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD-2
Yerel Zemin Sınıfı	ZD
Enlem	37.471025°
Boylam	37.39582°
S_S	0.882
S_I	0.242
PGA	0.371
PGV	23.131
F_S	1.147
F_I	2.116

S_S : Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

S_I : 1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

PGA : En büyük yer ivmesi (g)

PGV : En büyük yer hızı (cm/sn)

Yerel zemin sınıfı	Zemin Sınıfı	Üst 30 metrede ortalama		
		(V_s) ₃₀ (m/s)	(N_{60}) ₃₀ (darbe/30cm)	(c_u) ₃₀ (kPa)
ZA	Sağlam , sert kayalar	>1500	---	---
ZB	Az ayrılmış , orta sağlam kayalar	760-1500	---	---
ZC	Cok sıkı kum , çakıl ve sert kil tabakaları veya ayrılmış , çok çatlaklı zayıf kayalar	360-760	>50	>250
ZD	Orta sıkı - sıkı kum , çakıl veya çok katı kil tabakaları	180-360	15-50	70-250
ZE	Gevşek kum , çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya $PT > 20$ ve $w > \%40$ koşullarını sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ($c_u < 25$ kPa) içeren profiller	<180	<15	<70
ZF	Sahaya özel araştırma ve değerlendirme gerektiren zeminler: 1) Deprem etkisi altında çökme ve potansiyel göçme riskine sahip zeminler (sıvılaşabilir zeminler, yüksek derecede hassas kiler , göçebilir zayıf çimentolu zeminler vb.), 2) Toplam kalınlığı 3 metreden fazla turba ve /veya organik içeriği yüksek kiler, 3) Toplam kalınlığı 8 metreden fazla olan yüksek plastisiteli ($PI > 50$) kiler, 4) Çok kalın (> 35m) yumuşak veya orta katı kiler			

Şekil 4.2. Yerel zemin sınıfları (TBDY-2018, Tablo 16.1)

Yerel zemin sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0,25$	$S_s = 0,50$	$S_s = 0,75$	$S_s = 1,00$	$S_s = 1,25$	$S_s \geq 1,50$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
ZC	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,2
ZD	1,6	1,4	1,2	1,1	1	1
ZE	2,4	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır. (Bkz. 16.5)					

Şekil 4.3. Yerel zemin etki katsayıları (TBDY-2018, Tablo 2.1)

Yerel zemin sınıfı ZD ve $S_s = 0.882$ için $F_s = 1.147$ (Şekil 4.3)

Yerel zemin sınıfı	1.0 saniye periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_1					
	$S_1 \leq 0,10$	$S_1 = 0,20$	$S_1 = 0,30$	$S_1 = 0,40$	$S_1 = 0,50$	$S_1 \geq 0,60$
ZA	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZB	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
ZC	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4
ZD	2,4	2,2	2	1,9	1,8	1,7
ZE	4,2	3,3	2,8	2,4	2,2	2
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır. (Bkz. 16.5)					

Şekil 4.4. 1.0 saniye periyot için yerel zemin etki katsayısı F_1 (TBDY-2018, Tablo 2.2)

Yerel zemin sınıfı ZD ve $S_1 = 0.242$ için $F_1 = 2.116$ (Şekil 4.4)

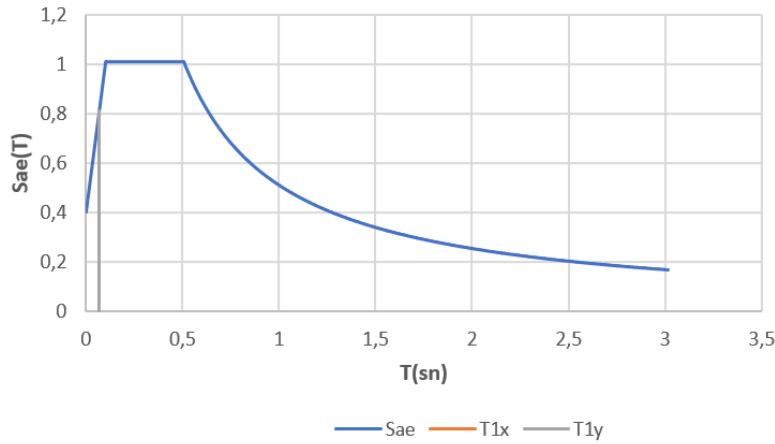
Tasarım Spektral İvme Katsayıları

$$S_{DS} = S_s F_s = 0.882 \times 1.147 = 1.012 \quad (4.1)$$

$$S_{D1} = S_1 F_1 = 0.242 \times 2.116 = 0.512 \quad (4.2)$$

S_{DS} : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)

S_{D1} : 1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (boyutsuz)



Şekil 4.5. Yatay elastik tasarım spektrumu

Çizelge 4.3. Tasarım parametreleri

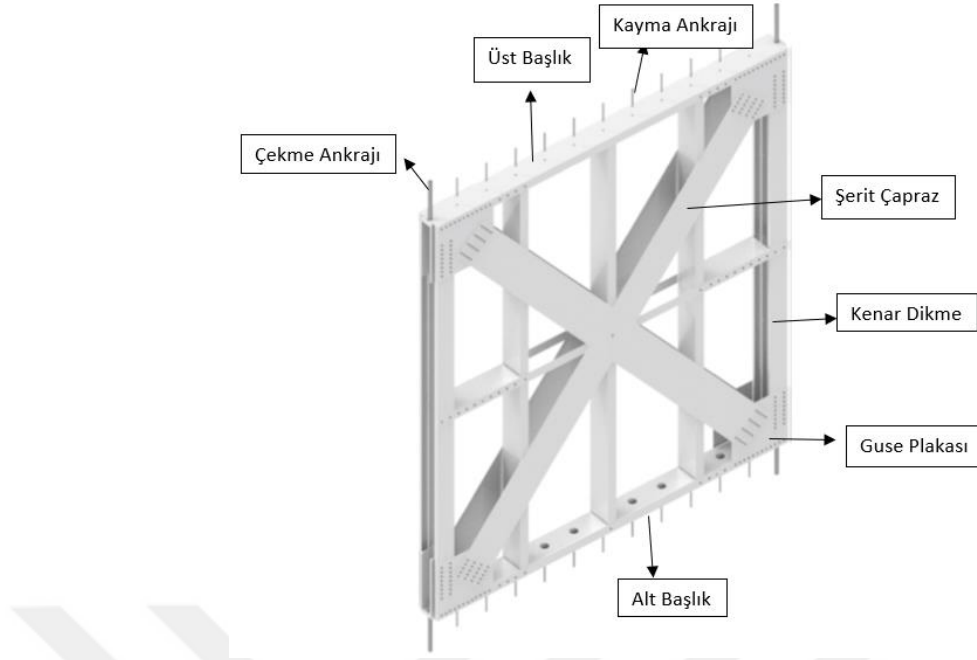
Tasarıma Esas Parametreler	Değer
Kat Sayısı	1
Panel Sayısı	6
Dayanım Fazlalığı Katsayısı	2
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	3
Sismik Yük	600 kN
Yapı Periyodu	0,2 s
Tek Panele Gelen Deprem Kuvveti	33,3 kN

4.2. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panele Ait Elemanlar

Tipik bir soğuk şekillendirilmiş şerit çaprazlı panel eleman genel olarak C-kesitlerinden oluşan bir çelik çerçeve olarak imal edilir. Bu C-kesit profiller belli aralıklarla yerleştirilir ve alt ve üst uçlarından U-kesitli profiller ile birleştirilir.

Kenar dikmeleri genellikle, sırt sırta yerleştirilmiş çift C-kesitlerinden oluşur. Kenar dikmelerin ve iç C-kesitlerinin serbest uzunluğunu azaltmak için, panellerin orta yüksekliğine düz şeritler yerleştirilir ve bunlar, panellerin uçlarına yerleştirilen bloklama elemanlarına vidalanır. Başlıklar, kutu kesitleri oluşturacak şekilde C-kesit profilleri ile güçlendirilir.

Kenar dikmelerin uçlarını panel üzerine etki eden devrilme momentine karşı sabitlemek için çekme ankrajları ve çekme tutucu elemanlar kullanılır. Kayma ankrajları ise başlık boyunca düzenli aralıklarla yerleştirilir. Paneller, bir veya her iki tarafında X konfigürasyonunda yerleştirilmiş şerit çaprazlarla tamamlanır ve çerçeveye guse plakaları ile bağlanır. Genel olarak elemanlar arasındaki birleşimler, matkap uçlu vidalar kullanılarak yapılır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Tipik bir şerit çaprazlı panel ve elemanları. (Terracciano, ve diğerleri, 2019)

4.3. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panel Elemanın Dayanımının Teorik Hesabı

Soğuk şekillendirilmiş şerit çaprazlı panellerin tasarım dayanımı, her bir panel elemanının (dikmeler, başlıklar, şerit çaprazlar, çapraz bağlantıları, guse plakaları, çekme ve kayma ankrajları) dayanımına bağlı olarak değerlendirilebilir. Özellikle, her bir panel elemanı için bir veya daha fazla hasar mekanizması tanımlanabilir ve bunlardan en düşük dayanım değeri panelin yatay dayanımını belirler. Bu nedenle, panelin yatay dayanımı denklem 4.3 ile hesaplanabilir:

$$H_c = \min(H_{c,d}, H_{c,c}, H_{c,g}, H_{c,s}, H_{c,t}, H_{c,ta}, H_{c,sa}) \quad (4.3)$$

Burada $H_{c,d}, H_{c,c}, H_{c,g}, H_{c,s}, H_{c,t}, H_{c,ta}, H_{c,sa}$ sırasıyla diyagonal şerit çaprazlarının, çapraz bağlantılarının, guse plakasının, kiriş profilinin, başlıkların, çekme ankrajlarının ve kayma ankrajlarının hasarına bağlı panel dayanımlarını ifade eder. Farklı panel elemanların dayanımı, çeşitli yöntemlerle hesaplanabilir.

Bu yöntemde, yalnızca gerilme altındaki çapraz elemanlar sismik yüke karşı tasarlanırken, basınç altındaki çaprazlar yüksek narinliklerinden dolayı yatay yükü karşılamada dikkate alınmaz. Yatay yüke maruz kalan şerit çaprazlarla ilişkili olası hasar

mekanizmaları, çaprazın akma dayanımı ve bağlantı deliklerindeki net kesit hasarındır. Bu nedenle, şerit çapraza bağlı panel dayanımı denklem 4.4 ile ifade edilir

$$H_{c,d} = n_d \cdot \min (N_{pl,Rd} ; N_{u,Rd}) \cdot \cos\beta \quad (4.4)$$

Burada n_d yalnızca bir yüzde çapraz varsa 1; iki yüzde varsa 2 olarak alınır. β çaprazın yatayla yaptığı açı, $N_{pl,Rd}$ tek bir şerit çaprazın tasarım akma dayanımını, $N_{u,Rd}$ ise kopma sınır durumundaki tasarım dayanımını ifade eder. (Çizelge 4.4)

Çizelge 4.4. Şerit çapraz tasarım kuralları

Panel Elemanı	Hasar Mekanizması	Tasarım Şartları
Şerit Çapraz	Şerit çaprazın akması	$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ A : tek şeritin kesit alanı f_y : malzeme akma dayanımı γ_{M0} : güvenlik katsayısı
	Kopma sınır durumu	$N_{u,Rd} = \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$ A_{net} : net kesit alanı f_u : malzeme kopma dayanımı γ_{M2} : güvenlik katsayısı

Vida ile birleşim yapılmış şerit çapraz bağlantısına karşılık gelen panelin yatay dayanımı $H_{c,c}$, vida için eğilme ve kayma dayanımlarının minimumu olarak denklem 4.5'e göre hesaplanır. Burada n_s tek bir şerit çaprazın bağlantısında bulunan vida sayısını; $F_{b,Rd}$ tek bir vidanın eğilme dayanımını ve $F_{v,Rd}$ ise tek bir vidanın kayma dayanımını ifade eder. (Çizelge 4.5)

$$H_{c,c} = n_d \cdot n_s \cdot \min(F_{b,Rd}, F_{v,Rd}) \cdot \cos(\beta) \quad (4.5)$$

Çizelge 4.5. Şerit çapraz bağlantısı tasarım kuralları

Panel Elemanı	Hasar Mekanizması	Tasarım Şartları
Şerit Çapraz Bağlantısı	Vida yan yatma hasarı	$F_{b,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ $\alpha : \text{malzeme kalınlığına bağlı katsayı}$ $f_u : \text{malzeme kopma dayanımı}$ $d : \text{vida çapı}$ $t : \text{ince olan malzeme kalınlığı}$
	Vida kesme hasarı	$F_{v,Rd} = \frac{F_{v,Rk}}{\gamma_{M2}}$ $F_{v,Rk} : \text{bir vidanın karakteristik kayma dayanımı}$ $\gamma_{M2} : \text{güvenlik katsayısı}$

Guse plakalarının net kesit alanlarının çekme dayanımına karşılık gelen panel dayanımı denklem 4.6 ile hesaplanabilir. n_d , çapraz sayısını; $F_{n,Rd}$, guse plakasının dayanımını; β ise şerit çaprazın yatay ile yaptığı açiyı ifade etmektedir.

$$H_{c,g} = n_d \cdot F_{n,Rd} \cdot \cos(\beta) \quad (4.6)$$

Yatay yük altındaki çerçeve hasarı genellikle basınç altındaki kenar dikme profillerinin veya başlıkların burkulmasıyla ilişkilidir. Bu nedenle, bu elemanlara bağlı panelin yatay dayanımı denklem 4.7 ile hesaplanabilir.

$$H_{c,s} = \frac{(N_{s,Rd} - N_{Ed,G}) \cdot h}{L} \quad (4.7)$$

h panelin yüksekliğini; L panelin uzunluğunu; $N_{Ed,G}$ eksenel kuvveti; $N_{s,Rd}$ kenar dikmelerin basınç dayanımı (çizelge 4.6) ifade eder. Denklem 4.7’de belirtilen yaklaşım panelin yükseklik/uzunluk oranı 2’den küçük olduğu durumlarda geçerlidir. Bu oran 2’den büyükse davranış değişmeye başlayacak ve dikmeler eğilmeye çalışacaktır.

Çizelge 4.6. Çerçeve hasar mekanizmasına ait tasarım kuralları

Panel Elemanı	Hasar Mekanizması	Tasarım Şartları
Başlık ve dikmelerden teşkil çerçeve sistem	Kenar dikme burkulması	$N_{s,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{s,eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$ χ : burkulma azaltma katsayısı $A_{s,eff}$: dikme etkin kesit alanı f_y : malzeme akma dayanımı γ_{M1} : güvenlik katsayısı
	Başlıkların burkulması	$N_{t,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{t,eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$ χ : burkulma azaltma katsayısı $A_{t,eff}$: başlık etkin kesit alanı f_y : malzeme akma dayanımı γ_{M0} : güvenlik katsayısı

Devrilmeye karşı dayanım, yük aktarma ankrajları ve bunların birleşimlerinde meydana gelebilecek farklı hasar mekanizmalarına bağlı dayanımların en küçüğü olarak değerlendirilir ve denklem 4.8 ile ifade edilir.

$$H_{c,ta} = \frac{N_{aT,Rd} + N_{Ed,G}}{h} \cdot L \quad (4.8)$$

$$N_{aT,Rd} = \min(F_{hd-S,Rd}, F_{hd,Rd}, F_{hd-F,Rd}) \quad (4.9)$$

$$F_{HD-S,Rd} = n_b \cdot \min(F_{HD-S,bRd}, F_{HD-S,vRd}) \quad (4.10)$$

Çizelge 4.7. Devrilme momentine karşı tasarım kuralları

Panel Elemanı	Hasar Mekanizması	Tasarım Şartları
Çekme tutucu eleman-kenar dikme birleşimi	Birleşim elemanın eğilmesi	$F_{HD-S,bRd} = \frac{2.5 \cdot \alpha_b \cdot k_t \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$ α_b : bulon çapına bağlı düzeltme katsayısı k_t : et kalınlığına bağlı katsayı f_u : malzeme kopma dayanımı d : bulon çapı t : daha ince olan malzeme kalınlığı γ_{M2} : güvenlik katsayısı
	Bulon kesme hasarı	$F_{HD-S,vRd} = \frac{k \cdot f_{ub} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$ k : bulon sınıfına bağlı katsayı (4.6, 5.6 ve 8.8 için $k=0.6$) f_{ub} : bulon kopma dayanımı A_{res} : bulonun kesit alanı γ_{M2} : güvenlik katsayısı
Çekme ankrajı	Çekme kaynaklı deformasyon	$F_{HD-S,bRd} = \frac{0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}}$

Kayma ankrajlarına bağlı panel dayanımı denklem 4.11 ile hesaplanabilir. Burada n_a kesme ankrajlarının sayısını; $V_{aS,Rd}$ ise her bir kesme ankrajının tasarım dayanımını ifade eder ve denklem 4.12 belirtildiği şekliyle $F_{aS,bRd}$ ankrajın eğilme dayanımı veya $F_{aS,vRd}$ kayma dayanımından küçük olanı esas alır.

$$H_{c,sa} = n_a \cdot V_{aS,Rd} \quad (4.11)$$

$$V_{aS,Rd} = \min(F_{aS,bRd}, F_{aS,vRd}) \quad (4.12)$$

Tüm bunlarla birlikte şerit çaprazlı panellerin yalnızca bir yüzde bulunduğu durumlarda, birleşimlerin, kenar dikmelerin ve ankrajların tasarımında eksantriklik etkisinin dikkate alınması gerektiği unutulmamalıdır.

4.4. Tipik Bir Şerit Çaprazlı Panel Elemanın Rijitliğinin Teorik Hesabı

Yatay bir yük (H) uygulanan bir panelin tepe kısmındaki yatay yer değiştirme (d), yapısal bileşenlerin katkıları dikkate alınarak değerlendirilebilir. Bu yer değiştirme denklem 4.13'teki şekilde ifade edilebilir.

$$d = d_d + d_a + d_c \quad (4.13)$$

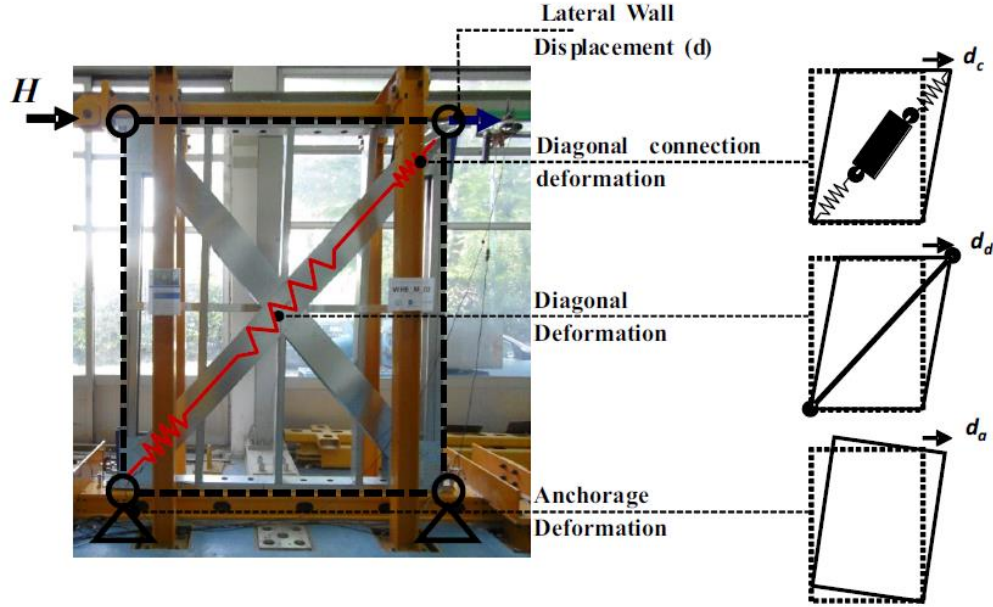
Burada d_d , d_a , d_c sırasıyla yük altındaki çapraz elemanlarına, ankrajlarına ve çapraz bağlantılara bağlı panel yer değiştirmelerini ifade eder. Bu denklem, panel alt başlığında herhangi bir yer değiştirmenin meydana gelmediği durumda geçerlidir. Dolayısıyla, panel elemanı farklı yapısal bileşenlere karşılık gelen elastik yaylardan oluşan bir sistem olarak düşünülebilir (Şekil 4.7). Buna göre, panel elemanın yatay rijitliği denklem 4.14 ile hesaplanabilir.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_c}} \quad (4.14)$$

Burada K_d , K_a , K_c sırasıyla gerilme altındaki şerit çaprazlarına, ankrajlarına ve diyagonal bağlantılara bağlı rijitlikleri temsil eder.

Gerilme altındaki çaprazların eksenel deformasyonuna bağlı rijitlik katkısı denklem 4.15 ile hesaplanabilir. Burada E elastik modülünü göstermektedir.

$$K_d = \frac{n_d \cdot E \cdot A \cdot \cos^3(\beta)}{L} \quad (4.15)$$



Şekil 4.7. Yanal yük altındaki panelin deformasyon katkısı. (Terracciano ve diğ., 2019)

Yük altındaki ankrajların deformasyonuna karşılık gelen yatay rijitlik ise denklem 4.16 ile hesaplanabilir.

$$K_a = \frac{k_a \cdot L^2}{h^2} \quad (4.16)$$

Burada K_a , yük altındaki ankraj sisteminin eksenel rijitliğini ifade eder. K_a değerleri genellikle ankraj eleman üreticileri tarafından sağlanır. Örneğin, (Simpson Strong-Tie, 2010), ankraj sistemlerinin izin verilen yükler altındaki toplam uzama değerlerini bildirmektedir. Bu bilgiler, başlangıç rijitliği K_a 'nın hesaplanmasında kolaylık sağlar. Kullanılan malzemenin mekanik özelliklerine, profil kalınlıklarına ve bağlantı elemanlarına bağlı olarak rijitlik değerleri 7 kN/mm ile 68 kN/mm arasında değişmektedir. (Fiorino ve diğ., 2016) tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ışığında, incelenen ankraj sistemlerinin öngörülen rijitlik değerlerinin genellikle 15 kN/mm ile 20 kN/mm arasında olduğu belirlenmiştir.

Çapraz eleman bağlantılarının şekil değiştirebilme yeteneğinden kaynaklanan rijitlik, denklem 4.7 ile hesaplanabilir:

$$K_c = \frac{n_d \cdot n_s \cdot k_s \cdot \cos^2(\beta)}{2} \quad (4.17)$$

Burada k_s , genellikle literatürde yer alan deneysel çalışmalara bağlı olarak belirlenen tek bir vida bağlantısının kayma rijitliğini ifade eder. Çizelge 4.8’de, k_s için deneylere dayalı değerlerin kısmi özetini yer almaktadır. Bu değerler, vida çapı, malzeme kalınlığı ve malzeme mekanik özellikleri gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Çizelge 4.8’de özetlenen testlere dayalı kayma rijitliği k_s değerleri, vida bağlantılarının performansı hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Soğuk şekillendirilmiş çelik sistemleri için bağlantı elemanlarının rijitliği konusunda ilave bilgiler için (European Convention for Constructional Steelwork, 1995) kapsamlı olarak incelenebilir. Bu belgede, çapı 4.1 mm ile 4.8 mm arasında değişen vidalar ve kalınlığı 1.20 mm’ye kadar olan çelik levhalar için önerilen rijitlik değeri 4 kN/mm olarak belirtilmiştir. Söz konusu bu değer, çizelge 4.8’de verilen deneysel referanslı değerlerin aralığında yer almaktadır. Ancak, çapraz bağlantılar için kullanılan vida çaplarının ve malzeme kalınlıklarının genellikle bu önerilen sınırların dışında olduğu ve testlerin, bağlantı parametrelerinin (örneğin vida çapı, malzeme kalınlığı ve malzeme sınıfı) yanı sıra grup etkisinin de vidalı bağlantıların kayma rijitliği üzerindeki etkisinin olduğu unutulmamalıdır.

Çizelge 4.8. Vida kayma dayanımlarına ait deneysel veriler

Deneysel Çalışma	Vida Çapı (mm)	Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzeme Sınıfı	k_s (kN/mm)
(Iuorio ve diğ., 2014)	6,3	1,5	S350	3,5
	4,8	2-1,5	S235-S350	3,4
	6,3	2-1,5	S235-S350	4,6
	6,3	1,5	S350	3,8
	4,8	2-1,5	S235-S350	4
	6,3	2-1,5	S235-S350	6
(Fiorino ve diğ., 2016)	6,3	1,5	S280	2,8
	6,3	2	S280	3,3
(Velchev ve Rogers, 2008)	4,2	1,09	230 MPa	1,8
		1,37	340 MPa	
		1,73	340 MPa	

Yukarıda yer alan teorik hesaplamalar doğrultusunda elde edilen eleman tasarım başlangıç rijitlikleri çizelge 4.9’da yer almaktadır.

Çizelge 4.9. Tasarım başlangıç rijitlikleri

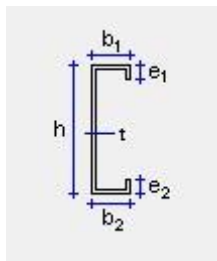
Eleman	Rijitlik (kN/mm)
W1	2,7
W2	1,9
W3	1,1

4.5. Deney Elemanların Kesit Özellikleri ve Şematik Gösterimleri

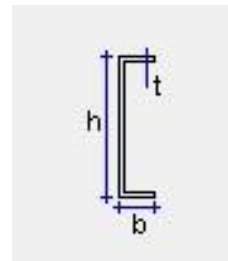
Bölüm 3'e göre deprem hesabı yapılarak oluşturulan ve çizelge 4.3'de yer alan parametreler esas alınarak deney elemanları tasarlanmıştır ve profil kesit özellikleri çizelge 4.10'da belirtilmiştir. Belirtilen profillere ait enkesit kontrollerine ise çizelge 4.11'de yer verilmiştir. Deney elemanlarının TBDY-2018'e göre kapasite kontrolleri çizelge 4.12'de gösterilmiş olup elemanların şematik çizimleri şekil 4.9, şekil 4.10, şekil 4.11, şekil 4.12 ve şekil 4.13'de yer almaktadır.

Çizelge 4.10. Panel elemanların kesit özellikleri

Panel Elemanı	Profil Kesitleri		
	W1	W2	W3
Dikmeler	C140 x 45 x 4 x 1,2	C140 x 45 x 4 x 1,2	C140 x 45 x 4 x 1,2
Alt ve Üst Başlıklar	U144 x 45 x 1,2	U144 x 45 x 1,2	U144 x 45 x 1,2
Şerit Çapraz	60 x 1,2	90 x 1,2	60 x 1,2
Guse Plakaları	250 x 250 x 1,2	250 x 250 x 1,2	250 x 250 x 1,2
Başlık Berkitmesi	C140 x 45 x 4 x 1,2	C140 x 45 x 4 x 1,2	C140 x 45 x 4 x 1,2
Vidalar	6,3 x 25	6,3 x 25	6,3 x 25



h : 140 mm
t : 1,20 mm
e : 4 mm
b : 45 mm



h : 144 mm
b : 45 mm
t : 1,20 mm

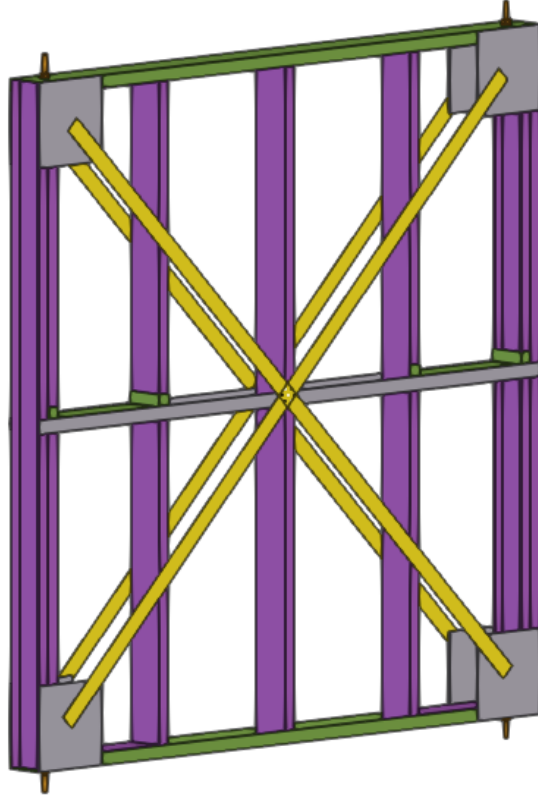
Şekil 4.8. C ve U Profil enkesit detayları

Çizelge 4.11. TBDY-2018 enkesit koşulları.

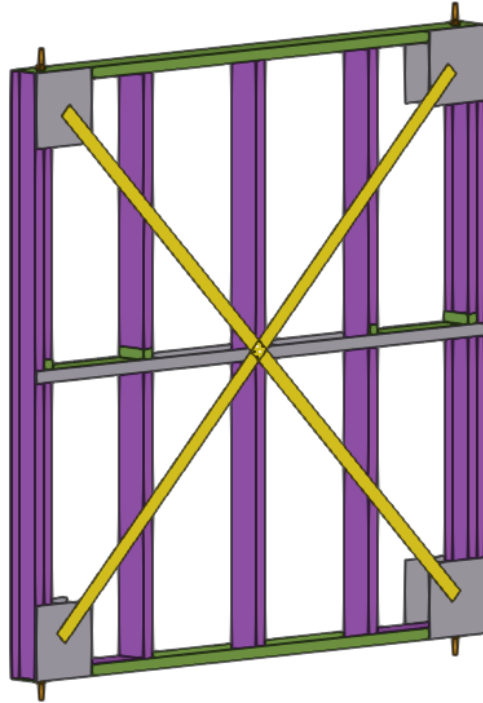
C Enkesit		U Enkesit	
C140 x 45 x 4 x 1,2	Sınır Değerler	U144 x 45 x 1,2	Sınır Değerler
$b/t = 37,5$	$b/t < 60$	$b/t = 37,5$	$b/t < 50$
$c/t = 3,3$	$b/t < 50$	$h/t = 120$	$h/t < 500$
$h/t = 116,6$	$h/t < 500$	-	-

Çizelge 4.12. TBDY-2018 Kapasite kontrolleri.

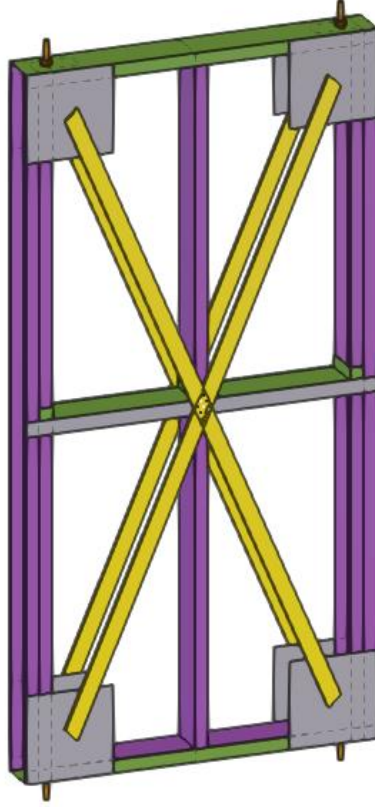
TBDY-2018	W1 (kN)	W2 (kN)	W3 (kN)
$P_{ns1} = 2.4 \cdot t_2 \cdot d_v \cdot F_u$	68,5	34,2	43,3
$P_{ns2} = 2.7 \cdot t_1 \cdot d_v \cdot F_{u1}$	100,9	50,4	63,8
$P_{ns3} = 2.7 \cdot t_2 \cdot d_v \cdot F_{u2}$	100,9	50,4	63,8
$P_{ns} = \min(P_{ns1}, P_{ns2}, P_{ns3})$	68,5	34,2	43,3
$P_s = \phi P_{ns}$	34,2	17,1	21,6
$P_{n,\text{çapraz}} = \phi_t \cdot A_g \cdot F_y$	32,8	24,6	20,7
$P_{net,\text{çapraz}} = A_{net} \cdot F_u$	34,1	28,1	21,5



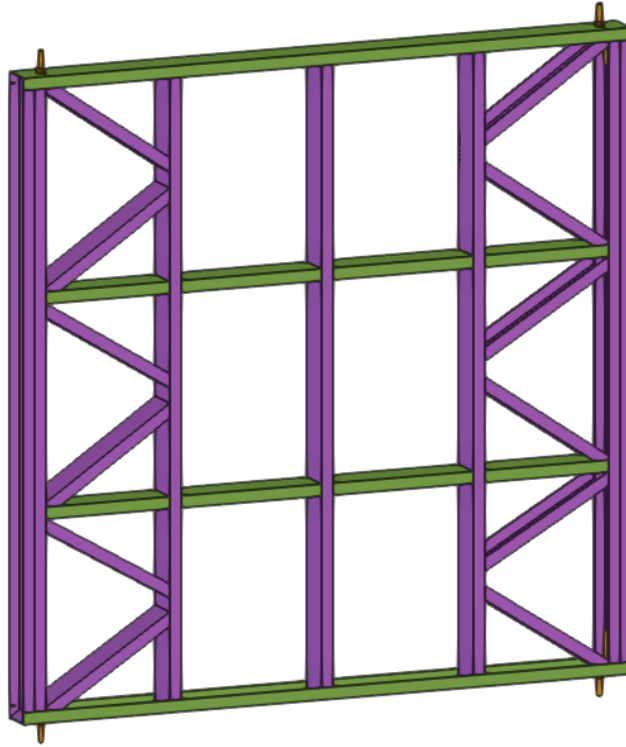
Şekil 4.9. W1 deney elemanı şematik gösterimi



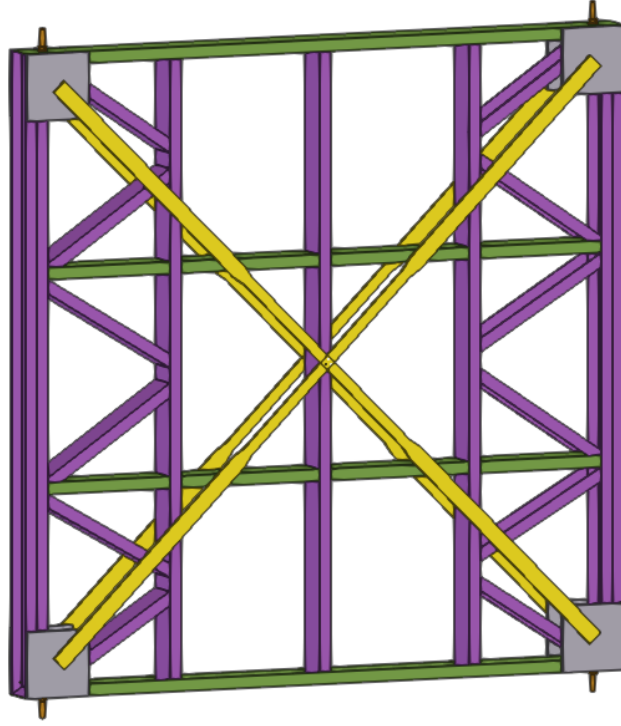
Şekil 4.10. W2 deney elemanı şematik gösterimi



Şekil 4.11. W3 deney elemanı şematik gösterimi



Şekil 4.12. W4 deney elemanı şematik gösterimi



Şekil 4.13. W5 deney elemanı şematik gösterimi

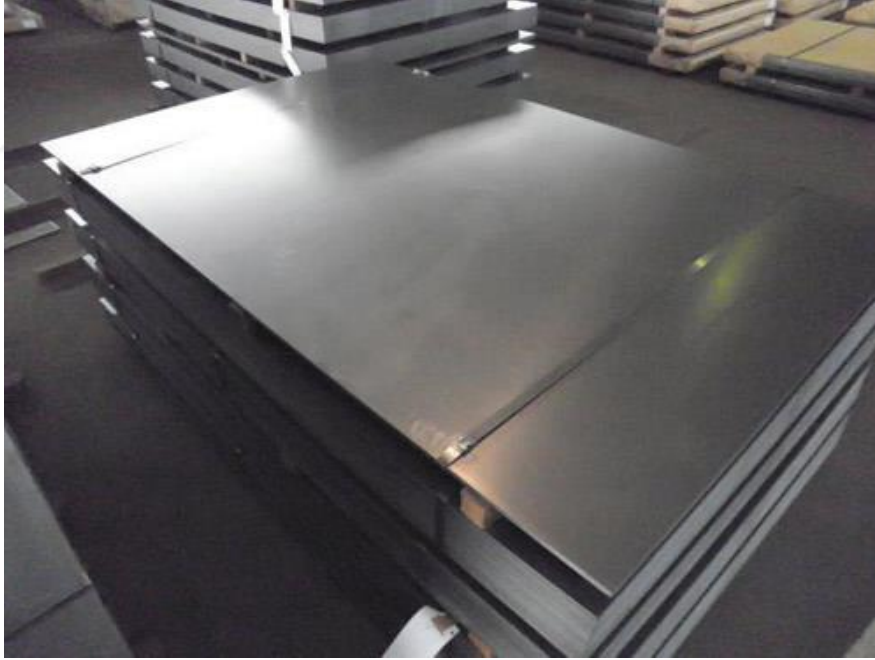
5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Genel Bilgiler

Bu bölümde temin edilen malzemenin mekanik özellikleri, panel elemanlarının hazırlanması süreçleri, deney düzeneğinin hazırlanması aşamaları, yükleme protokolü ve netice olarak elde edilen deney sonuçları ayrı ayrı ele alınacaktır.

5.2. Malzeme Özellikleri

Yapılacak olan çalışmada kullanılacak olan profil malzemeleri Tatmetal Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den temin edilmiştir. Söz konusu malzeme 1,2 mm kalınlığında ve 1200 x 2400 mm boyutlarında olmak üzere şekil 5.1’de resimdeki gibi plaka halinde teslim alınmıştır.

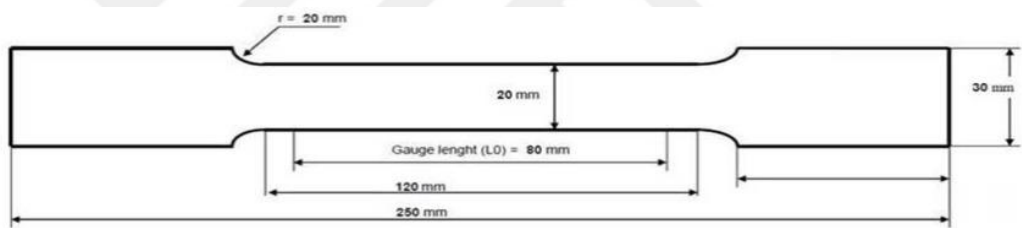


Şekil 5.1. Soğukta haddelenmiş plaka halinde sac.

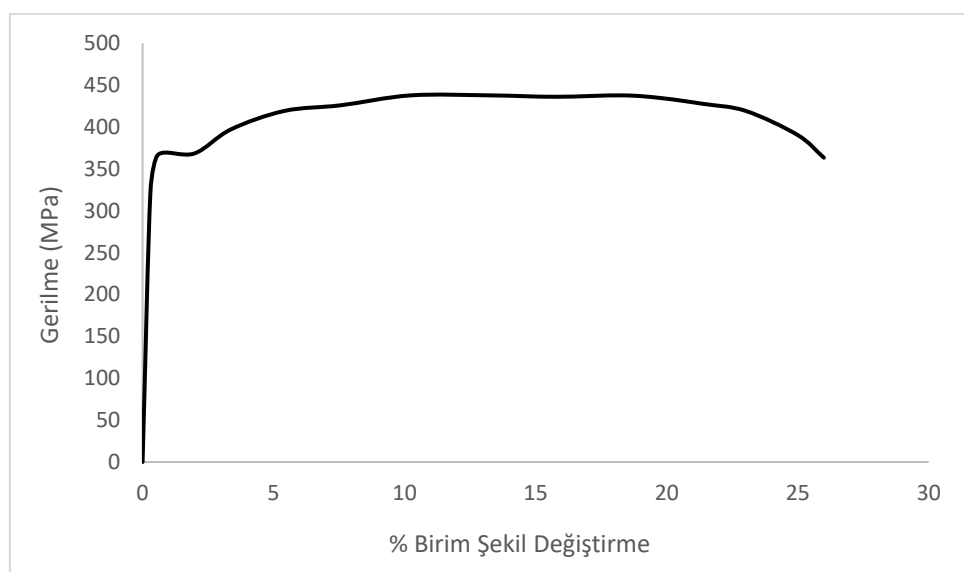
Kullanılan çeliğin mekanik özelliklerini belirlenebilmesi için TS EN 10346 standartına göre elde edilen sonuçlar çizelge 5.1’de yer almaktadır.



Şekil 5.2. Çekme testi görünümü.



Şekil 5.3. Çekme testi kupon elemanı boyutları.



Şekil 5.4. Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 5.1 Çekme testi sonuçları

E (GPa)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	ϵ_f (%)
199,2	358	437	26,3

5.3. Şerit Çaprazlı Panel Deneyleri

Yapılacak olan deneysel çalışmada 5 adet tam ölçekli panel elemanın çevrimsel yükleme altında davranışı izlenecektir.

Çalışmaya ait deneysel program çizelge 5.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2 Deneysel çalışma konfigürasyonu

Deney Elemanı	En-Boy Oranı	Şerit Genişliği(mm)	Şerit Çapraz Konfigürasyonu
W1	1:1	60	Çift taraflı
W2	1:1	90	Tek taraflı
W3	1:2	60	Çift taraflı
W4	1:1	-	-
W5	1:1	60	Çift taraflı

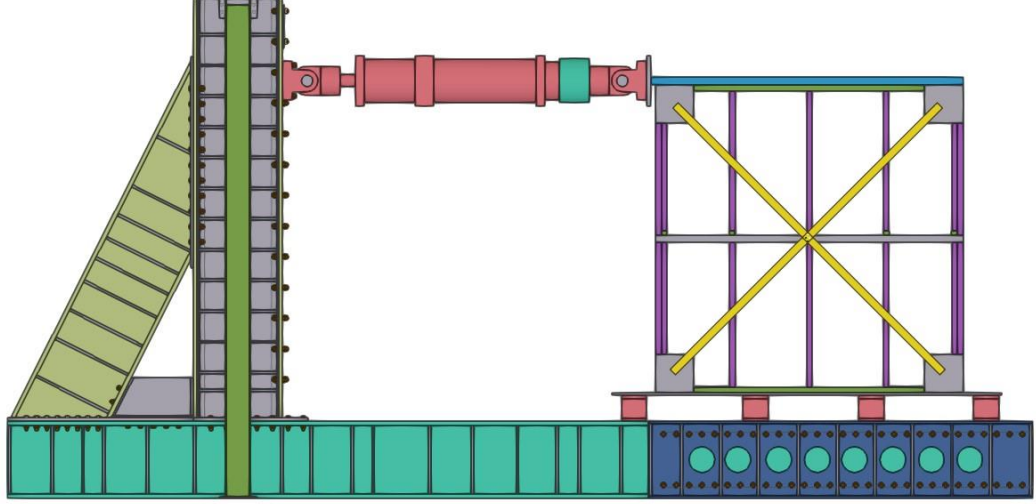
5.3.1. Deney Düzeneği

İlgili deney düzeneği yatay doğrultuda çevrimsel yükleme yapacak şekilde tasarlanmıştır. Deney düzeneği şematik olarak Şekil 5.5’de gösterilmiştir.

Buna göre şekil 5.6’da gösterilen ve NPU160 profilinden teşkil olunan yükleme kirişi aktüatöre bağlanmıştır. Deney elemanlarının üst başlığı ise ankraj elemanları ile yükleme kirişine mesnetlenecektir. Deney elemanlarının alt başlıklarının mesnetlenebilmesi amacıyla şekil 5.7’de yer alan HEA300 profilleri şekil 5.8’de yer alan ve öncesinde delikleri açılmış 25 mm kalınlığındaki sac levha ile birleşimleri sağlanmıştır. (şekil 5.9)

Deney elemanlarının alt ve üst başlıklarının mesnet şartları sağlandıktan sonra deney sırasında panel elemanların düzlem dışı hareketini engellemek amacıyla şekil 5.10’da gösterilen 70 mm çapında rulmanlı poliamid transpalet tekerleği kullanılması

düşünülmüştür. Bahsedilen tekerlek şekil 5.11’de gösterilen ve kutu profillerle teşkil edilen yanal destek elemanına plaka vasıtasıyla kaynak yapılmıştır. Sonuç olarak deney elemanı düzleminde aktüatör vasıtasıyla serbest halde hareket ederken, düzlem dışında hareketi ise engellenmiş olup düzeneğin genel görünümüne şekil 5.12’de yer verilmiştir.



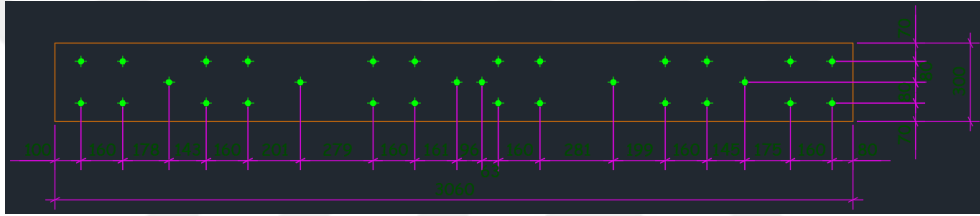
Şekil 5.5. Deney düzeneği şematik gösterimi.



Şekil 5.6. Yükleme kirişi.



Şekil 5.7. HEA300'den teşkil mesnet elemanı.



Şekil 5.8. Alt başlık mesnet elemanı.



Şekil 5.9.Deney düzeneği alt başlık mesnet yerleri genel görünümü



Şekil 5.10.Poliamid transpalet tekerleği.



Şekil 5.11. Yanal destek elemanı.



Şekil 5.12. Deney düzeneği genel görünüm.

5.3.2. Çevrimsel Yükleme Deneyi

Çevrimsel yükleme için TBDY-2018 Ek-10.C.1.4 Panel Deneyi Esasları referans alınmıştır. Buna göre her bir deneyin nasıl yapılacağı aşağıda açıklanmış ve deney yapılırken uygulanacak deney adımları ve çevrim sayıları çizelge 5.3’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3. TBDY-2018 deney adımları ve çevrim sayıları

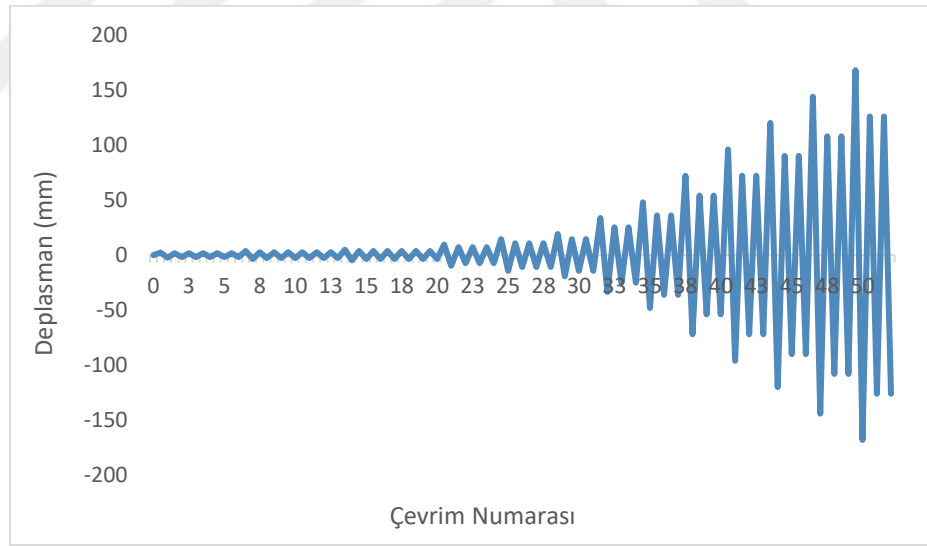
Adım	Çevrim Sayısı	İlk Çevrim Büyüklüğü (% D_{maks})
1	6	5
2	7	7,5
3	7	10
4	4	20
5	4	30
6	3	40
7	3	70
8	3	100
9	3	100+50
10	3	Model göçmesine kadar ek 50 artırımları

- Her adımda ilk çevrimden sonraki çevrimlerin büyüklüğü ilk çevrim büyüklüğünün %75'i olarak alınacaktır. D_{maks} tahmin edilen en büyük yerdeğiştirmedir ve bu değer ilk çevrimde uygulanan kuvvetin deney boyunca elde edilen en büyük kuvvetin % 80'inin altına düşmediği noktada elde edilir.
- D_{maks} değeri ayrıca, panel yüksekliğinin %2,5'ininden daha büyük olamaz.
- Yükleme sabit frekansta (0,2 – 0,5 aralığında) veya hızda (1,0 – 63, 55 mm/s) olacaktır.
- Modelin göçmesi, uygulanan kuvvetin en büyük kuvvete oranının 0,8 olduğu nokta olarak kabul edilir.

Yukarıda yer alan hususlar göz önünde bulundurularak D_{maks} değeri panel yüksekliğinin %2'si alınarak 48 mm ve yükleme hızı ise 1 mm/s olarak belirlenerek, çizelge 5.4'de hesaplanan çevrim büyüklükleri elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 5.13'de yüklem protokolünün grafiksel gösterimi yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Hesaplanan çevrim büyüklükleri

Adım	Çevrim Sayısı	İlk Çevrim Büyüklüğü (mm)
1	6	2,4
2	7	3,6
3	7	4,8
4	4	9,6
5	4	14,4
6	3	19,2
7	3	33,6
8	3	48
9	3	72
10	3	96
11	3	120
12	3	144
13	3	168



Şekil 5.13. Yükleme protokolünün grafiksel gösterimi

5.3.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması

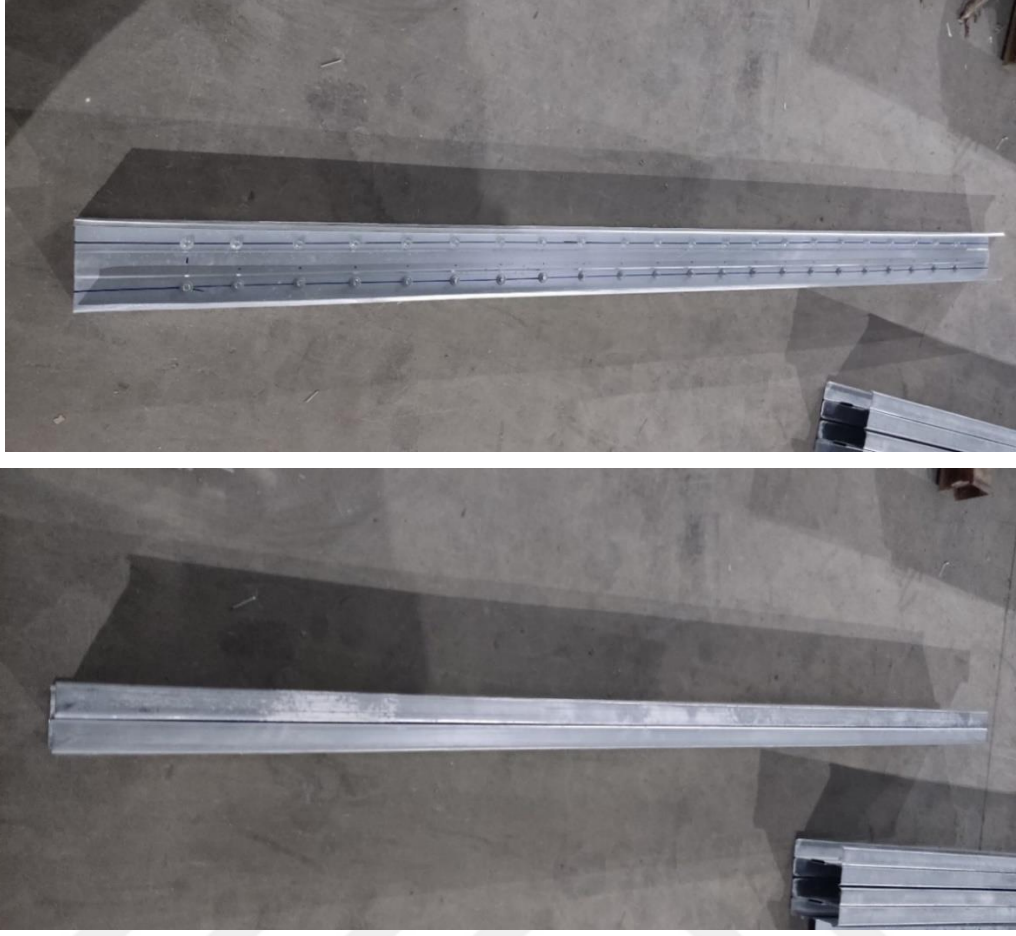
Çalışma konusu ilgili deney elemanlarına ait profiller, detayları bölüm 5.2’de verilen plaka halindeki sac malzeme İrem Prefabrik Çelik Yapı firmasında Architect marka roll-form makinesinde üretilmiştir.

Tasarımda benzerlikler taşıdığı için öncelikle W1, W2 ve W3 deney elemanlarına ait profiller üretilmiştir. Tüm profiller makineden çekildikten sonra birleşim aşamasına geçilmiştir.

Öncelikle kenar dikmeler için C profiller sırt sırta getirilerek vidalanmıştır. (Şekil 5.15)

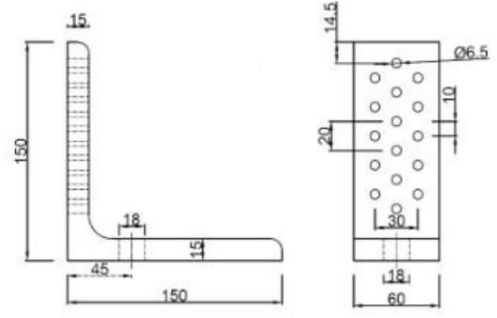


Şekil 5.14. 6,3 x 25 mm Matkap uçlu vida.



Şekil 5.15. Kenar dikmeler.

Deneyler sırasında yük aktarımını tam olarak sağlamak amacıyla detayları şekil 5.16’de verilen L150x150x15 köşebent, 8 cm uzunluğunda kesilmek suretiyle mesnet elemanı olarak kullanılması planlanmıştır. Söz konusu köşebentın bir kolu deney elemanına vidalanırken, diğer kolu ise M16 ankraj çubuğu ile deney düzeneğine mesnetlenmesi tasarlanmıştır.



Şekil 5.16. L150x150x15 köşebentden teşkil mesnet elemanı.

Sırt sırta hazırlanan C profiller hazırlandıktan sonra her iki uç noktalarından da Şekil 5.17’de gösterildiği şekliyle vidalanmıştır.



Şekil 5.17. Mesnet elemanının kenar dikmelere vidalanması.



Şekil 5.18. Hazırlanan kenar dikmeler.

Kenar dikmelerinin hazırlanması sonrası alt ve üst başlıklarda ankraj çubuklarının isabet edeceği noktalarda 18 mm çapında delikler açılmıştır. (Şekil 5.19)



Şekil 5.19. Alt ve üst başlıklar.

Bu aşamada kenar dikmeler alt ve üst başlıklarla birleştirilmesi suretiyle gönye kontrolleri ayrı ayrı yapılmıştır. (Şekil 5.20)



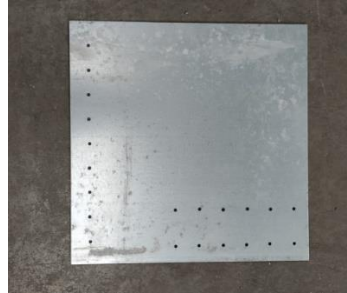
Şekil 5.20. Alt ve üst başlıklar ile kenar dikmelerin birleştirilmesi.

Deneyler sırasında başlıklarda lokal deformasyonları azaltmak adına eksenel gerilmelerin fazla olması beklenen kenar dikmelerin yanları kapama profili ile güçlendirilmiştir. (Şekil 5.21)



Şekil 5.21. Alt ve üst başlıkların güçlendirilmesi.

Şerit çaprazların vidalanacağı eleman olan guse plakaları 250x250 mm ölçülerinde kesilerek, delikleri yaklaşık 3-4 mm çapında olacak şekilde öncesinde açılmıştır. Burada açılan deliklerin yük aktarımında problem olmaması için vida çapından küçük açılmıştır. (Şekil 5.22)



Şekil 5.22. 250x250 mm boyutlarında guse plakası.

Panelin hem ön yüzüne hem de arka yüzüne olmak üzere köşe noktalara guse plakalar kenar dikmeler, u profiller ve berkitme profilleri birlikte vidalanmıştır. (Şekil 5.23)



Şekil 5.23. Panel köşe noktası teşkili

Burkulma boyunu azaltmak amacıyla panel orta noktasına Şekil 5.24’de yer alan ve U profilden teşkil eleman, eksenel yükün en çok zorlayacağı elemanlar olan kenar dikmelere yakın bölgelerde vidalanmıştır. İlgili elemanın aynı zamanda dikmelerin kaymamasını da sağlayacağı açıktır.



Şekil 5.24. Orta kuşak blok elemanı.

Deney elemanının çaprazların vidalanmasından önceki genel görüntüsü Şekil 5.25’da yer almaktadır.



Şekil 5.25. Deney elemanı genel görünüm.

Guse plakaları tamamlandıktan sonra çaprazların vidalanması işlemine geçilmiştir. Bu noktada en çok dikkat edilen husus, şerit çaprazların gergin bir şekilde vidalanması olacaktır. Aksi takdirde eleman belli bir noktaya kadar yük almayacaktır. Bunun için öncelikle çaprazın bir köşesi vidalar tamamlandıktan sonra diğer köşesinden köşebent ile tutturulup f tipi mengene ile gerdirilmiş ve diğer köşe de vidalanmıştır. (Şekil 5.26)



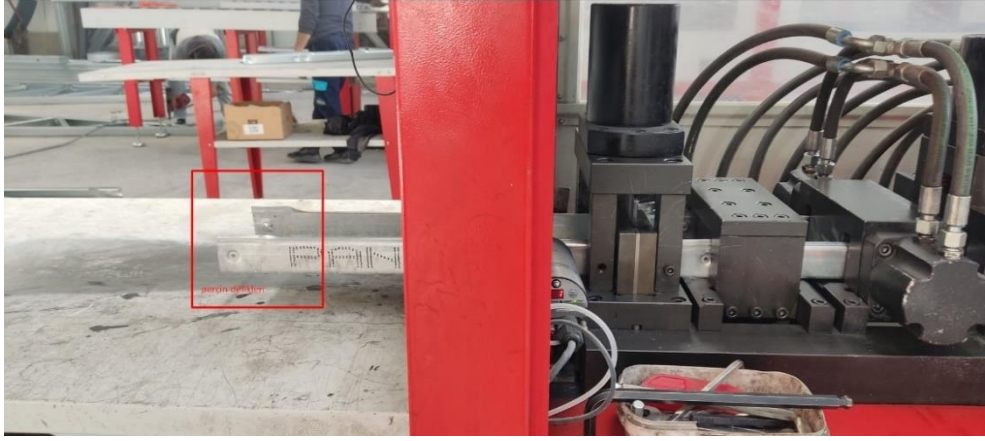
Şekil 5.26. Şerit çapraz elemanın mengene ile gerdirilmesi.

W1, W2 ve W3 deney elemanları benzer şekillerde imalatları tamamlandıktan sonra W4 ve W5 deney elemanlarına geçilmiştir. W4 ve W5 elemanları diğerlerinden farklı olarak bağlantı elemanı olarak vida yerine perçin kullanılmıştır.

Hafif çelik sektöründe kullanılan panellerin daha hızlı üretilmesi amaçlandığı için yapılan gözlem ve değerlendirmelerde genelde W4 deney elemanı tasarımlarda kullanılmaktadır. Benzer panellerin tercih edilmesinin bir diğer nedeni de makinelerin tasarıma göre profil bükülürken perçin deliklerinin de eş zamanlı olarak açılması iş kaybını da engellemektedir. (Şekil 5.27)



Şekil 5.27. Panel tasarımının büküm makinesine yüklenmesi.



Şekil 5.28. Büküm sırasında perçin deliklerinin açılması

Tüm profiller tasarımdaki ölçülerine göre perçin delikli şekilde üretildikten sonra yerde birleştirme işlemine başlanılmıştır. (Şekil 5.29)



Şekil 5.29. W4 ve W5 numunesine ait profil yerleşimi

İlgili tüm profiller Şekil 5.30'de gösterildiği gibi 6 mm çapında perçin ve tabancası ile hızlı bir şekilde montajı yapılmış ve genel görünümü Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. Perçinli birleşim



Şekil 5.31. W4 elemanı genel görünümü.

W5 deney elemanı şerit çaprazları 60 mm genişliğindeki elemanın orta 100 mm'lik kısmında lazer kesimle kesitin 40 mm'ye düşürülmesi ile elde edilmiştir. (Şekil 5.32)



Şekil 5.32. W5 deney elemanı çaprazı

Tüm deney elemanların tamamlanmasına müteakip elemanlar Yapı Laboratuvarına sevki sağlanmıştır. (Şekil 5.33)



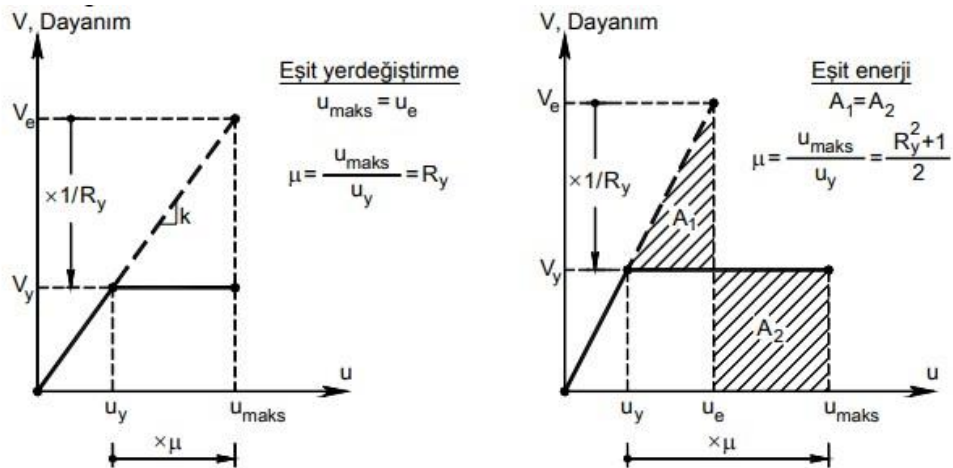
Şekil 5.33. Deney elemanlarının laboratuvara sevki.

5.3.4. Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarının grafikleştirilerek yorumlanmasında eşit yerdeğiştirme ve eşit enerji kavramlarının açıklanmasına ihtiyaç vardır.

Eşit yerdeğiştirme kavramı, aynı deprem etkisi altında başlangıç periyotları aynı ve spektrum hız bölgesinde bulunacak kadar uzun olan doğrusal elastik ve doğrusal elastik olmayan sistemlerin en büyük yerdeğiştirme değerlerinin yaklaşık olarak eşit olacağını öngören ve gözleme dayanarak ulaşılan bir yaklaşıma verilen addır. Bu yaklaşımın geçerliliği, ancak çok sayıda deprem etkisi altında elde edilen çözümlerin ortalaması alındığında görülebilmektedir.

Eşit enerji kavramı ise doğrusal elastik olmayan bir sistemin deprem etkisi altında yapabileceği en büyük yerdeğiştirme değerine kadar monotonik olarak itmek için gerekli enerjinin eşlenik doğrusal elastik sisteme sözde hız spektrumu kullanılarak hesaplanan depremin aktardığı enerjiye eşit olduğu kabulüne karşı gelen yaklaşıma verilen addır. Bu yaklaşım periyotları spektrum hız bölgesindeki değerlerden küçük olan sistemlerde geçerlidir ve bu tür sistemlerde elastik yerdeğiştirme elastoplastik sistemdekinden daha küçük olup yaklaşık eşitlik elastik yerdeğiştirmenin birden büyük ve süneklik oranına bağlı bir katsayı ile çarpılması ile sağlanabilir. (Darılmaz, 2019)



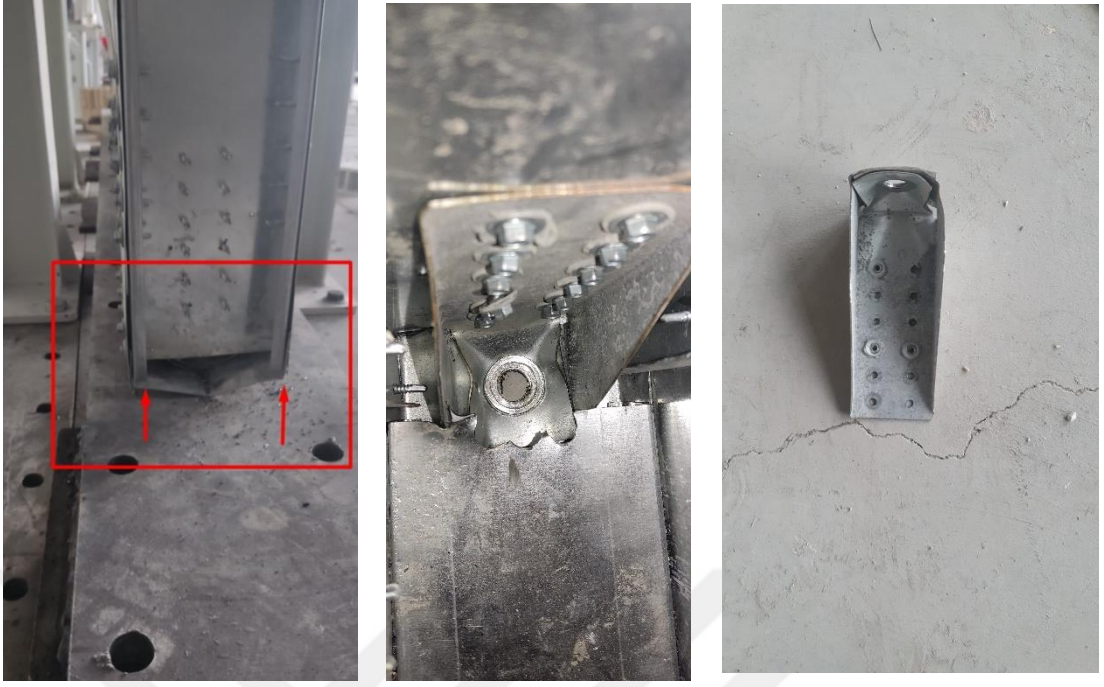
Şekil 5.34. Eşit yerdeğiştirme ve eşit enerji kavramları

5.3.4.1. W0 Deney Elemanı

İlgili deney elemanının tasarımı W1 deney elemanı ile aynı olup sadece yük aktarma elemanları farklıdır. Hafif çelik yapı endüstrisinde panel üretimlerinde yük aktarımında kullanılan elemanlar genelde 1,5-2,5 mm et kalınlığında profillerin bükülmesi suretiyle elde edilmektedir (Şekil 5.35). Kullanılan buna benzer elemanların performansının gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Ancak Şekil 5.36’de görüldüğü üzere yükleme yapılan numunenin kenar dikmelerinde yer alan ve deney düzeneğine mesnetlenmesini sağlayan eleman deforme olmuştur. Bu durumda deneysel verilerin elde edildiği tepe deplasman değerlerini etkileyeceği için herhangi bir grafik elde edilmemiştir. Sonuç olarak deney elemanı W0 olarak isimlendirilerek; W1 deney numunesi mesnet elemanı değiştirilerek tekrarlanacaktır.



Şekil 5.35. Yük aktarma elemanı



Şekil 5.36. Mesnet elemanı deformasyonu

5.3.4.2. W1 Deney Elemanı

İlgili deney elemanı detayları bölüm 5.3.2’de verilen test protokolü ile depreme benzeştirilen tersinir yükleme altında Şekil 5.37’de genel görünümü yer alan şekli ile yükleme yapılmıştır. Deneyin 5. adımında şekil 5.38’de görüldüğü üzere çaprazlarda burkulma ve guse plakalarında deformasyonlar görülmeye başlamıştır. İlerleyen adımlarda şekil 5.39’de görüldüğü şekliyle orta kuşaklarda lokal deformasyonlar görülmeye başlamış ve çaprazlarda burkulma artmıştır. Deneyin 10. adımlarına doğru şekil 5.40’de görüldüğü gibi kenar dikmelerde burkulmalar görülmüştür. Yüklemenin devam ettirilmesi üzerine şekil 5.41’da görüldüğü üzere şerit çapraz sağ üst köşe guse plakası birleşim yerinden kopmuştur.



Şekil 5.37. W1 elemanı deney düzeneğinde genel görünümü.



Şekil 5.38. W1 deney elemanı çaprazlarda burkulma ve guse plaka deformasyonu



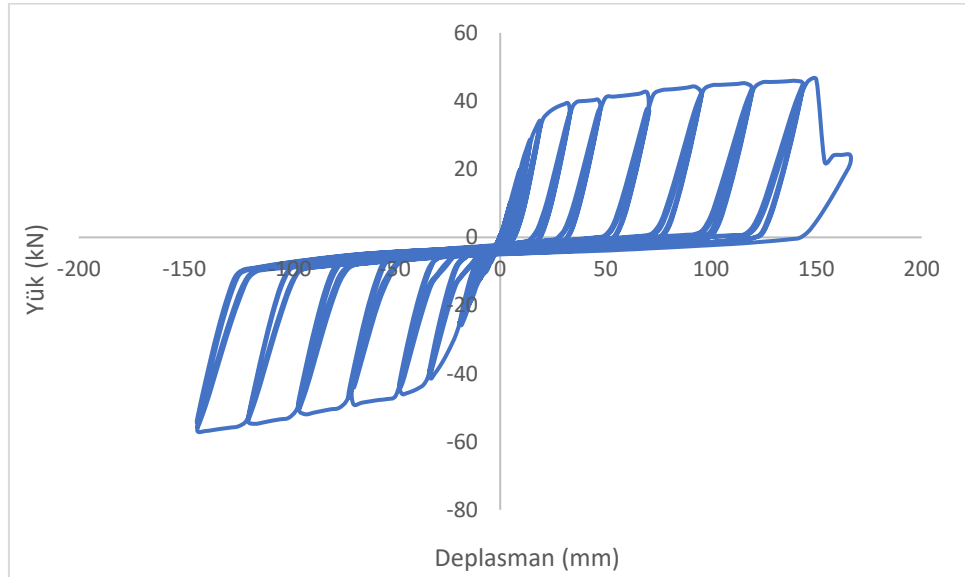
Şekil 5.39. W1 deney elemanı orta kuşakta deformasyon ve çapraz burkulması



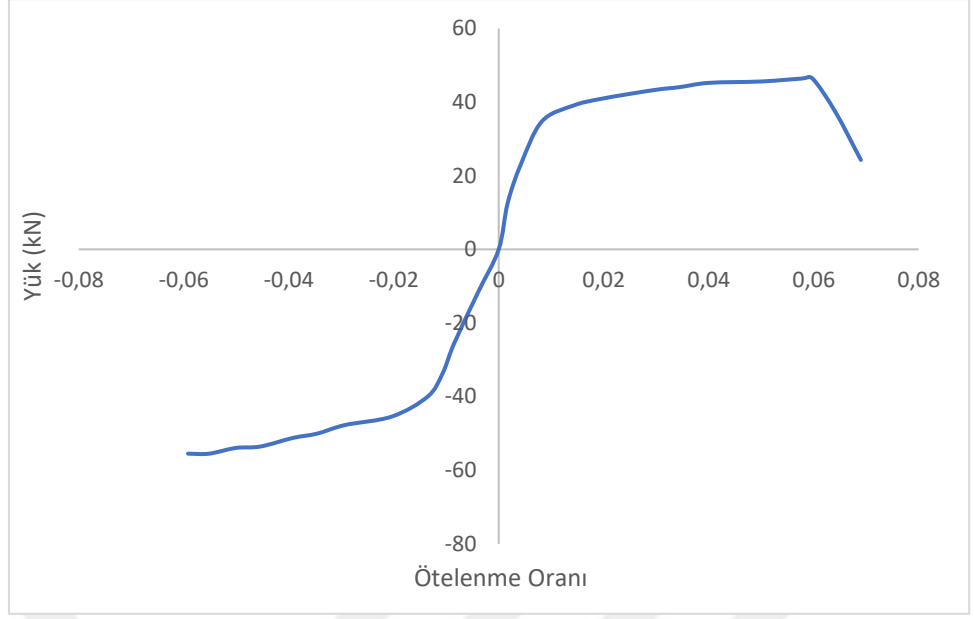
Şekil 5.40. W1 deney elemanı kenar dikmelerde burkulma



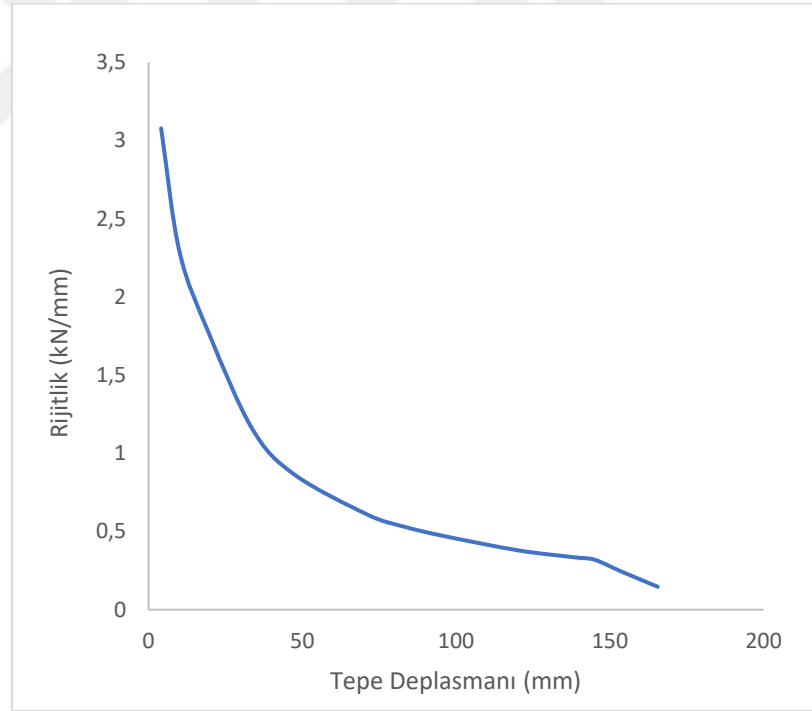
Şekil 5.41. W1 deney elemanı şerit çaprazın kopması



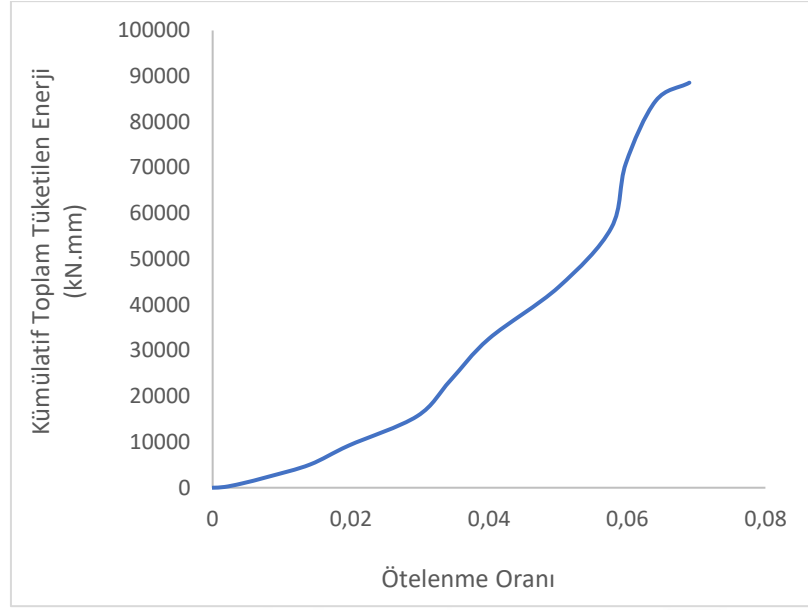
Şekil 5.42. W1 deney elemanı yük-deplasman eğrisi



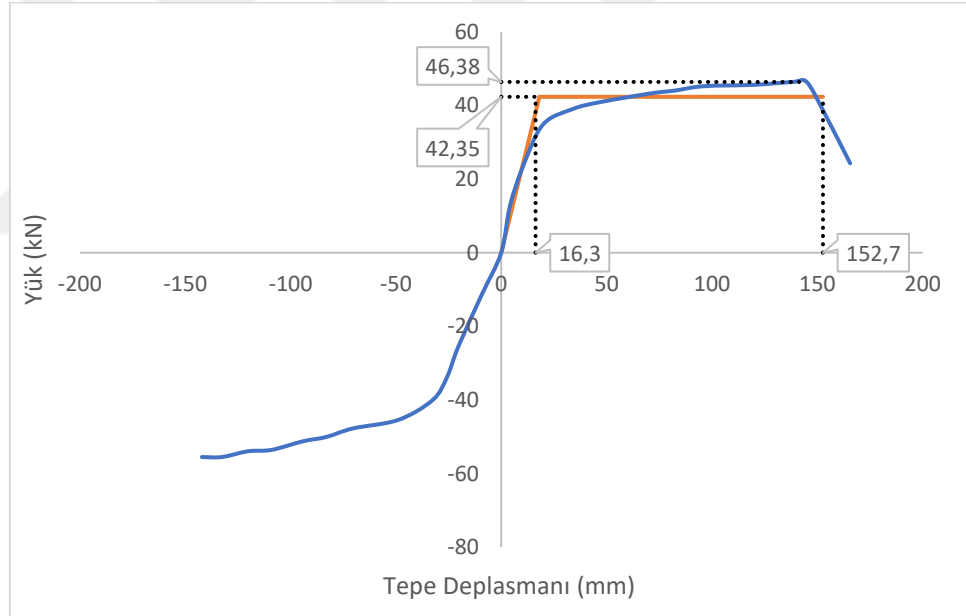
Şekil 5.43. W1 deney elemanı tepe deplasmana göre ötelenme oranı.



Şekil 5.44. W1 deney elemanı itme yönü rijitlik azalım grafiği



Şekil 5.45. W1 deney elemanı kümülatif enerji tüketimi



Şekil 5.46. W1 deney elemanı EEEP grafiği

5.3.4.3. W2 Deney Elemanı

Deney düzeneğindeki görüntüsü şekil 5.47’da yer alan numunede benzer şekilde deneyin 5. adımında yaklaşık 15 mm deplasmanda guse plakalarında deformasyonlar görülmüştür. 6 ve 7. adımlarda bu deformasyonlar artmakla birlikte orta kuşakta lokal

şekil değiştirmeler gözlemlenmiştir. 8. adımda kenar dikmelerde burkulmalar görölmüştür. 9. adımda ise yaklaşık 72 mm deplasmanda şerit çapraz vida yan yatma hasarı olarak panel yük almamaya başlamış ve deney bu adımda sonlandırılmıştır.



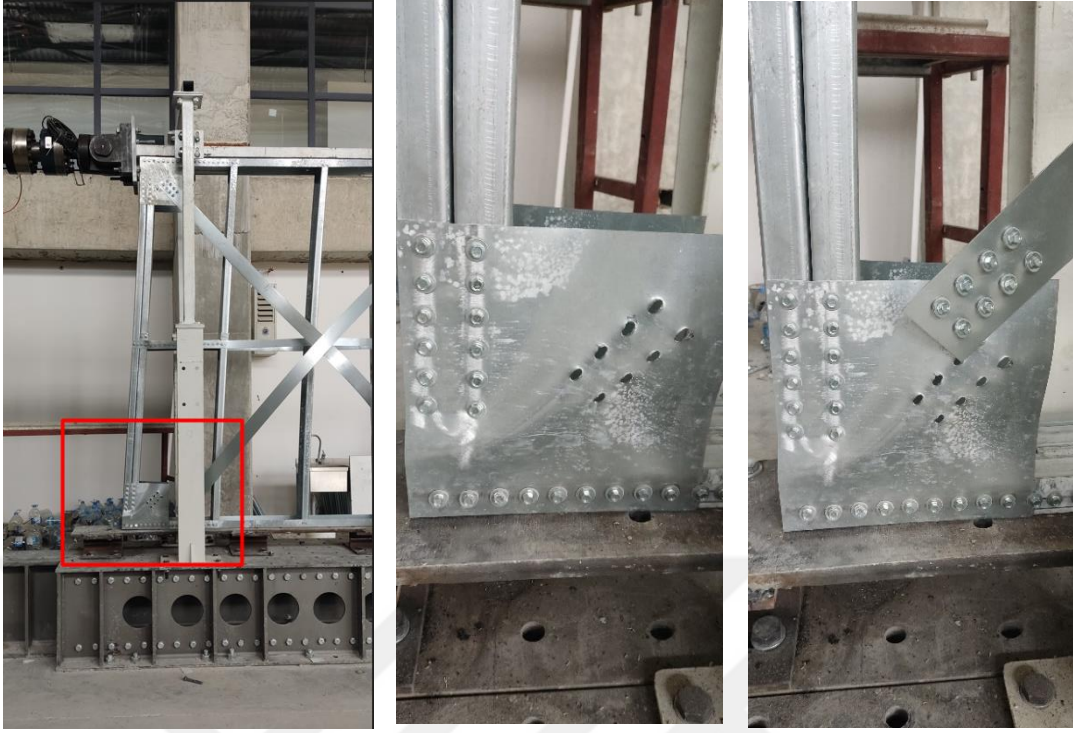
Şekil 5.47. W2 elemanı deney düzeneğinde genel görünümü.



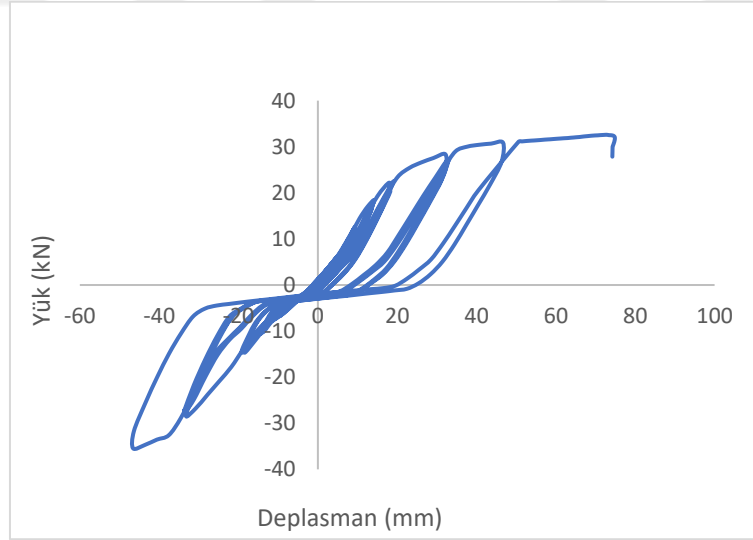
Şekil 5.48. W2 deney elemanı guse plakalarında oluşan deformasyon.



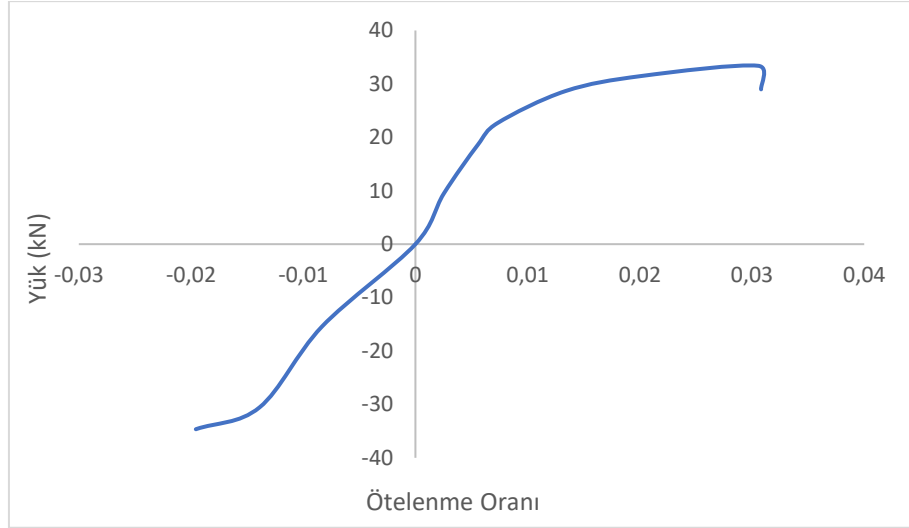
Şekil 5.49. W2 deney elemanı kenar dikmelerde burkulma hasarı.



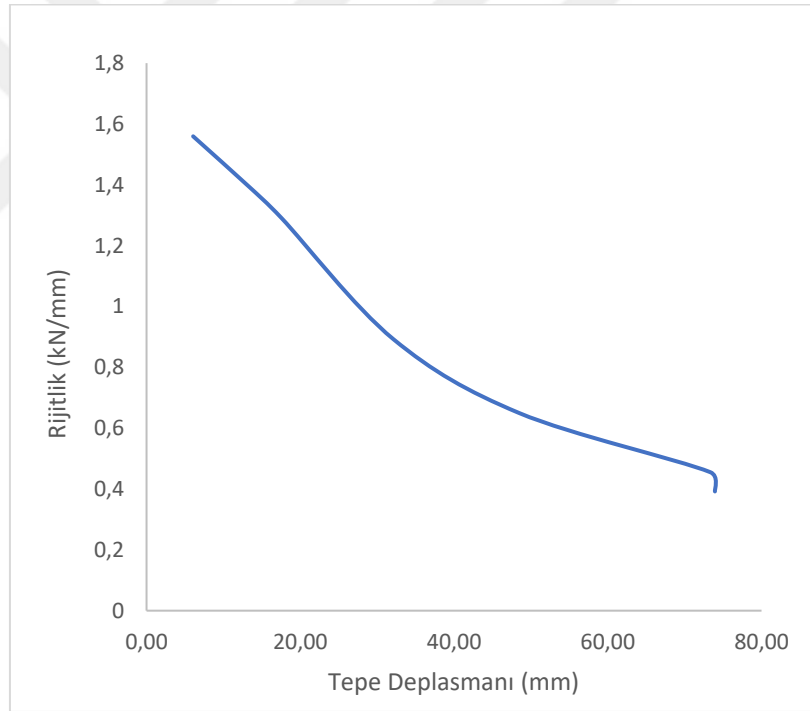
Şekil 5.50. W2 deney elemanı vida yan yatma hasarı.



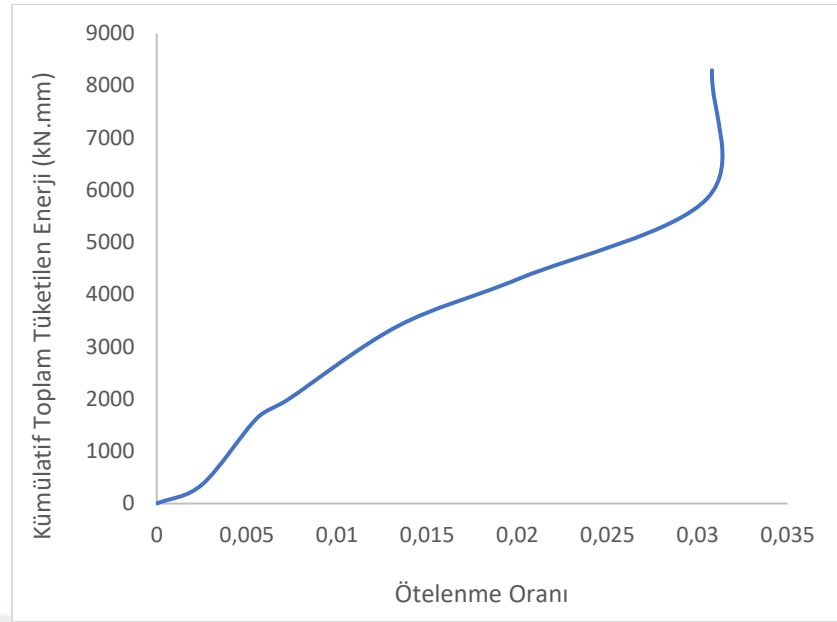
Şekil 5.51. W2 deney elemanı yük-deplasman eğrisi



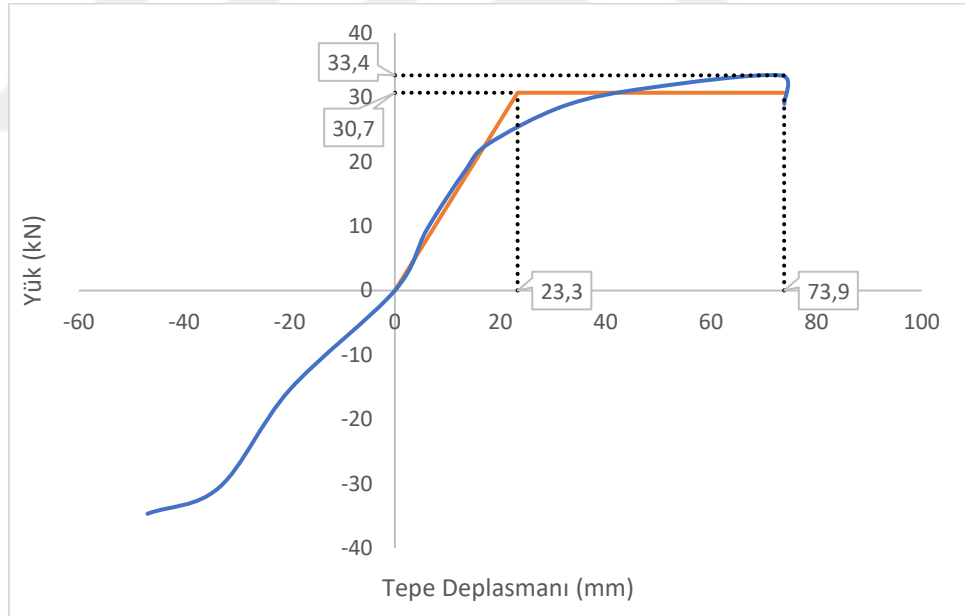
Şekil 5.52. W2 deney elemanı tepe deplasmana göre ötelenme oranı.



Şekil 5.53. W2 deney elemanı itme yönü rijitlik azalım grafiği



Şekil 5.54. W2 deney elemanı kümülatif enerji tüketimi



Şekil 5.55. W2 deney elemanı EEEP grafiği

5.3.4.4. W3 Deney Elemanı

İlgili numunenin deney düzeneğindeki genel görünümüne şekil 5.56'de yer verilmiştir. Diğer elemanlarda olduğu gibi benzer şekilde deneyin 5. adımında guse plakasında deformasyonlar görülmüştür. Diğer numunelerden farklı olarak orta kuşak bölgesinde önemli bir şekil değiştirme görülmemiştir. Bunun nedeninin en-boy oranındaki farklılıktan kaynaklandığı düşünülebilir. Deneyin 8. adımında yaklaşık 70 mm deplasmanda kenar dikmelerde burkulmalar görülmeye başlanmıştır. Buna rağmen yükleme yapılmaya devam edilmiş ve deneyin 9. adımında numune yük almamaya başlamıştır.



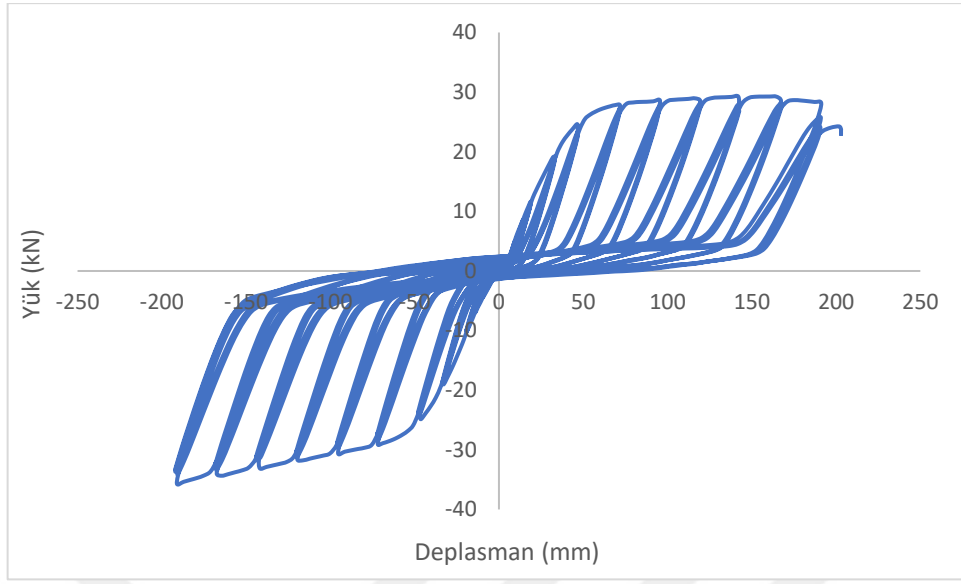
Şekil 5.56. W3 elemanı deney düzeneğinde genel görünümü.



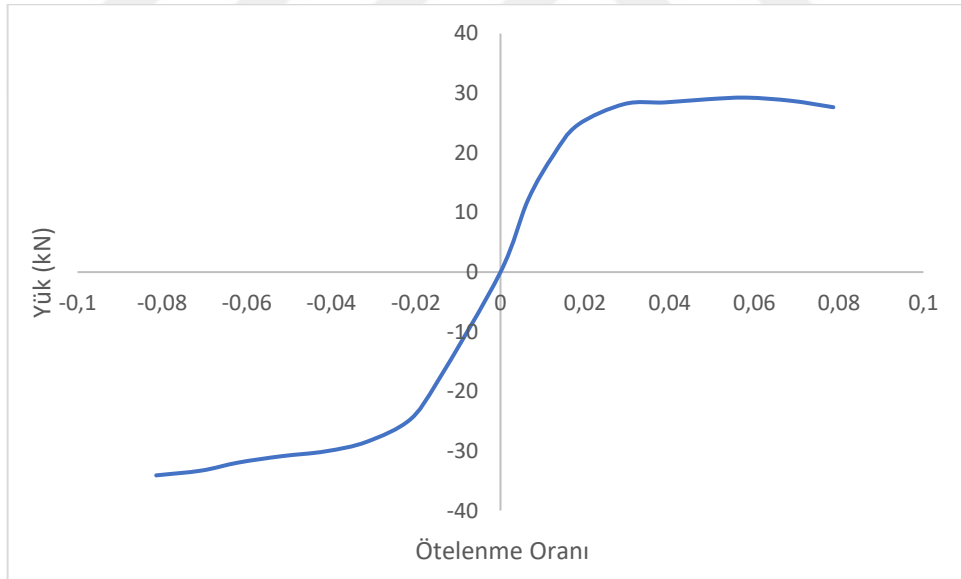
Şekil 5.57. W3 deney elemanı guse plakalarında oluşan deformasyon.



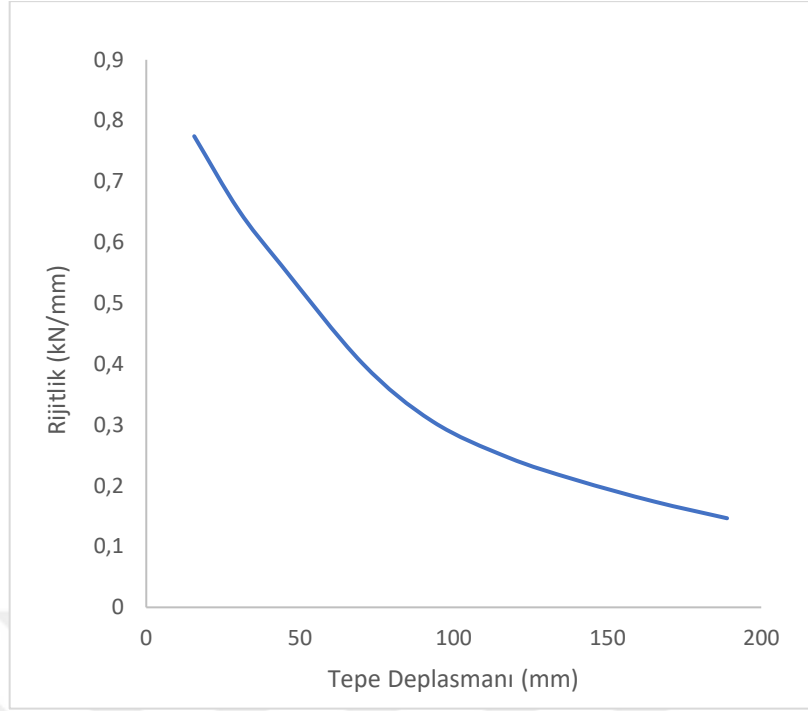
Şekil 5.58. W3 deney elemanı kenar dikmelerde burkulma hasarı.



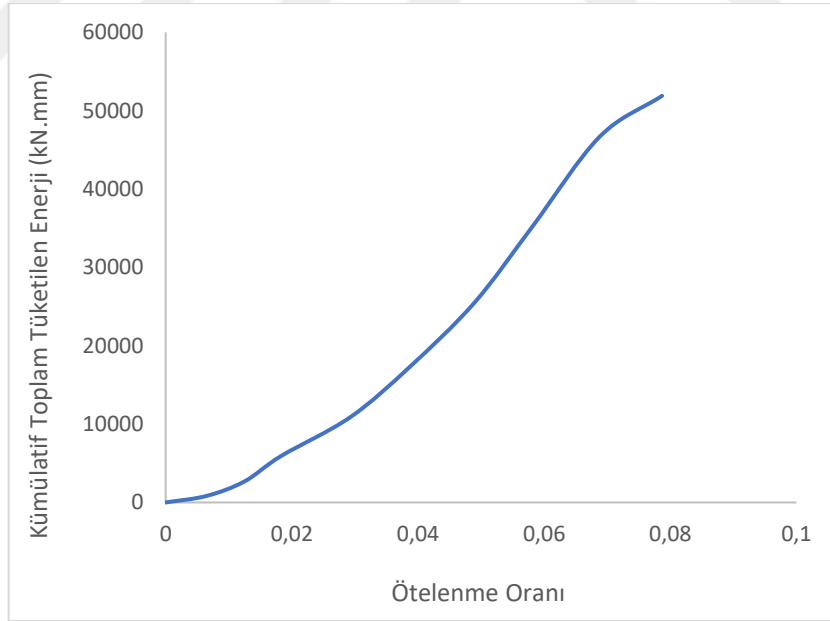
Şekil 5.59. W3 deney elemanı yük-deplasman eğrisi



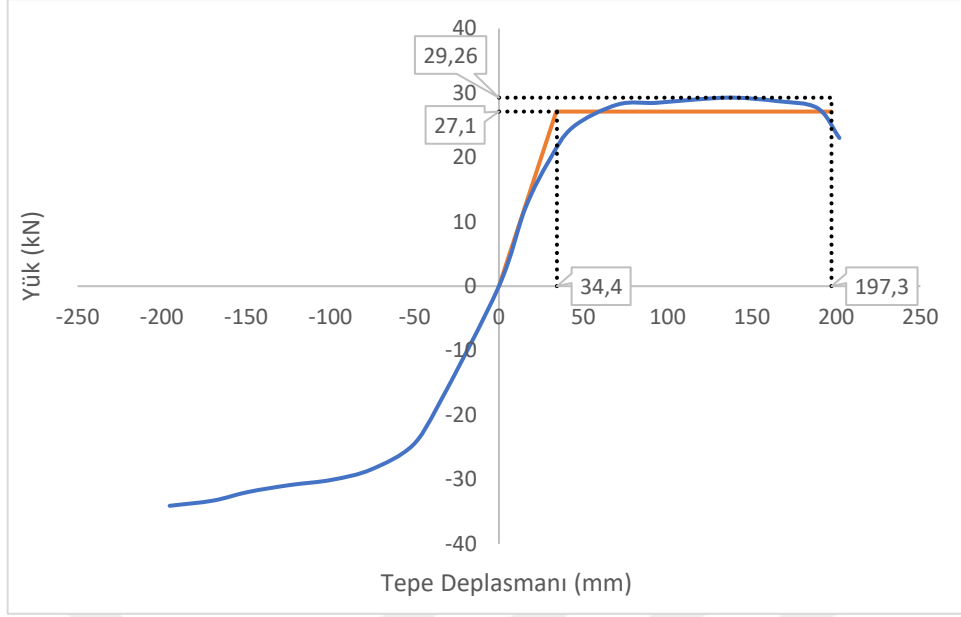
Şekil 5.60. W3 deney elemanı tepe deplasmana göre ötelenme oranı.



Şekil 5.61. W3 deney elemanı itme yönü rijitlik azalım grafiği



Şekil 5.62. W3 deney elemanı kümülatif enerji tüketimi



Şekil 5.63. W3 deney elemanı EEEP grafiği

5.3.4.5. W4 Deney Elemanı

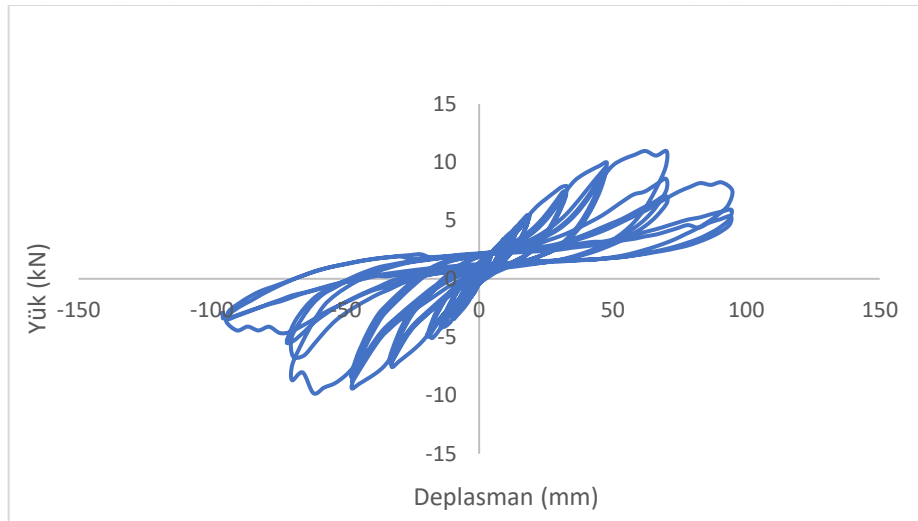
İlgili deney numunesi ait düzenekteki görünüm şekil 5.64’de yer almaktadır. Aynı yükleme protokolü ile eleman tersinir olarak yüklenmiş ve 7.adımda perçin atımlar görülmeye başlanmıştır. Yaklaşık 90 mm deplasmanda numune perçinlerin boşa çıkması ile yük aktarma özelliğini kaybetmiş ve yük almamaya başlamıştır. Bu aşamada deney sonlandırılmıştır.



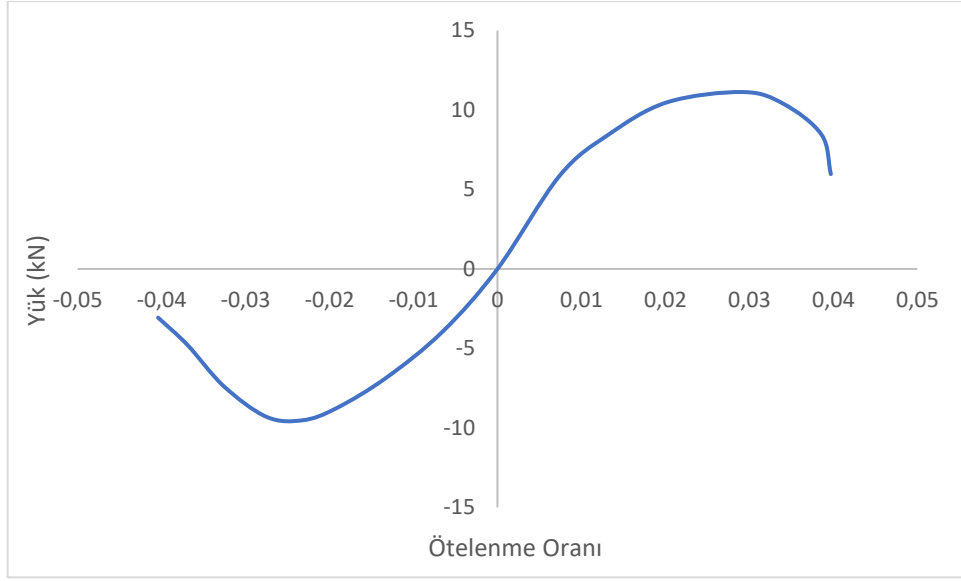
Şekil 5.64 W4 elemanı deney düzeneğinde genel görünümü.



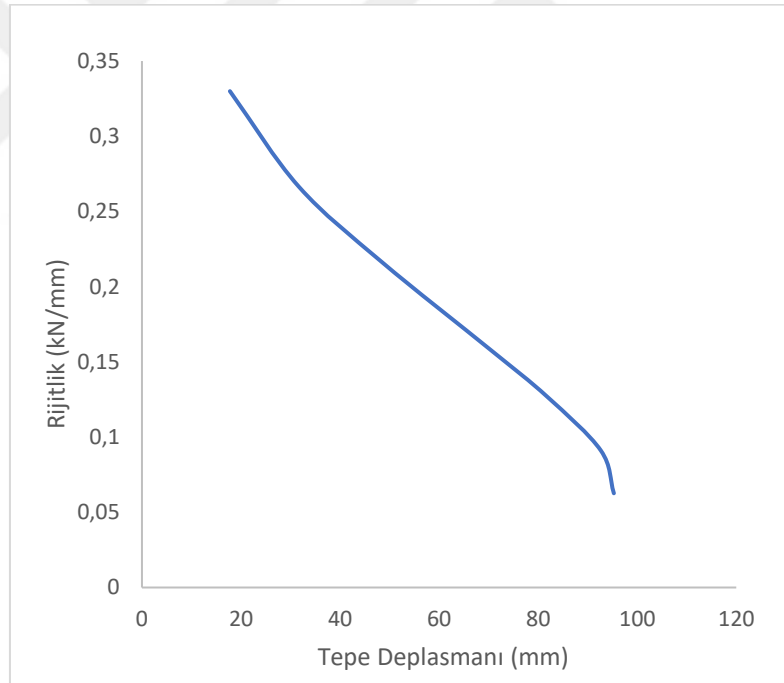
Şekil 5.65. W4 deney elemanı perçin atması.



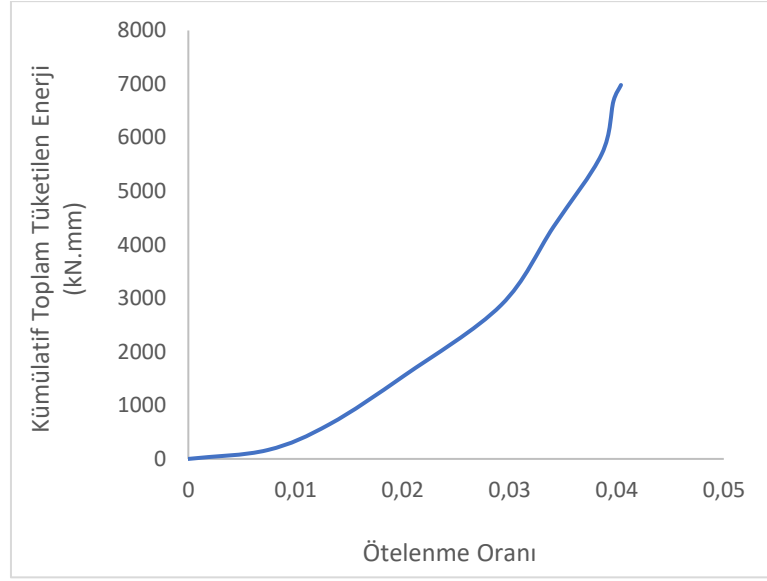
Şekil 5.66. W4 deney elemanı yük-deplasman eğrisi



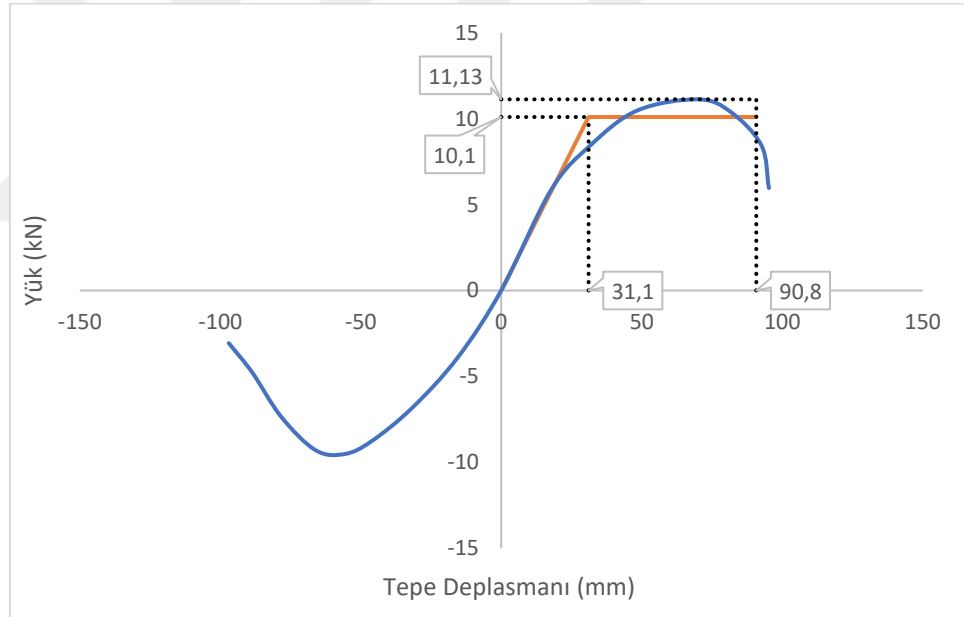
Şekil 5.67. W4 deney elemanı tepe deplasmana göre ötelenme oranı.



Şekil 5.68. W4 deney elemanı itme yönü rijitlik azalım grafiği



Şekil 5.69. W4 deney elemanı kümülatif enerji tüketimi



Şekil 5.70. W4 deney elemanı EEEP grafiği

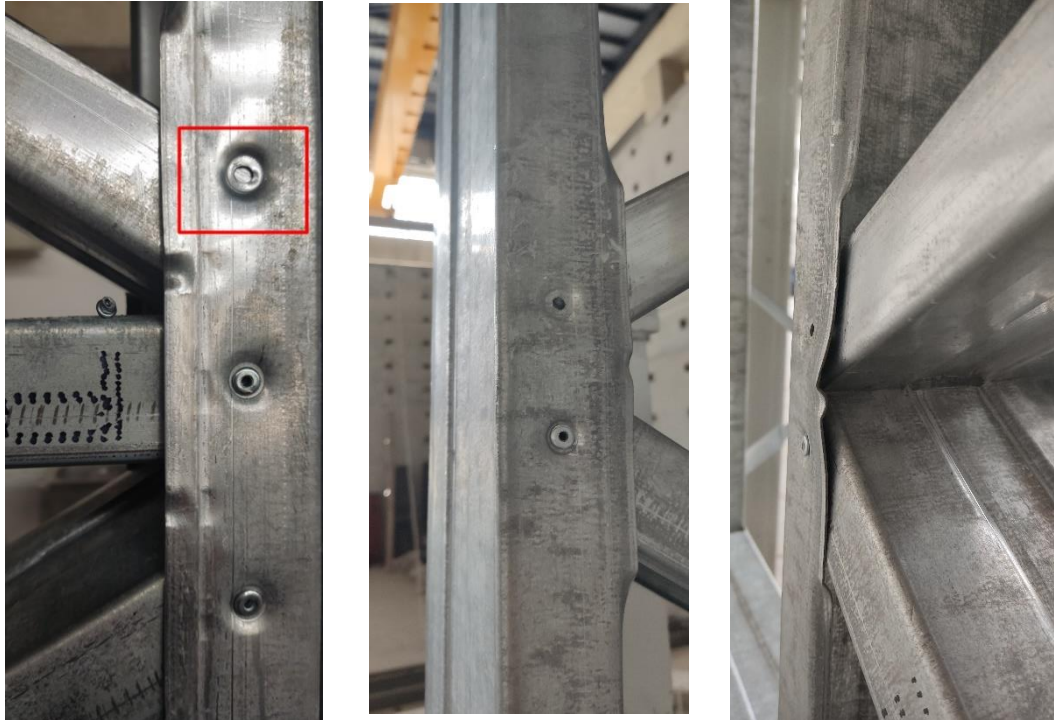
5.3.4.6. W5 Deney Elemanı

İlgili deney elemanı W4 numunesine ilave olarak her iki yüze de şerit çapraz vidalanması suretiyle oluşturulmuştur. Dolayısıyla W4 ve W1 elemanlarındaki davranışlardaki özellikler beklenebilir. Elemanın düzenekteki genel görünümü Şekil

5.71’da yer almaktadır. Aynı yükleme protokolü çerçevesinde tersinir yükleme yapılmış ve W4 elemanına göre dayanımdaki ve enerji tüketimindeki artış tespit edilmiştir. Yaklaşık olarak 90 mm deplasmanda perçin atması görülmüş ancak eleman yük almaya devam etmiştir. Diğer numunelerden farklı olarak yaklaşık 100 mm deplasmanda alt başlıkta lokal burkulmalar görülmüştür. Nihayetinde şerit çapraz azaltılmış kesitten kopmuş ve göçme mekanizması gerçekleşmiştir.



Şekil 5.71. W5 elemanı deney düzeneğinde genel görünümü.



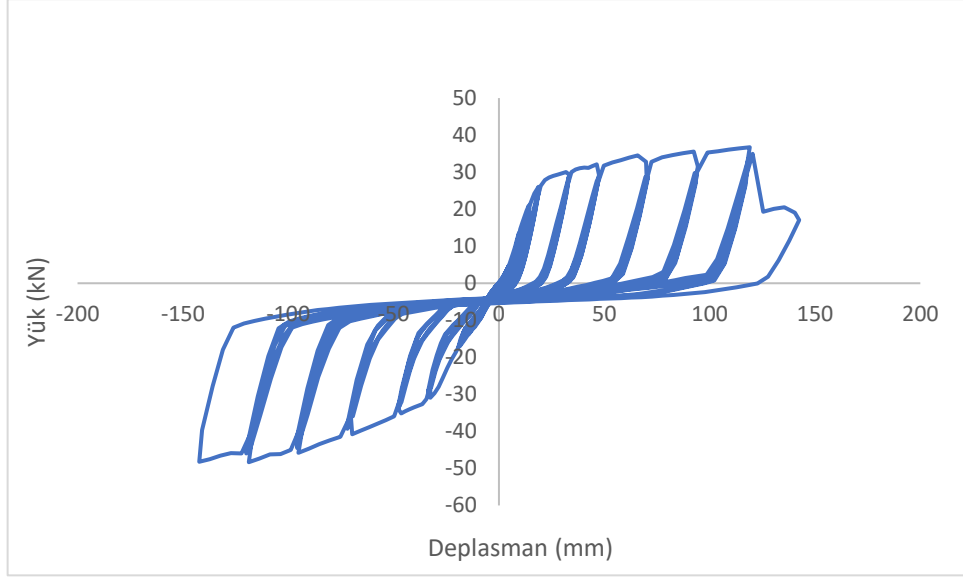
Şekil 5.72. W5 deney elemanı perçin atması.



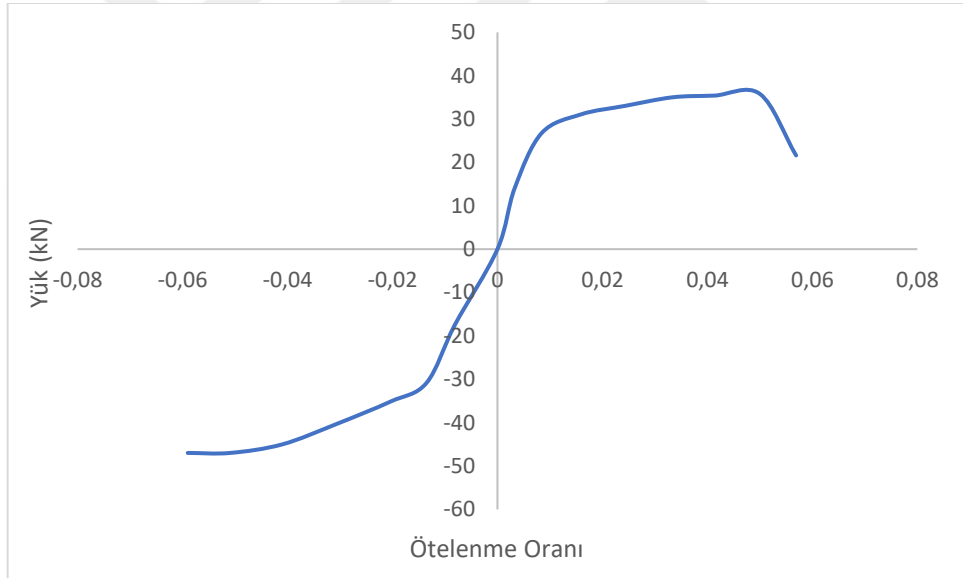
Şekil 5.73. W5 deney elemanı alt başlıklarda deformasyonlar.



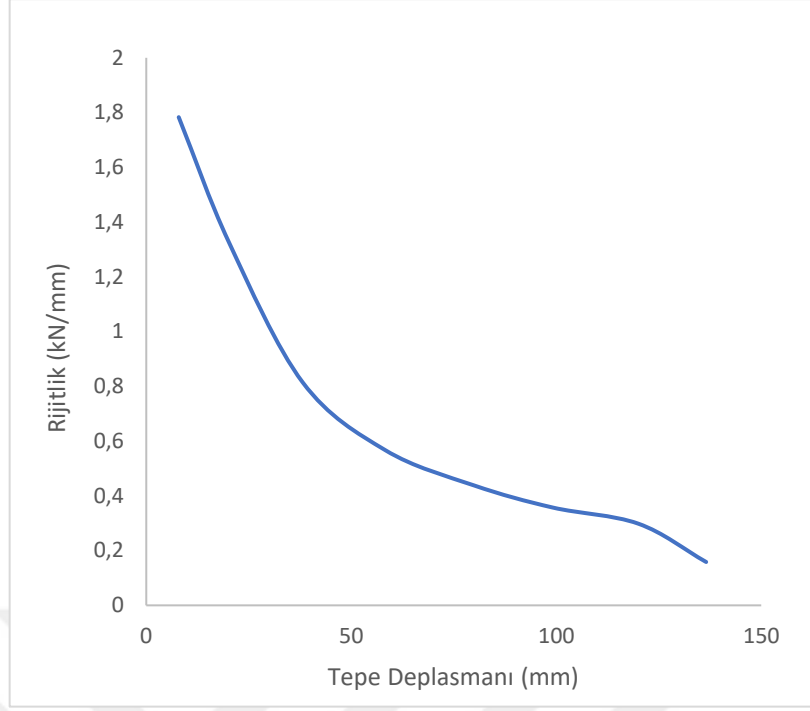
Şekil 5.74. W5 deney elemanı şerit çaprazın kopması.



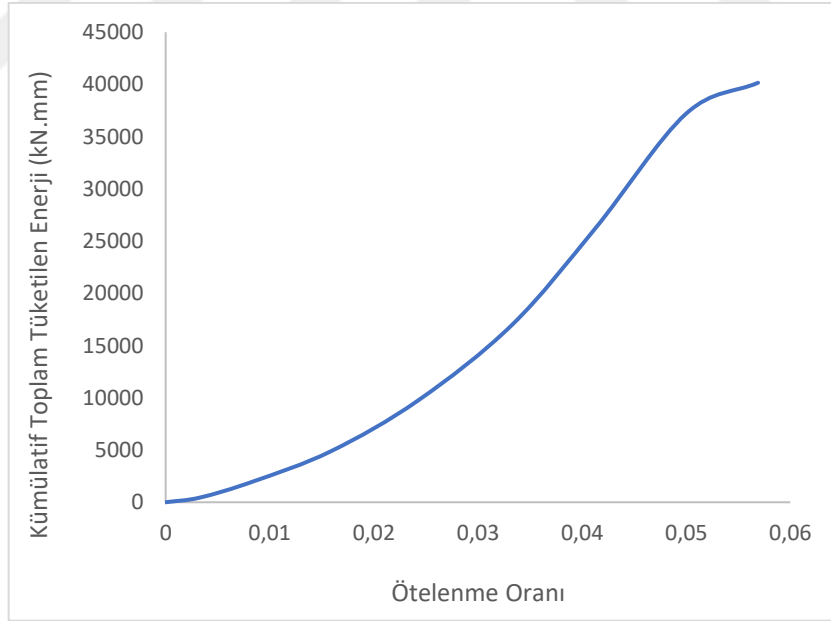
Şekil 5.75. W5 deney elemanı yük-deplasman eğrisi



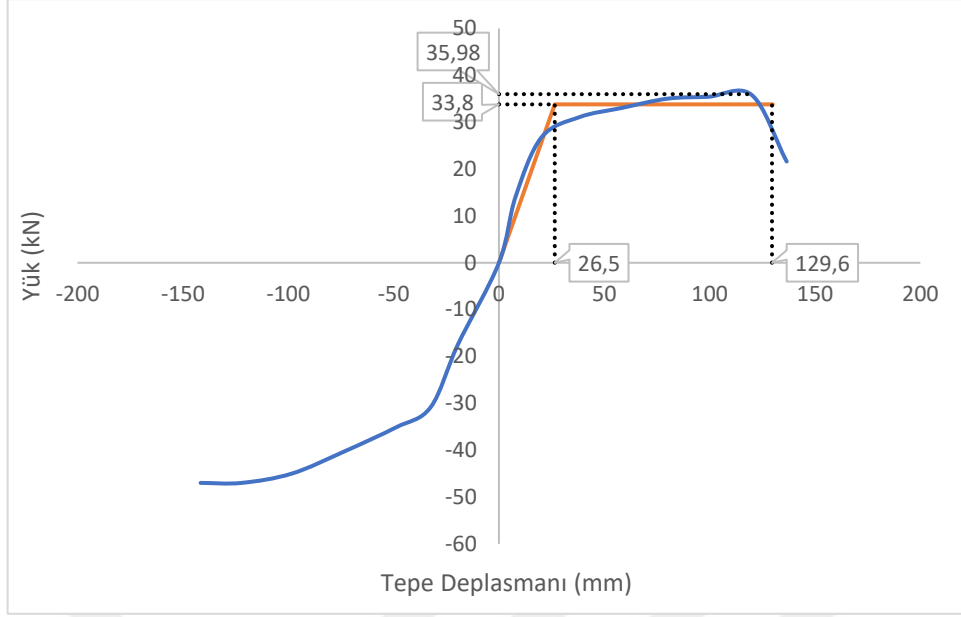
Şekil 5.76. W5 deney elemanı tepe deplasmana göre ötelenme oranı.



Şekil 5.77. W5 deney elemanı itme yönü rijitlik azalım grafiği



Şekil 5.78. W5 deney elemanı kümülatif enerji tüketimi



Şekil 5.79. W5 deney elemanı EEEP grafiği

5.3.4.7. Dayanım ve Rijitlik Değerlerinin Deneyel Veriler Doğrultusunda Değerlendirilmesi

Deneyel sonuçlara göre elde edilen dayanımlar %2, %2,5 ve %3 ötelenme oranlarına göre çizelge 5.5’de yer verilmiştir. 3 farklı ötelenme oranında da dayanımların önemli bir değişkenlik göstermediği görülmektedir.

Çizelge 5.5. Farklı ötelenme oranlarına göre dayanım değerleri

Deney Elemanı	Dayanım (kN)		
	%2 Ötelenme Oranı	%2,5 Ötelenme Oranı	%3 Ötelenme Oranı
W1	40,9	41,8	43,2
W2	31,5	32,1	32,3
W3	25,4	26,3	28,1
W4	10,4	10,7	11,1
W5	32,6	33	34,2

Bölüm 5.3.4’de yer verilen eşit yerdeğiştirme ve eşit enerji kavramlarına göre deneyel sonuçlara ait hesaplanan rijitlik değerleri çizelge 5.6’de; süneklik değerleri ise

çizelge 5.7’da gösterilmiştir. Bunlarla birlikte şekil 5.80 ve şekil 5.81’de deney sonuçlarının grafiksel gösterimine yer verilmiştir.

Çizelge 5.6. Deneyisel sonuçlara göre rijitlik değerleri

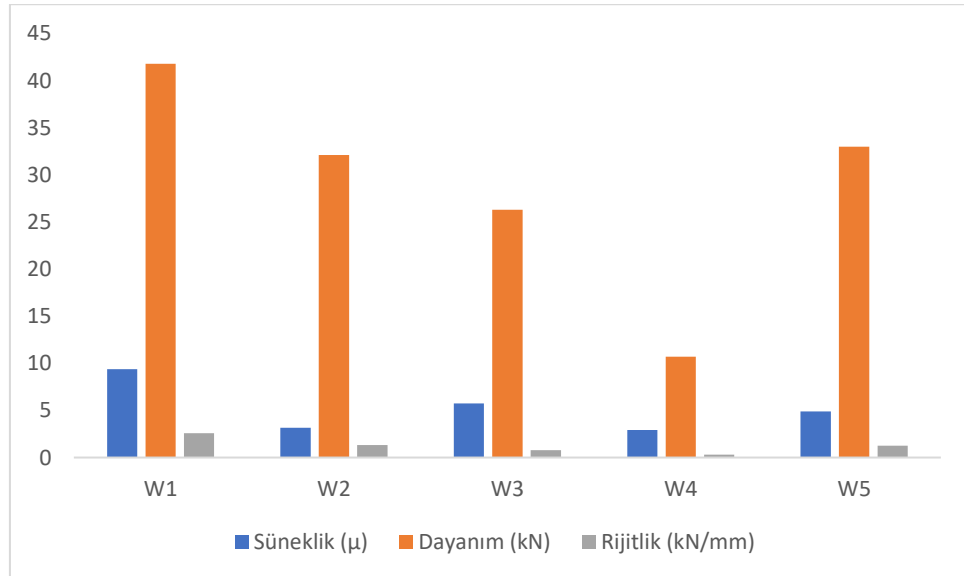
Deney Elemanı	Rijitlik (kN/mm)	$R_{\text{eleman}} / R_{\text{referans}}$
W1*	2,59	1,00
W2	1,31	0,51
W3	0,78	0,30
W4	0,32	0,12
W5	1,27	0,49

*Referans deney elemanı

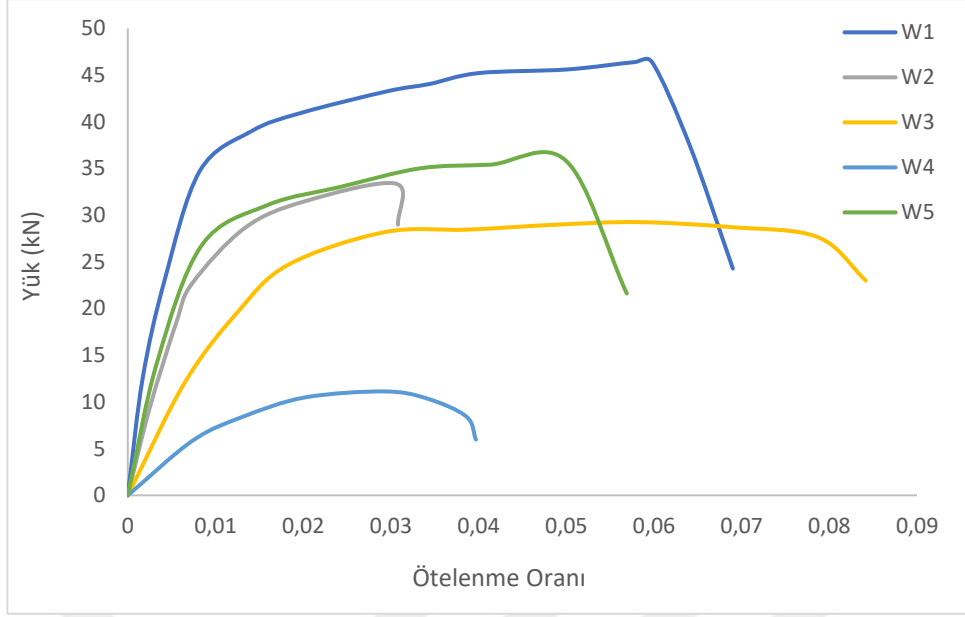
Çizelge 5.7. Deneyisel sonuçlara göre süneklik değerleri

Deney Elemanı	Süneklik (μ)	$\mu_{\text{eleman}} / \mu_{\text{referans}}$
W1*	9,37	1,00
W2	3,17	0,34
W3	5,74	0,61
W4	2,91	0,31
W5	4,89	0,52

*Referans deney elemanı



Şekil 5.80. Deney sonuçlarının grafiksel gösterimi.



Şekil 5.81. Deneysel sonuçlara ait yük-ötelenme oranı grafiği.

5.3.4.8. Davranış Katsayısının Deneysel Veriler Doğrultusunda Değerlendirilmesi

Şerit çaprazlı panel testlerinin sonuçları, elemanın yatay yük performansını değerlendirmek için davranış katsayısı (R) üzerinden deneysel bazlı bir analiz ile değerlendirilecektir. Konu hakkında (Uang, 1991) tarafından yapılan çalışmada denklem 5.1 tanımlanmıştır. Buna göre R_d , sistemin sismik enerjiyi sönmüleme yeteneğini ve R_0 ise dayanım rezervini ile ifade eder.

$$R = R_d \cdot R_0 \quad (5.1)$$

$$R_d = \sqrt{2 \cdot \mu - 1} \quad \mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (5.2)$$

Burada Δ_y elastik yer değiştirmeyi; Δ_{max} ise tepe deplasmanı ifade etmektedir. Δ_{max} için 3 farklı varsayımdan bahsedilebilir. Birincisi, maksimum yüke karşılık gelen deplasman; ikincisi, nihai deplasman ve üçüncüsü ise belli bir ötelenme oranına tekabül eden deplasman değeri referans alınabilir. İlgili hesaplarda bu değer ASCE-7-16 standardı referans alınarak %2,5 olarak göz önünde bulundurulmuştur.

Dayanım fazlalığı katsayısı için Mitchell ve diğ., (2003) tarafından yapılan çalışmada yer alan ve denklem 5.3’da ifade edilen formül 5.4’de belirtilen şekliyle kısaltılmıştır.

$$R_o = R_{sd} \cdot R_{\phi} \cdot R_{yield} \cdot R_{sh} \quad (5.3)$$

$$R_o = \frac{H_{yn}}{H_c} \cdot \frac{H_y}{H_{yn}} \cdot \frac{H_p}{H_y} = \frac{H_p}{H_c} \quad (5.4)$$

Burada H_p deneysel verilerden elde edilen dayanım ve H_c ise tasarım dayanımını göstermektedir.

Çizelge 5.8. Deneysel sonuçlara göre davranış katsayıları

Eleman	R_o	R_d	R
W1	1,40	2,52	3,52
W2	1,92	2,03	3,89
W3	1,40	1,57	2,19

6. NÜMERİK ÇALIŞMA

Bilgisayar teknolojilerinin hızlı şekilde gelişmesi, temel mühendislik dallarında sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri oldukça artırmıştır (Zhao, 2014). Sonlu elemanlar yöntemi gerçeğe en yakın sonuçları ortaya koyarak güçlü bir yöntem olarak bilinmektedir. Bu nedenle çeşitli endüstrilerde olduğu gibi, akademik çalışmalar da sıklıkla tercih edilmektedir. Sonlu elemanlar yönteminde esas olarak elemanların küçük mesh yapılarına ayrılarak birbirine yük aktarımının sağlanması prensibine dayanmaktadır. Bunun için çeşitli matris denklemleri kullanılması suretiyle düğüm noktaların deplasman, gerilme gibi değerleri hesaplanabilmektedir (Rao, 2017). Sonlu eleman analizleri için Ansys, Abaqus gibi programlar bulunmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde yer alacak nümerik çalışmalar için Abaqus program altyapısı kullanılacaktır. Genel olarak Abaqus yazılımında analiz sürecini 3 aşamada tamamlamaktadır.

-Ön İşleme Süreci : İlgili analize ait modelleme, malzeme mekanik özelliklerinin tanımlanması, yükleme koşulları, mesnet şartları gibi başlangıç aşamalarının tanımlanması sürecidir.

-Simulasyon Süreci : Modellenen dosyanın sayısala dönüştürüldüğü ve çözüldüğü aşama olarak ifade edilebilir. Bu noktada bilgisayar işlemci özellikleri analiz süresi anlamında ön plana çıkmaktadır.

-İşlem Sonrası Süreci : Modellenen ve analizi gerçekleştirilen elemana ait şekil değiştirmelerin görülebildiği, gerilmelerin irdelenebileceği aşama olarak ifade edilebilir.

6.1. Sonlu Eleman Ağ Modeli

Abaqus yazılımında kabuk (shell) elemanlar, ince veya kalın kabuk yapıların modellenmesinde kullanılan, genellikle düzlemsel (2D) geometri üzerinden tanımlanan üçgen veya dörtgen tabanlı eleman tipleridir. Bu elemanlar, plak, panel, sac, tank duvarları veya ince kıvrımlı yüzeyler gibi yapıların gerilme, şekil değiştirme ve stabilite analizlerinde tercih edilir. Aşağıda, Abaqus eleman kütüphanesinde yer alan kabuk elemanlarına ilişkin temel ağ (mesh) özellikleri ve tanımlama kriterlerine yer verilmiş olup kabuk eleman formları şekil 6.1’de gösterilmiştir. Bu çalışmanın kabuk eleman modellerinde S4R ağ modelleri kullanılmıştır.

Dörtgen Kabuk Elemanlar:

S4: Dört düğüm noktalı, tam integrasyonlu kabuk eleman. Orta kalınlık yönünde lineer kabul vardır.

S4R: Dört düğüm noktalı, indirgenmiş integrasyonlu (reduced integration) eleman; genel olarak hesaplama maliyeti daha düşüktür ve büyük sistemler için uygundur. Kilitlenme problemlerini azaltmak için uygun bir opsiyondur.

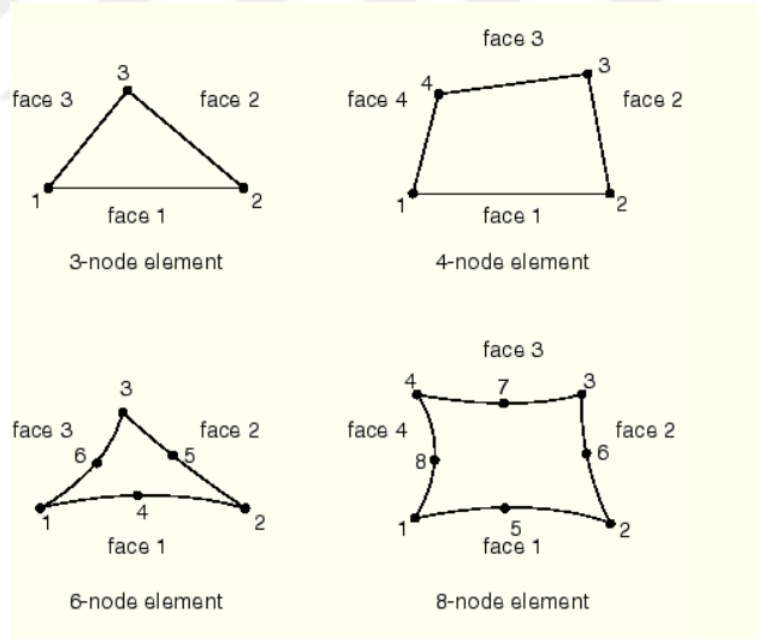
S8R: Sekiz düğüm noktalı, indirgenmiş integrasyonlu, ikinci dereceden (quadratic) formülasyonlu kabuk elemanı. Karmaşık şekiller için daha iyi yaklaşımlarla yüksek doğruluk sağlar.

Üçgen Kabuk Elemanlar:

S3: Üç düğümlü, tam integrasyonlu bir kabuk elemanı. Düzlemdeki daha karmaşık geometriyi daha kolay ağılamak için kullanılabilir, ancak genellikle dörtgen elemanlar kadar doğruluk sağlamaz.

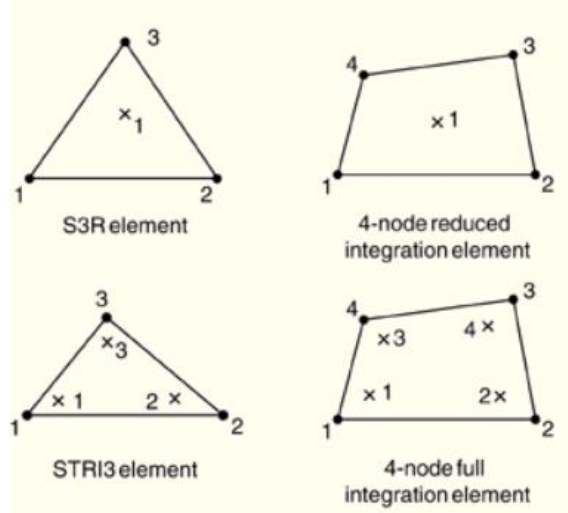
S3R (Reduced Integration): Üç düğümlü, indirgenmiş integrasyonlu versiyon, hesaplama maliyetini azaltır ve bazı kilitlenme sorunlarını hafifletir.

STRI3: Genellikle membran + eğilme davranışını birlikte modelleyen, uygun şekil işlevlerine sahip üçgen eleman.



Şekil 6.1. Eleman formları

Burada tam integrasyon eleman içindeki integraller daha fazla noktadan alınır, yüksek doğruluk sağlarken kilitlenme (locking) sorunlarına daha duyarlıdır. İndirgenmiş integrasyon (Reduced Integration) ise daha az sayıda integrasyon noktası kullanarak hesaplama maliyetini düşürür, kilitlenme riskini azaltır. (Şekil 6.2)



Şekil 6.2. Azaltılmış integrasyon formları.

6.2. Malzeme Modeli

Abaqus, geniş kapsamlı malzeme modelleri sunarak çeşitli yapıların gerçekçi olarak analiz edilebilmesini sağlar. Bu modeller, farklı fiziksel davranış biçimlerini temsil edebilmek için geliştirilmiş olup lineer elastikiyetten karmaşık doğrusal olmayan malzeme özelliklerine kadar uzanır. Genel olarak elastik ve plastik malzeme modelleri sonlu eleman yöntemlerinde temel teşkil eder.

Elastik malzemeler lineer elastik ve hiperelastik olarak ikiye ayrılabilir. Lineer elastik izotropik veya ortotropik (farklı yönlerde farklı özellikler gösteren) malzemelerin temel modudur. Genellikle Young modülü, Poisson oranı gibi parametrelerle tanımlanır. Hiperelastik malzeme ise kauçuk benzeri, büyük şekil değiştirmelere maruz kalan malzemeler için kullanılır.

Plastik malzemeler için plastisite ve sertleşme kavramlarının bilinmesi gerekmektedir. Metal plastikliği akma sınırını aşan gerilme altında kalıcı şekil değiştirmeleri ifade eder. Von Mises, Tresca, Drucker-Prager, Hill gibi akma kriterleri kullanılarak doğrusal olmayan davranış tanımlanır. Sertleşme ise (Hardening) izotropik, kinematik veya kombine sertleşme davranışları ile gerilme-şekil değiştirme ilişkisi tanımlanır.

Deney elemanların malzeme modeli girişlerinde çizelge 5.1'den yararlanılarak tanımlanmıştır.

6.3. Mesnet Koşullarının ve Temas Yüzeylerinin Modellenmesi

Abaqus'ta mesnet koşulları ve temas yüzeylerinin modellenmesi, analiz edilecek sistemin gerçekçi bir şekilde sınırlandırılmasını ve bileşenler arasındaki etkileşimin doğru yansıtılmasını sağlar. Bu sayede yapıların gerçek çalışma koşullarına benzer durumlar simüle edilebilir.

Mesnet koşullarını ve temas yüzeyleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Sabit Mesnetler (Fixed Supports): Yapının belirli bölgelerine yer değiştirme (x, y, z) ve/veya dönme serbestliklerinin sıfıra eşitlenmesiyle uygulanır. Bu sayede söz konusu noktaların hareket etmesine izin verilmez.
- Kısmi Kısıtlar (Displacement/Rotation Constraints): İlgili düğümlerin yalnızca belli yönlerdeki yer değiştirmeleri veya dönmeleri sınırlandırılabilir. Örneğin, bir plakanın alt kenarının sadece düşey yönde hareket etmesi engellenirken yatay hareketine izin verilebilir.
- Simetri Koşulları (Symmetry BC): Eğer yapı veya yükleme durumu simetrik ise, kesit düzlemindeki yer değiştirme bileşenlerinden biri sıfırlanarak yapı yarım veya çeyrek modelle simüle edilebilir. Bu yaklaşım hesaplamaları hızlandırır.
- Hareketli ve Zamanla Değişen Koşullar: Dinamik veya geçici analizlerde mesnetler zamanla değişen veya harici etkilerle hareket eden şekillerde de tanımlanabilir.

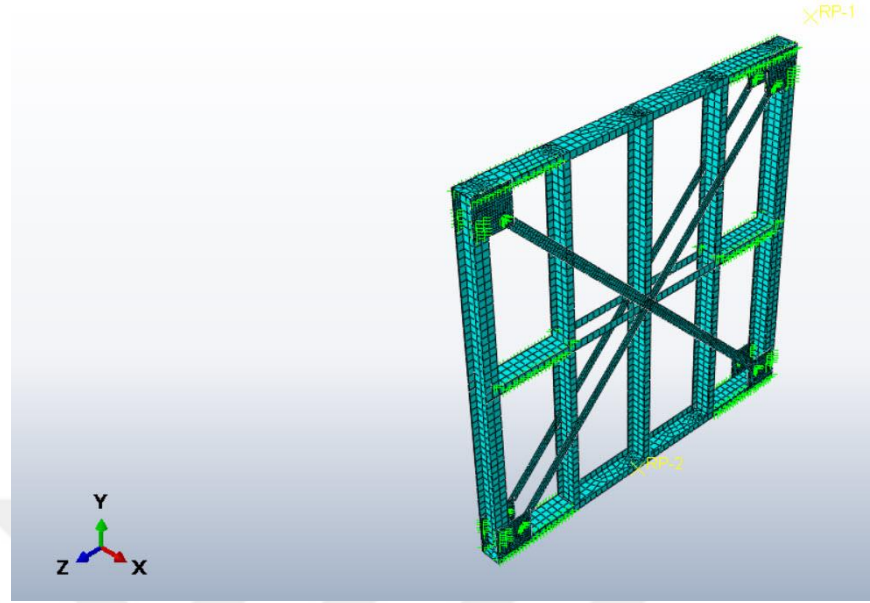
Temas yüzeyleri ise temel olarak 2 başlık altında incelenebilir.

Sürtünmesiz Temas (Frictionless Contact): İki yüzeyin birbirini geçmeyecek şekilde sadece birbirine dokunmasını ve kayma direncinin olmamasını tanımlar. Bu durumda yüzeyler birbirine temas ettiklerinde normal yönde kuvvet aktarımı gerçekleşir fakat yüzeyler tangensiyel yönde serbestçe kayar.

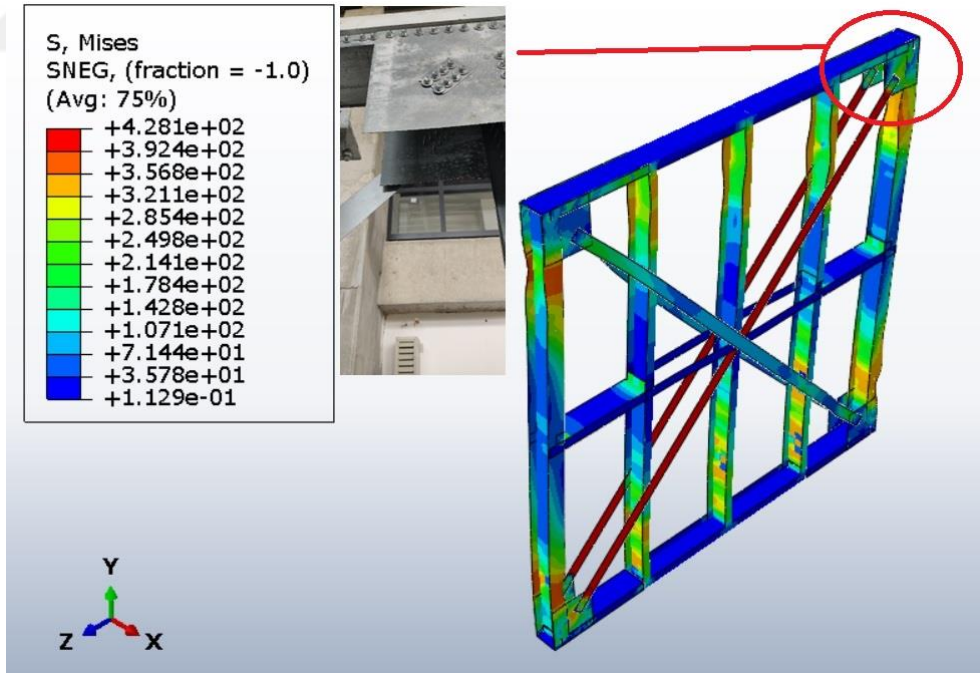
Sürtünmeli Temas (Frictional Contact): İki yüzey arasındaki etkileşime, sürtünme katsayısına bağlı olarak kayma direnci eklenir. Bu sayede gerçekçi bağlantı koşullarında yüzeylerin birbirine göre hareketi sınırlanır.

Deney elemanların simülasyon ve analizi için başlıklar tüm yönlerde tutulmuş ve yükleme kirişi marifetiyle deplasman verilmiştir. Bunun için referans noktası tanımlanmış ve yüklemenin yapıldığı üst başlık düğüm noktaları "Coupling" davranışı ile bağlanmıştır. Temas yüzeyi için ise "Tangential Behavior" ve "Normal Behavior" davranışları benimsenmiştir. Buna bağlı olarak sürtünme katsayısı 0,3 alınmıştır.

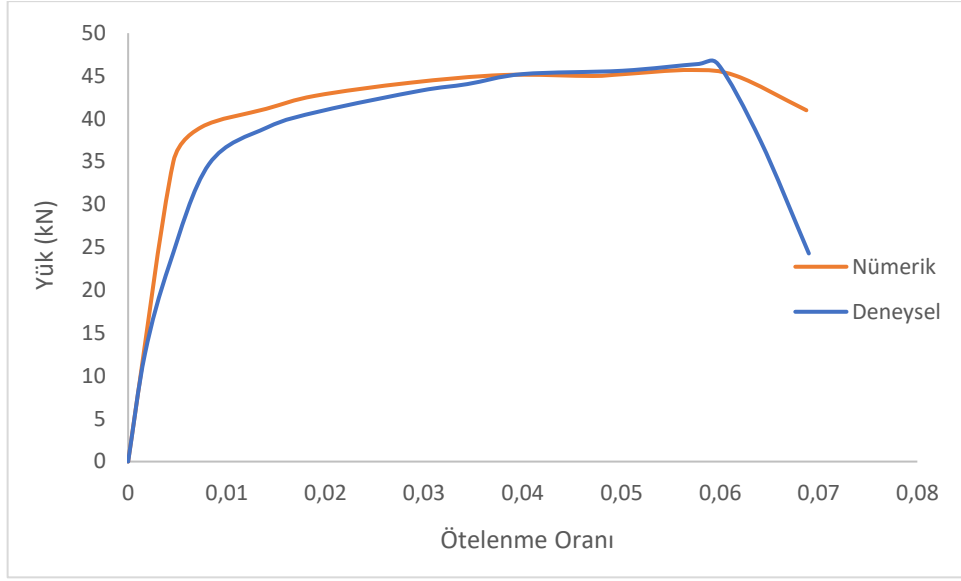
6.4. Analiz Sonuçları



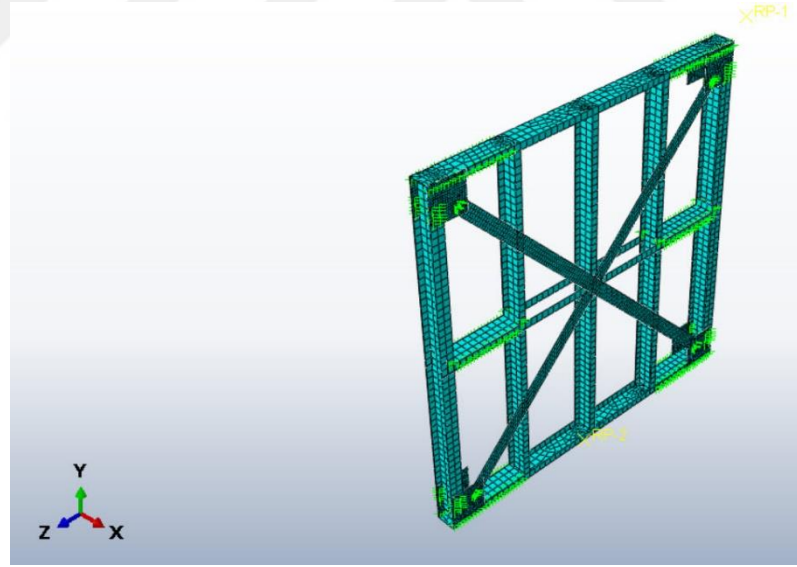
Şekil 6.3. W1 elemanına ait mesh yapısı



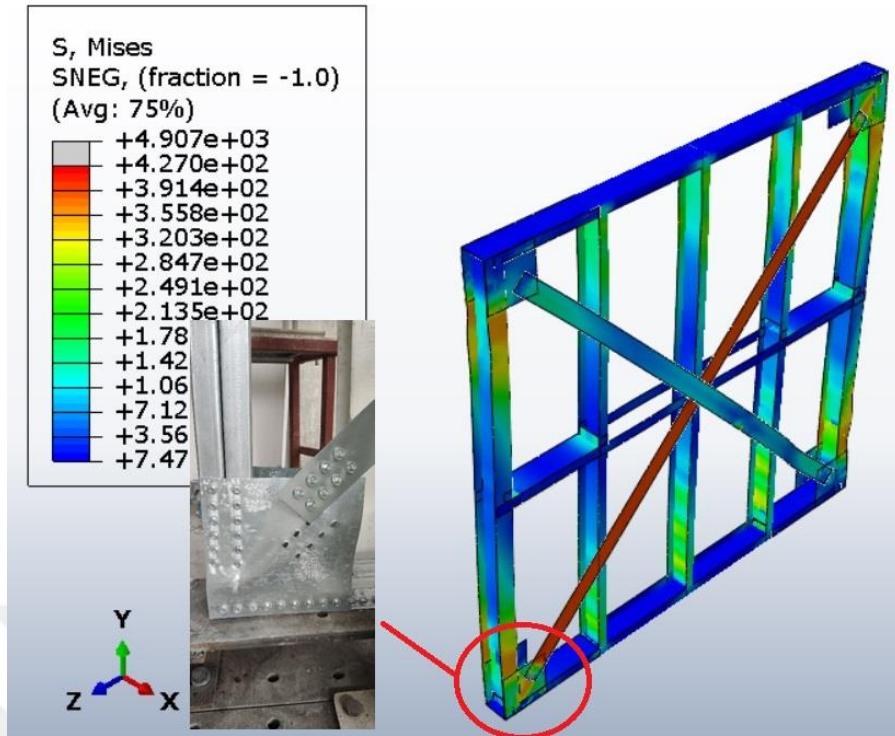
Şekil 6.4. W1 elemanına ait Von Mises gerilmeleri



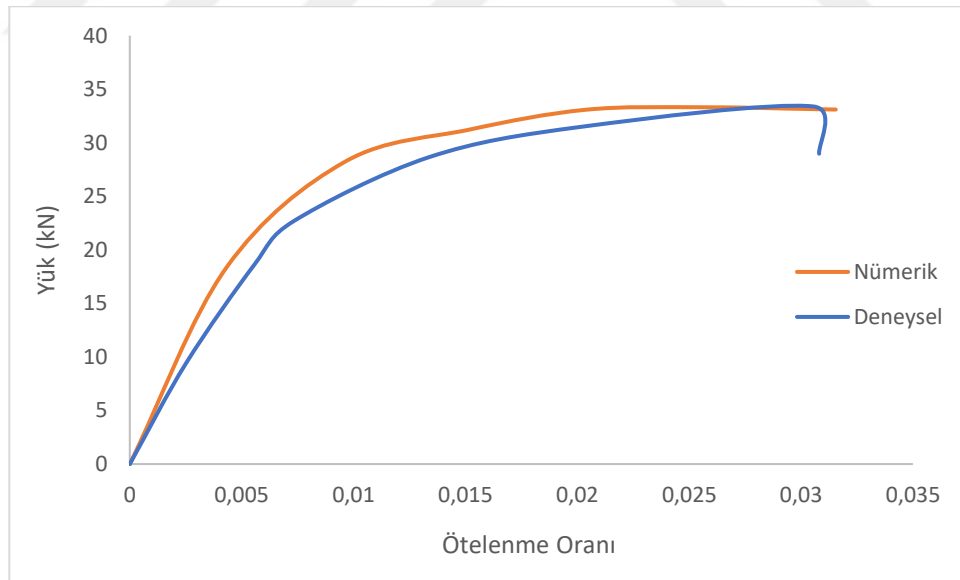
Şekil 6.5. W1 elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği



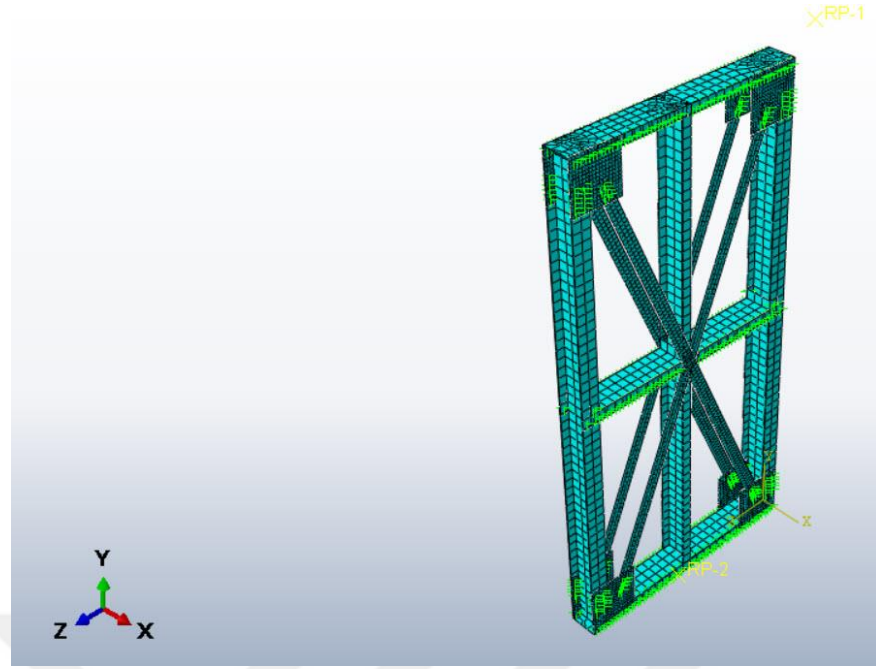
Şekil 6.6. W2 elemanına ait mesh yapısı



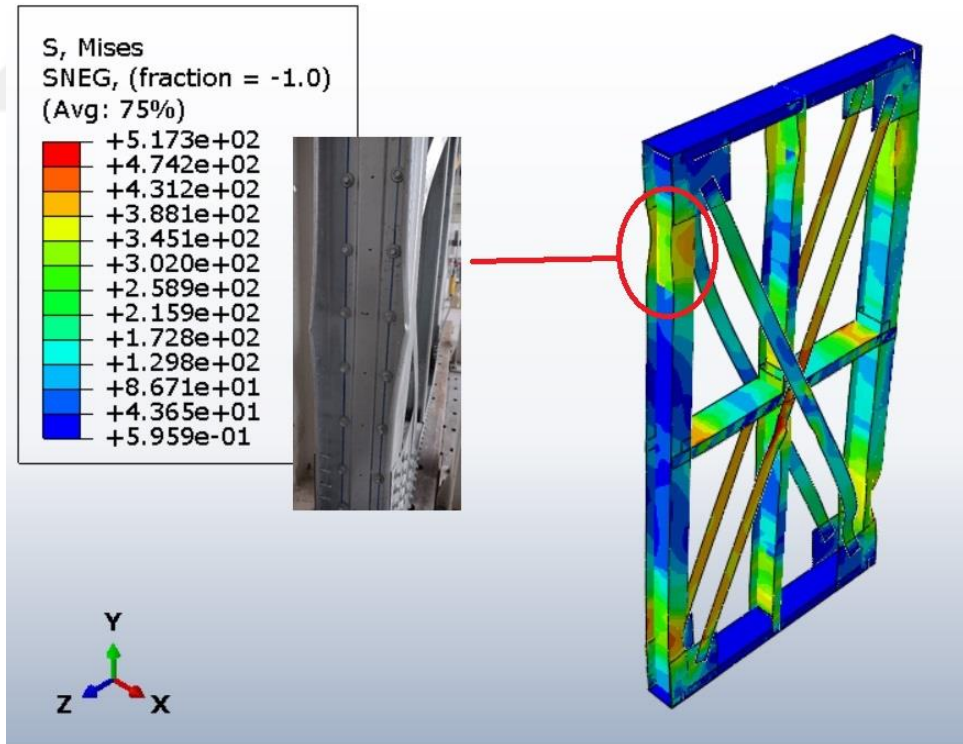
Şekil 6.7. W2 elemanına ait Von Mises gerilmeleri.



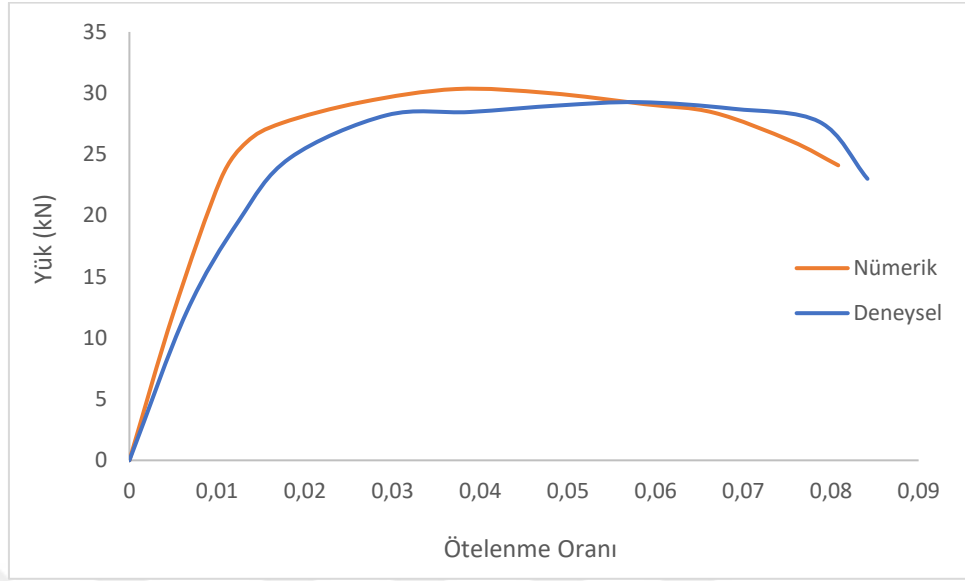
Şekil 6.8. W2 elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği



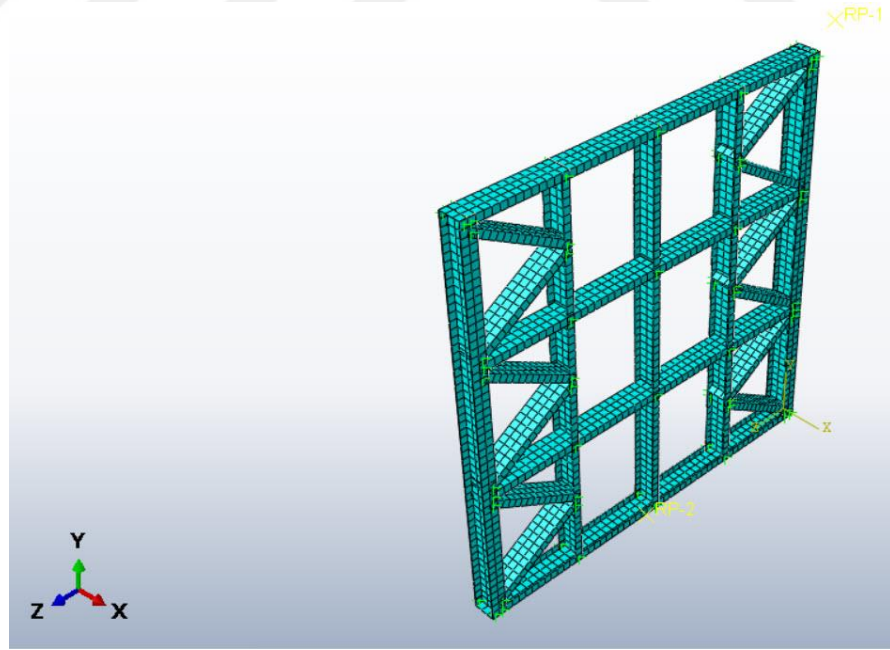
Şekil 6.9. W3 elemanına ait mesh yapısı



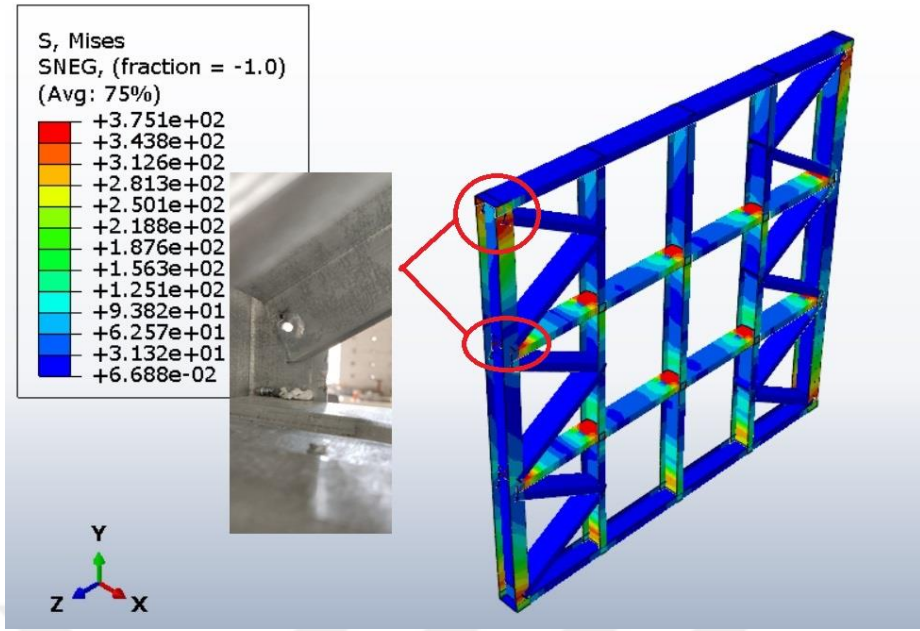
Şekil 6.10. W3 elemanına ait Von Mises gerilmeleri



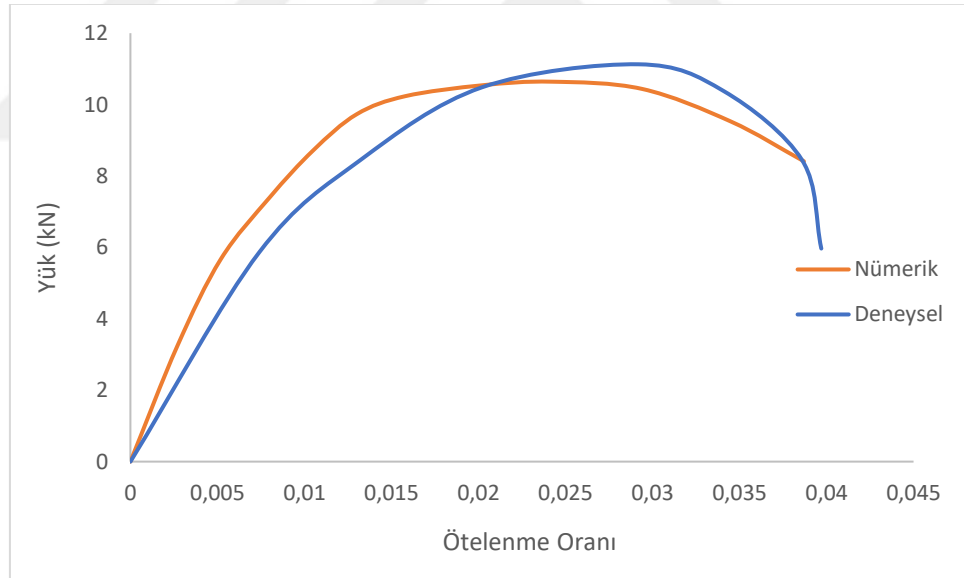
Şekil 6.11. W3 elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği



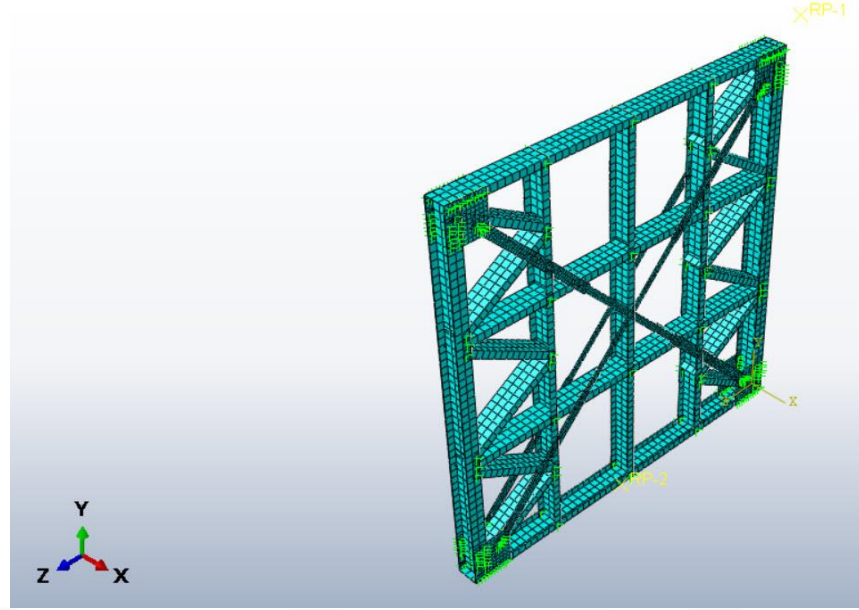
Şekil 6.12. W4 elemanına ait mesh yapısı



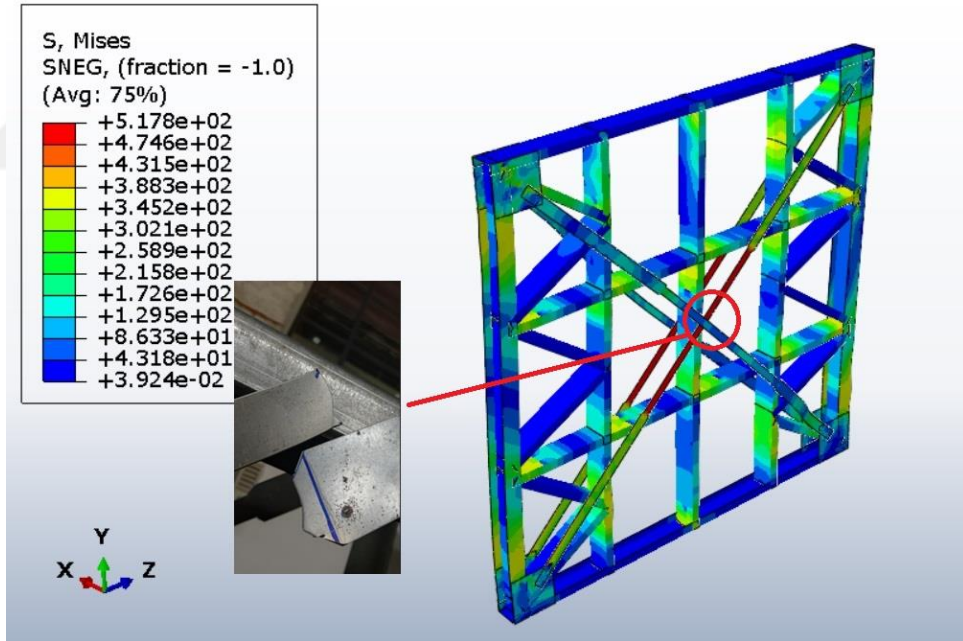
Şekil 6.13. W4 elemanına ait Von Mises gerilmeleri



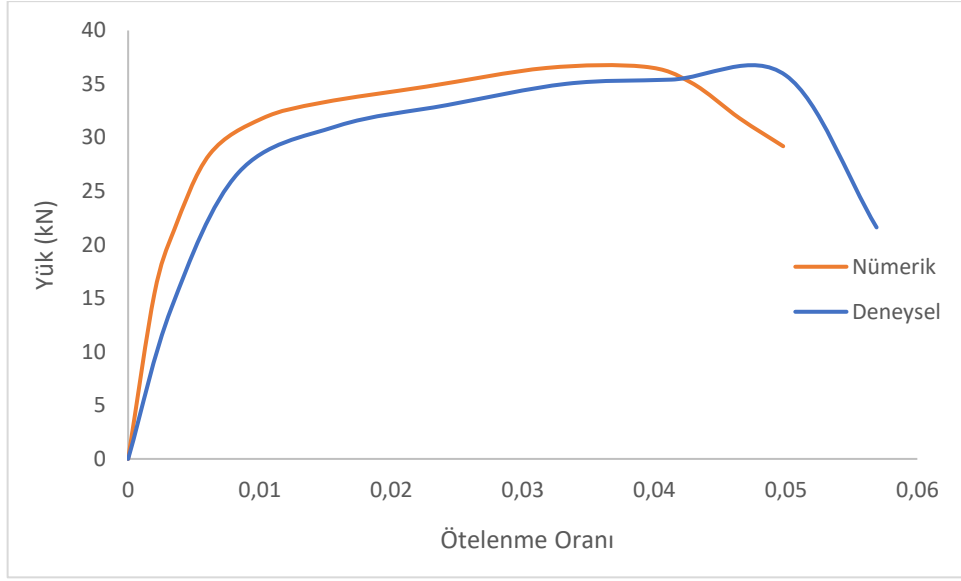
Şekil 6.14. W4 elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği



Şekil 6.15. W5 elemanına ait mesh yapısı



Şekil 6.16. W5 elemanına ait Von Mises gerilmeleri



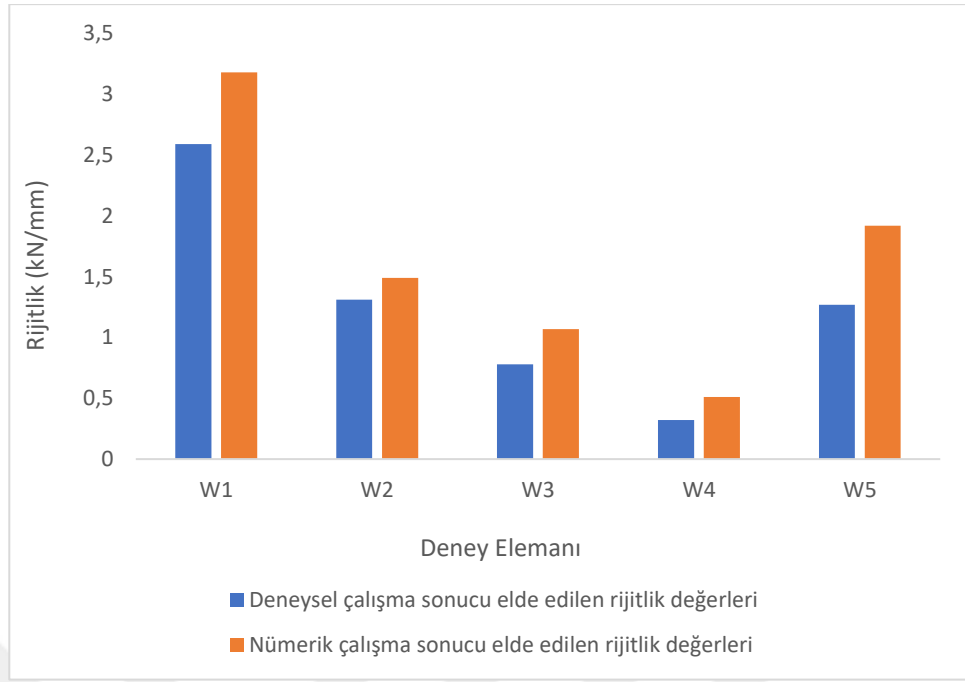
Şekil 6.17. W5 elemanına ait yük-ötelenme oranı grafiği

Çizelge 6.1 Nümerik analiz sonuçlarına göre dayanım değerleri

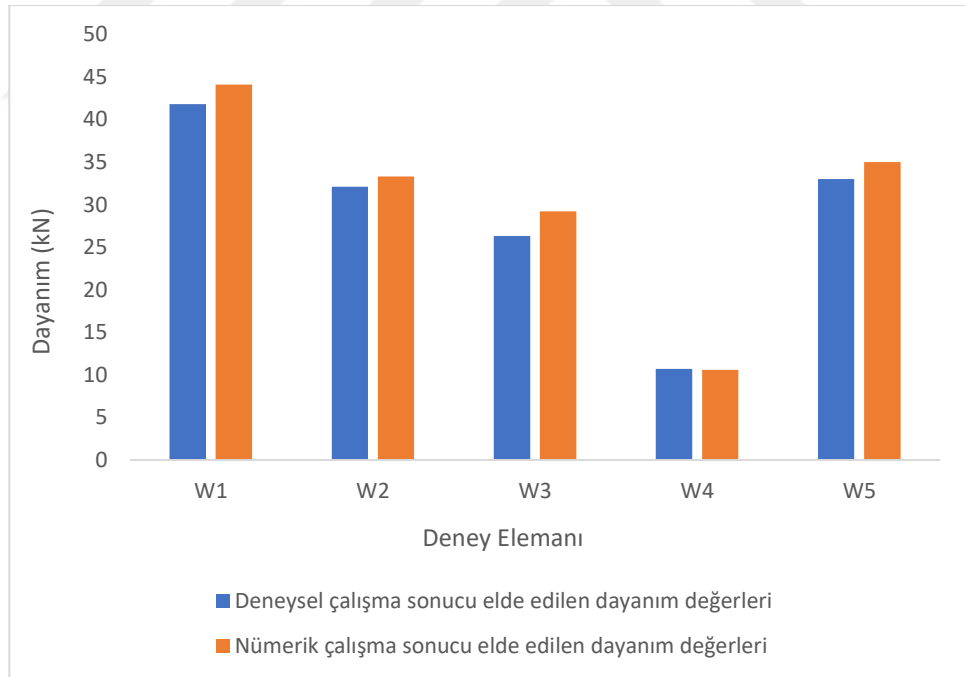
Deney Elemanı	Dayanım (kN)		
	%2 Ötelenme Oranı	%2,5 Ötelenme Oranı	%3 Ötelenme Oranı
W1	43,2	44,1	44,8
W2	33,1	33,3	33
W3	27,5	29,2	29,3
W4	10,5	10,6	10,3
W5	34,1	35	36,1

Çizelge 6.2 Nümerik analiz sonuçlarına göre rijitlik değerleri

Deney Elemanı	Rijitlik (kN/mm)
W1	3,18
W2	1,49
W3	1,07
W4	0,51
W5	1,92



Şekil 6.18. Deneyysel ve nümerik analiz sonucu elde edilen rijitlik değerleri



Şekil 6.19. Deneyysel ve nümerik analiz sonucu elde edilen dayanım değerleri

Çizelge 6.3 Deneysel ve nümerik analiz sonuçlarına göre dayanım ve rijitlik değerleri

Eleman	Deneysel Sonuçlar		Nümerik Analiz Sonuçları	
	Dayanım (kN)	Rijitlik (kN/mm)	Dayanım (kN)	Rijitlik (kN/mm)
W1	41,8	2,59	44,1	3,18
W2	32,1	1,31	33,3	1,49
W3	26,3	0,78	29,2	1,07
W4	10,7	0,32	10,6	0,51
W5	33	1,27	35	1,92

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada hafif çelik binalarda şerit çaprazlı panellerin yatay yük performansı deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir.

Deneysel sonuçlara göre W1 elemanı dayanımı 41,8 kN; W2 elemanı dayanımı 32,1 kN; W3 elemanı dayanımı 26,3 kN; W4 elemanı dayanımı 10,7 kN ve W5 elemanı dayanımı 33 kN olarak elde edilmiştir.

Nümerik analiz sonuçlarına göre W1 elemanı dayanımı 44,1 kN; W2 elemanı dayanımı 33,3 kN; W3 elemanı dayanımı 29,2 kN; W4 elemanı dayanımı 10,6 kN ve W5 elemanı dayanımı 35 kN olarak elde edilmiştir.

Dayanım yönünden (deneysel sonuçlar) / (nümerik analizler) oranı esas alınarak elemanlar irdelendiğinde, W1 elemanı için 0,94; W2 elemanı için 0,96; W3 elemanı için 0,90; W4 elemanı için 1; W5 elemanı için 0,94 oranları elde edilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre W1 elemanı rijitliği 2,59 kN/mm; W2 elemanı rijitliği 1,31 kN/mm; W3 elemanı rijitliği 0,78 kN/mm; W4 elemanı rijitliği 0,32 kN/mm; W5 elemanı rijitliği 1,27 kN/mm olarak elde edilmiştir.

Nümerik analiz sonuçlarına göre W1 elemanı rijitliği 3,18 kN/mm; W2 elemanı rijitliği 1,49 kN/mm; W3 elemanı rijitliği 1,07 kN/mm; W4 elemanı rijitliği 0,51 kN/mm; W5 elemanı rijitliği 1,92 kN/mm olarak elde edilmiştir.

Rijitlik yönünden (deneysel sonuçlar) / (nümerik analizler) oranı esas alınarak elemanlar irdelendiğinde, W1 elemanı için 0,81; W2 elemanı için 0,87; W3 elemanı için 0,72; W4 elemanı için 0,62; W5 elemanı için 0,66 oranları elde edilmiştir.

Deneysel sonuçlara göre W1 elemanı W2 elemanına göre %30; W3 elemanına göre %58; W4 elemanına göre %290 ve W5 elemanına göre %26 daha fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Aynı şekilde W1 elemanı rijitlik değeri W2 elemanına göre %97; W3 elemanına göre %232; W4 elemanına göre %709 ve W5 elemanına göre %103 daha fazla olduğu sonuçlardan anlaşılmıştır.

W0 elemanı deney sonuçları göstermektedir ki, hafif çelik yapı endüstrisinde çoğunlukla kullanılan sactan bükülerek elde edilen mesnet elemanı yük aktarmada son derece yetersiz olduğu görülmüştür.

W1 elemanı sonuçları incelendiğinde; yaklaşık olarak 41 kN dayanımda şerit çaprazın net enkesit alanından kopması ile deney neticelenmiştir. Bu sınır durumu için Çizelge 4.12'de $P_{net, \text{çapraz}} = 34,1$ kN olarak elde edilmiştir.

W2 elemanı hasar mekanizması incelendiğinde; eleman konfigürasyonunda tek taraflı çaprazın ilave burulma momenti oluşturduğu ve yaklaşık olarak 33 kN yükte vida yan yatma hasarı ile neticelendiği görülmüştür. Çizelge 4.12 incelendiği takdirde yan yatma sınır durumunun analitik olarak $P_{ns1} = 34,2$ kN olarak elde edildiği görülmektedir. Söz konusu sonuçların birbirine yakın ve uyumlu olduğu değerlendirilmekle birlikte tek taraflı çaprazın eleman davranışına olumsuz etki ettiği ve panelin her iki yüzüne de çapraz ilave edilmesinin yerinde olacağı anlaşılmıştır.

W3 elemanı hasar mekanizması incelendiğinde; kenar dikmelerde lokal burkulmalar görülmüştür. Bu durumun diğer deney elemanlardan farklı olarak en-boy oranının 1:2 olmasının önemli bir etken olduğu açıktır. Eğilme elemanı olarak tasarlanan bu panellerin mümkün oldukça en-boy oranının 1:1'e yakın olması amacına uygun olacaktır.

W4 elemanı deney sonuçları incelendiğinde; dayanımın oldukça düşük olduğu ve vidalı birleşim olmadığı için perçin atması ile profillerin yük aktarma mekanizmaların boşa çıktığı görülmektedir.

W4 ve W5 elemanı deney sonuçları birlikte değerlendirildiğinde aynı elemana sadece şerit çapraz ilave edilmesi ile dayanımın yaklaşık olarak %200 arttığı görülmektedir. Bu sonuç halihazırda hafif çelik yapı stoğuna ait panellerin büyük çoğunluğunun tipik olarak W4 elemanı gibi perçinli ve k-çaprazlı olması göz önünde bulundurulursa oldukça önemlidir. Yatay yük karşılayan panel elemanların vidalı birleşimlerle birlikte şerit çaprazlı teşkil olunması dayanım ve rijitlik yönünden yerinde olacaktır. Ayrıca afet gibi durumlarda hızlıca inşa edilen ancak kalıcı yapı olarak kullanılmaya devam edilen hafif çelik yapılar için W4 elemanına şerit çapraz ilave edilmesi basit ve etkili bir güçlendirme önerisi olarak öne sürülebilir.

AISI S400'de geleneksel şerit çaprazlı paneller için davranış katsayısına ($R = R_d \cdot R_0$)=1,56 olarak yer verilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlara göre bu değer W1 elemanı için 3,52; W2 elemanı için 3,89 ve W3 elemanı için 2,19 olarak elde edilmiştir. Bu değer TB DY-2018'de verilen $R=3$ değerine daha yakın olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Afet ve Acil Durum Başkanlığı. (2018). *Türkiye bina deprem yönetmeliği*.
- Bucmys, Z., & Saucuenas, G. (2013). The behavior of cold formed steel structure connections. *Enginnering Structures and Technologies*.
- Buonopane, S., & Bian, G. (2015). Computationally effcient fastener based models of cold formed steel shear walls with wood sheating. *Journal of Constructional Steel Research*.
- CEN. (2006). *En 1993-1-3*.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2018). *Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik*. Ankara.
- Darılmaz, K. (2019). *Depreme dayanıklı binaların tasarımına giriş*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- European Convention for Constructional Steelwork. (1995). *European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm stressed skin desing*.
- Fiorino , L., Macillo , V., & Landolfo, R. (2017). Shake table test of a full scale two story sheating braced cold formed steel building. . *Engineering Structures*.
- Fiorino, L., Terracciano, M. T., & Landolfo, R. (2016). Experimental investigation of seismic behaviour of low. *J Constr Steel Res*.
- Fiorino, L., Terracciano, M. T., & Landolfo, R. (2016). Experimental investigation of seismic behaviour of low dissipative CFS strap-braced stud walls. *J Constr Steel Res*.
- Fuminobu, O., & Yoshimichi, K. (2013). Damage control systems using replaceable energy dissipating steel fuses fo cold formed steel structures seismic behavior by shake table tests. . *Journal of Structural Engineering*.
- Iuorio, O., Macillo, V., Terracciano, M. T., Pali, T., Fiorino, F., & Landolfo, R. (2014). Seismic response of Cfs strap-braced stud walls:Experimental investigation. *Thin-Walled Structures*.
- Kasaeian, S., Usefi, N., Ronaghb, H., & Dareshiry, S. (2020). Seismic performance of CFS strap-braced walls using capacity-based design approach. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Kim, T., Wilcoski, J., & Foutch, D. (2006). Shaketable test of a cold-formed steel shear panel. . *Engineering Structures*.

- Lülöp, D., & Dubina, D. (2004). Performance of wall stud cold formed shear panels under monotonic and cyclic loading. *Thin Walled Structures*.
- Mirzaei, A., Sangree, R., & Comeau, G. (2015). Seismic capacity based design of narrow strap braced cold formed steel walls. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Mitchell, D., Tremblay, R., Karacabeyli, E., Paultre, P., & Saatcioglu, M. (2003). Seismic force modification factors for the proposed 2005 edition of the National Building Code of Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Pan, C., & Shan, M. (2011). Monotonic shear tests of cold formed steel wall frames with sheathing. *Thin Walled Structures*.
- Papargyriou, I., Hajirasouliha, I., Becque, J., & Pilakoutas, K. (2021). Performance-based assessment of CFS strap-braced stud walls under seismic loading. *Journal of Constructional Steel Research*.
- Rao, S. (2017). The finite element method in engineering.
- Scharff, R. (1996). Residential steel framing handbook. *McGraw-Hill*.
- Shahi, R., Nelson, L., & Gad, E. E. (2016). Seismic assesment of cold formed steel stud bracing wall panels using direct displacement based design approach. *Bull Earthquake Engineering*.
- Simpson Strong-Tie. (2010). Shear resistance of steel-stud wall panels. *Proceedings of 5th international specialty conference on cold-formed steel structures*. St. Louis.
- Stojadinovic, B., & Tipping, S. (2008). Structural testing of corrugated sheet steel shear walls. *International Specialty Conferance on Cold Formed Steel Structures*.
- Sultan, O. (2017). *TS EN 1993-1-3 Standartına göre soğukta şekil verilmiş çelik yapıların tasarımı*.
- Terim, B. (2006). Hafif çelik çerçeve sistem. *Ege Mimarlık*(1), s. 56.
- Terracciano, M. T., Macillo, V., Pali, T., Bucciero, B., Fiorino, L., & Landolfo, R. (2019). Seismic design and performance of low energy dissipative. *Bulletin of Earthquake Engineering*.
- Uang, C. M. (1991). Establishing R (or R_w) and C_d factors for building seismic provisions. *J Struct Eng*.
- Velchev, K., & Rogers, C. A. (2008). Inelastic performance of screw connected strap braced walls. *M.Eng. Thesis, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics*.

- Yıldırım, S. G. (2013). *Az katlı konutlar için hafif çelik yapım sistemi*. Ankara: Altınpost Yayıncılık.
- Yu, W. (2000). *Cold formed steel design*. John Wiley.
- Zhao, C. (2014). Investigations on structural interaction of cold-formed steel roof purlin-sheet system. *University of Birmingham*.

