

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YATAY YÜK TAŞIYICI BETONARME ÇERÇEVE SİSTEMLERİN KOMPOZİT  
PANELLERLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**MUHAMMET KARABULUT**

**AĞUSTOS 2022**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YATAY YÜK TAŞIYICI BETONARME ÇERÇEVE SİSTEMLERİN KOMPOZİT  
PANELLERLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Muhammet KARABULUT**

**DANIŞMAN : Dr. Öğr. Üyesi Tuna ÜLGER**

**ORTAK TEZ DANIŞMANI : Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT**

**ZONGULDAK**

**Ağustos 2022**

**KABUL:**

Muhammet KARABULUT tarafından hazırlanan “Yatay Yük Taşıyıcı Betonarme Çerçeve Sistemlerin Kompozit Panellerle Depreme Karşı Güçlendirilmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora Tezi olarak oybirliğiyle/oyçokluğuyla kabul edilmiştir. 10/08/2022

**Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Tuna ÜLGER .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Ortak Tez Danışmanı:** Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT .....  
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Mehmet YETMEZ .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER .....  
Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÖZTÜRK .....  
Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Berna AKSOY .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Haşim KISA .....  
Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .... / .... / 20....

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Muhammet KARABULUT

## ÖZET

**Doktora Tezi**

### **YATAY YÜK TAŞIYICI BETONARME ÇERÇEVE SİSTEMLERİN KOMPOZİT PANELLERLE DEPREME KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ**

**Muhammet KARABULUT**

**Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Tuna ÜLGER**

**İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT**

**Ağustos 2022, 163 sayfa**

Ülkemiz aktif deprem kuşağında yer alan bir ülke olmasından dolayı, mevcut ve eski yapılarımızı olası depremlerin yıkıcı etkisine karşı yeterli düzeyde taşıma kapasitesine çıkarmamız gerekmektedir. Mevcut güçlendirme yöntemlerine ek olarak kompozit elemanların, profillerin ve panellerin betonarme çerçevelerde yatay yük taşıyıcı sistemi rijitleştirebileceği ve yatay yerdeğiştirmeyi sınırlayacağı, kolon kiriş birleşim bölgelerindeki dönmeleri kısıtlayacağı, plastik mafsal oluşumu yerine kirişlerde kesme çatlaklarının meydana gelmesi, yanal yük taşıma ve enerji yutma kapasitesini artıracığı düşünülmektedir. Son yıllarda pultruzyon yöntemi ile kompozit malzemelerin üretildiği ve inşaat sektöründe de yerini almaya başladığı görülmektedir. Kompozit malzemelerin özellikle klasik yapı malzemelerine (betonarme, çelik, ahşap) kıyasla çok hafif olması, yanmaz özelliğine sahip olması, korozyona karşı dayanıklı olması, yorulma dayanımının yüksek olması ve yapılara kolay entegre edilebilirliği kompozit elemanları klasik yapı elemanlarına karşı güçlü bir alternatif kılmaktadır. Bu doktora tezi

## ÖZET (devam ediyor)

çalışması kapsamında, dolgu duvarsız betonarme çerçevelerin cam elyaf takviyeli kompozit elemanlarla (GFRP) güçlendirme çalışmaları nümerik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Tek katlı-tek açıklıklı ve iki katlı-tek açıklıklı oluşturulan betonarme çerçeve sonlu eleman modeller üzerinde farklı tip güçlendirme teknikleri tatbik edilmiştir ve sonuçları irdelenmiştir. Bu tez çalışmasının nümerik kısmında, farklı tip güçlendirme sonlu eleman modellerinin ardından, referans betonarme çerçeve çelik çaprazlarla güçlendirilmiş betonarme çerçevenin deneysel sonuçları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak tekrarlanmış ve alternatif kompozit GFRP çaprazların yatay yük taşımada kapasiteleri çelik çaprazlı betonarme çerçevelerinkilerle kıyaslanmıştır. Sonrasında ise Türkiye’de özellikle İstanbul gibi aktif sismik bölgelerde yer alan mevcut yapıların durumunu temsil edebilecek betonarme çerçeve modeller üzerinde nümerik ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Betonarme çerçeveler ZBEÜ Yapı Laboratuvarı’nda imal edilmiş ve GFRP çapraz plakalar kullanılarak güçlendirilmiştir. İmal edilen betonarme çerçeve mevcut yapıların durumunu yansıtabilmesi için beton basınç dayanımı düşük, yetersiz donatı oranı içeren, kolon kiriş birleşim bölgelerinin zayıf ve kenetlenmenin olmadığı ve narin kesitli olacak şekilde seçilmiştir. Deprem sarsma tablasında yapılan sismik analizlerle betonarme çerçevelerin yapısal davranışlarının yanı sıra dinamik karakteristikleri de 4 durum için belirlenmiştir. Bu durumlar yüksüz referans çerçeve, yüksüz güçlendirilmiş çerçeve, yük altında referans çerçeve ve yük altında güçlendirilmiş çerçeveden oluşmaktadır. 7 farklı depremin 3 farklı ölçeklerindeki ivme kayıtları kullanılarak betonarme çerçevelerde toplam 124 adet dinamik test, sarsma tablasında yapılmıştır. Testlerde kullanılan depremler sırasıyla 1938 Imperial Valley, 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Düzce, 2019 DASK1, 2019 DASK2 ve 2019 DASK3’tür. Sarsma tablasından elde edilen yatay yerdeğiştirmeler kıyaslanmıştır. Yanal yük altında gerçekleştirilen yanal itme (pushover) analizi sonuçları deneysel ve nümerik olarak kıyaslanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar neticesinde, her iki çerçevenin dinamik özellikleri, yatay yük taşıma kapasitesi, yatay kat ötelemeleri, enerji yutma kapasiteleri, çerçeve kırılma davranışları ve kolon-kiriş birleşim noktasının davranışları araştırılmış ve elde edilen sonuçlar bu tezde sunulmuştur. GFRP kompozit çapraz plakaların yapısal kusurlar içeren betonarme çerçevelerin özellikle yanal yük taşıma kapasitesi ve başlangıç rijitliği üzerindeki etkinliğini incelemek için 5 farklı durum araştırılmıştır. Bunlardan ilki deneysel statik itme testleri yapılmış betonarme çerçevelerin

## ÖZET (devam ediyor)

nümerik modellerle doğrulanmasıdır. İkinci durumda, kolon-kiriş düğüm noktalarının kenetli-kenetsiz olmasının, yanal yük taşıma kapasitesi üzerinde ki etkisi irdelenmiştir. Üçüncü durumda betonarme çerçevelerde açıklık/yükseklik (L/H) oranının yanal yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca betonarme çerçevelerde yapılan güçlendirmenin L/H oranı üzerindeki etkinliği değerlendirilmiştir. Dördüncü durumda betonarme çerçevelerde farklı rijitliklerdeki çerçevelere güçlendirmenin etkinliği irdelenmiştir. 3 farklı kesit alanına sahip betonarme çerçevelerin güçlendirilmiş çerçevelere kıyasla yanal yük taşıma kapasitelerindeki artış oranları incelenmiştir. Beşinci ve son durumda ise üç farklı rijitlikteki GFRP çapraz plakasının narin kesitli betonarme çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasiteleri üzerinde ki etkinliği araştırılmıştır. Nümerik analizler sonucunda özellikle narin kesitli betonarme çerçevelerde güçlendirmenin katkısı ve önemi açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Kompozit kutu profil ve GFRP çapraz plakalarla yapılan güçlendirmelerin, deneysel ve nümerik analizler neticesinde yalın (referans) betonarme çerçevelere kıyasla güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesinin ciddi oranda arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme Çerçeve, Deprem Analizi, Güçlendirme, Kompozit Plaka, Pultrüzyon GFRP, Pushover Analizi, Sarsma Tablası, Yanal Yük Kapasitesi

**Bilim Kodu:** 624.03.00



## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

# **STRENGTHENING THE LATERAL LOAD CARRYING REINFORCED CONCRETE FRAME SYSTEMS AGAINST EARTHQUAKE USING COMPOSITE PANELS**

**Muhammet KARABULUT**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Thesis Advisor: Asisst. Prof. Dr. Tuna ÜLGER**

**Co-Advisor: Asisst. Prof. Dr. Necati MERT**

**August 2022, 163 pages**

Existing and old detailed structures needs to be strengthened against catastrophic failure of earthquakes in our country which was located on the active seismic zone. In addition to the traditional strengthening methods, reinforced concrete moment frames either having infill walls or not can be strengthened against lateral loads alternatively with composite panels and lateral deflections can be controlled. Moreover, it is thought that it will limit the rotations at the column-beam junction points, prevent shear cracks that may occur in the beams, and increase the lateral load carrying and energy absorption capacity. Recent years pultruded composite sections have produced for civil structures in the market. These sections are commonly utilized and being alternative to the traditional structural components due light weight, high strength, inflammable, anti-corrosive, fatigue resistant properties. In this study, strengthening methods of the reinforced concrete moment frames without having infill walls are investigated numerical

## **ABSTRACT (continued)**

and experimental by adding GFRP composites. Different types of reinforcement techniques have been applied on the reinforced concrete frame finite element models which created with one-story-one-span and two-story-single-span, and the results have been examined. Numerical and experimental studies have been carried out on a reinforced concrete frame model that can represent existing structures in active seismic areas in Turkey, especially in Istanbul. In order to reflect the situation of the existing structures, the determined reinforced concrete frame was chosen in such a way that the concrete compressive strength is low, contains insufficient amount of reinforcement, and the column-beam junction points are weak and of delicate cross-section. The seismic analyses performed on the shaking table and the pushover test results under lateral load were compared numerically and experimentally. First part of this thesis, one of the experimental results of a reinforced moment frame reinforced with steel braces verified with finite element models and lateral load capacity of GFRP braces alternatively compared with steel braces' results. In the second part, identical reinforced concrete moment frames produced, afterward bare frame and strengthened frame with cross GFRP plate braces are compared. Seismic tests were carried out on the earthquake shaking table for 4 different situations. These situations consist of unloaded reference frame, unloaded strengthened frame, loaded reference frame, and loaded strengthened frame. Under the acceleration records of 7 different earthquakes at 3 different scales, a total of 124 dynamic tests were carried out on shaking tables. The earthquakes used in the tests are 1938 Imperial Valley, 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Düzce, 2019 DASK1, 2019 DASK2 and 2019 DASK3 respectively. The horizontal displacements obtained from the shaking table were compared. Dynamic properties, lateral load capacities, story drifts, ductility, energy dissipation capacity, failure modes, and column-beam joint behavior of the frames are investigated by conducted experimental tests and presented in this thesis. The results of pushover analysis performed under lateral load were compared experimentally and numerically. Five different cases were investigated to examine the effectiveness of GFRP composite cross plates on the lateral load carrying capacity and initial stiffness of reinforced concrete frames containing structural defects. The first of these is the verification of experimental static pushover tests of reinforced concrete frames with numerical models. In the second case, it is the effect of clamped-non-clamping of the column-beam joints on the lateral load carrying capacity. In addition, the effectiveness of strengthening in reinforced concrete frames on the L/H ratio was evaluated. In the fourth case, the effectiveness of

## **ABSTRACT (continued)**

strengthening to frames with different stiffnesses in reinforced concrete frames was examined. The rate of raise in lateral load carrying capacity of reinforced concrete frames with 3 different cross-sections compared to rigidity of reinforced frames was investigated. In the third case, the effect of span/height (L/H) ratio on lateral load carrying capacity of reinforced concrete frames was investigated. In the fifth and last case, the effectiveness of three different rigidity GFRP cross plates on the lateral load carrying capacity and energy absorption capacity of slender reinforced concrete frames was investigated. As a result of the numerical analysis, the contribution and importance of strengthening especially in slender reinforced concrete frames are clearly revealed. In particular, it has been seen as a result of the studies that the lateral load carrying capacity of the strengthened reinforced concrete frame has increased significantly compared to the capacity of the reference reinforced concrete frame.

**Keywords:** Composite Plate, Earthquake Analysis, Lateral Load Capacity, Pultruded GFRP, Pushover Analysis, Reinforced Concrete Frame, Shaking Table Test, Strengthening

**Science Code:** 624.03.00



## TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu, bana tavsiye eden ve araştırmanın her aşamasında hem bilgi ve tecrübelerini hemde maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen, danışman hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Tuna ÜLGER ve Dr. Öğr. Üyesi Necati MERT hocalarıma teşekkür ederim. Doktora tez jürimde yer alan Prof. Dr. Mehmet Yetmez, Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Bengü SÜNBÜL GÜNER ve Dr. Öğr. Üyesi Hakan ÖZTÜRK hocalarıma da tez sürecinde bilgileriyle, görüşleriyle, önerileriyle ve yaptıkları yardımlarından dolayı ayrı ayrı teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde en büyük emeğe sahip olan, her türlü desteklerini benden esirgemeyen ve haklarını ödeyemeyeceğim babam Hasan KARABULUT ve annem Suzan KARABULUT'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca çalışmalarım sırasında en yakın arkadaşım ve ikizim olan Dr. Ali KARABULUT'a ve her zaman beni neşelendiren, moral veren kardeşim Ahmet KARABULUT'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 2020-37891158-01 numaralı " Yatay Yük Taşıyıcı Yapısal Sistemlerin Kompozit Panellerle Depreme Karşı Güçlendirilmesi" isimli Lisansüstü Öğrenim ve Araştırma Projesi ve Mitaş Kompozit firmasının doktora tez çalışmam için hibe ettiği kompozit malzemeler ile desteklenmiştir. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'ne ve Mitaş Kompozit firmasına desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez sonuçlarının bundan sonra yapılacak araştırmalara ışık tutmasını ve ülkemize yararlı olmasını temenni ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL: .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	vii
TEŞEKKÜR .....	xi
İÇİNDEKİLER.....	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xxv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xxvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 TEZİN AMACI VE KAPSAMI .....	1
1.2 LİTERATÜR TARAMASI .....	2
1.3 DEPREM VE BETONARME YAPI YÖNETMELİKLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....	31
BÖLÜM 2 MALZEME MODELLERİ VE METOTLARI .....	37
2.1 BETON MALZEME MODELLERİ .....	37
2.1.1 Sargısız ve Sargılı Beton Modelleri .....	37
2.1.1.1 Hognestad Beton Modeli.....	37
2.1.1.2 Sheikh Ve Üzümeri Beton Modeli .....	38
2.1.1.3 Geliştirilmiş Kent Ve Park Sargılı ve Sargısız Beton Modeli.....	39
2.1.1.4 Mander Sargısız Ve Sargılı Beton Modeli .....	42
2.2 ÇELİK MALZEME MODELLERİ.....	44
2.2.1 Donatı Çeliği Malzeme Modelleri .....	44

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 3 SAYISAL ÖN ÇALIŞMA MODELLERİ.....	47
3.1 SAP2000'DE OLUŞTURULAN BETONARME ÇERÇEVE SONLU ELEMAN MODELLERİ .....	47
3.1.1 Pultrude GFRP Kutu Profil İle Güçlendirilmiş Betonarme Çerçevenin Statik İtme (Pushover) Analizi ile Yanal Yük Performansı .....	47
3.1.1.1 Betonarme Çerçeve Sonlu Eleman Modelleri.....	48
3.1.1.2 Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri .....	51
3.1.1.3 GFRP Kupon ve Kesit Özellikleri .....	51
3.1.1.4 Betonarme Çerçeve Sonlu Eleman Modelleri ve Deneysel Statik İtme (Pushover) Analiz Sonuçları .....	54
3.1.1.5 Plastik Mafsal Oluşumları.....	58
3.1.2 Farklı Tip GFRP Kompozit Elemanlar ile Güçlendirmenin Betonarme Çerçevelerin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etsiki .....	60
3.1.2.1 Model 1 .....	61
3.1.2.2 Model 2 .....	63
3.1.2.3 Model 3 .....	64
3.1.2.4 Model 4 .....	66
3.2 ANSYS'DE ELEMAN DÜZEYİNDE OLUŞTURULAN BETONARME SONLU ELEMAN DOĞRULAMA MODELİ .....	69
3.2.1 Eleman Bazında Oluşturulan Betonarme Kiriş Sonlu Eleman Modeli.....	69
BÖLÜM 4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	79
4.1 BETONARME ÇERÇEVELERİN İMALATI VE BETON BASINÇ TESTLERİ.....	79
4.2 DEPREM DENEYLERİ.....	85
4.2.1 Dört Farklı Durum için Sarsma Test Düzenekleri .....	85
4.2.2 Sarsma Tablası Testlerinde Kullanılan Depremler .....	86
4.2.3 Sarsma Testlerinden Betonarme Çerçevelerin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	92

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.2.4 Sarsma Test Sonuçları.....	92
4.2.5 Statik İtme (Pushover) Test Sonuçları .....	114
<b>BÖLÜM 5 BETONARME ÇERÇEVE ANSYS STATİK İTME ANALİZLERİ (PUSHOVER) .....</b>	<b>121</b>
5.1 DENEYSEL İTME TESTLERİ NÜMERİK MODELLERLE DOĞRULAMA .....	122
5.2 KOLON KİRİŞ DÜĞÜM NOKTALARI KENETLİ-KENETSİZ BETONARME ÇERÇEVELERİ KIYASLAMA .....	125
5.3 BETONARME ÇERÇEVELERDE AÇIKLIK/YÜKSEKLİK (L/H) ORANI DEĞİŞİMİNİN İRDELENMESİ.....	132
5.4 BETONARME ÇERÇEVE KESİT RİJİTLİK DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ.....	141
5.5 GÜÇLENDİRMEDE KULLANILAN GFRP PLAKA EKSENEL RİJİTLİK DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ.....	143
<b>BÖLÜM 6 ANALİTİK ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>147</b>
6.1 REFERANS (YALIN) BETONARME ÇERÇEVE İÇİN .....	147
6.2 GFRP KOMPOZİT PLAKA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME ÇERÇEVE İÇİN .....	149
<b>BÖLÜM 7 SONUÇLAR.....</b>	<b>153</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>157</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>163</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Farklı yerdeğiştirme (%0.5, %2 ve %4) değerlerinde BÇ, DÇ ve HÇ hasar detayları	3
Şekil 1.2 İncelenen durumlar için enerji yutma kapasiteleri .....	5
Şekil 1.3 Üç farklı durum için (dolgunun olmadığı (3KÇ) ve dolgu duvarlı (3KDÇI, 3KDÇII) yapıların planları ve detay görünüşleri.....	6
Şekil 1.4 Deney elemanlarının yükleme durumları.....	7
Şekil 1.5 (a) Duvar yük detayı, (b) duvar mesh detayı .....	8
Şekil 1.6 Sakarya'da çok katlı yapının zayıf katında ağır hasar .....	9
Şekil 1.7 Tuğla duvar üzerine yapılan deney örneği.....	10
Şekil 1.8 İncelenen nümerik modeller.....	11
Şekil 1.9 İncelenen binanın SAP2000 modeli.....	12
Şekil 1.10 Yanal yük etkisinde şekil değiştirmiş betonarme çerçeve ve eşdeğer basınç çubuk eleman modeli.....	13
Şekil 1.11 Malzeme türüne göre binanın sonlu eleman modelleri.....	14
Şekil 1.12 Oluşturulan nümerik model ve detayları (a-kil tuğla yığma duvar, b- yanal güçlendirme detayı, c-tuğla katı modeli, d-ara yüzey elemanı, e- düzlem gerilme elemanı) .....	15
Şekil 1.13 Kısa kolonda oluşan tahribat.....	16
Şekil 1.14 İncelenen binanın ANSYS modeli.....	17
Şekil 1.15 (a) 6.5 m ölçülerindeki duvarlarda etki-kapasite miktarı, (b) 16 m ölçülerindeki duvarlarda etki-kapasite oranları .....	19
Şekil 1.16 Eşdeğer deprem yükünün katlara göre dağılımı verilmektedir .....	20
Şekil 1.17 İncelenen nümerik kompozit panel modeli.....	21
Şekil 1.18 Oluşan tahribat detayı .....	21
Şekil 1.19 Oluşturulan panelin program modeli .....	22
Şekil 1.20 Uygulanan kompozit bağlantı detayları .....	23
Şekil 1.21 Kompozit panelin deneysel modeli.....	23
Şekil 1.22 Hasır donatılar tatbik edilerek betonarme çerçeve arasında yer alan dolgu duvarların özel sıva kullanımı ile güçlendirilmesi.....	24
Şekil 1.23 Lifli polimer şeritlerin tatbik detayı .....	25

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.24 Birinci oluşturulan panel modeller ve tatbik şekilleri .....	26
Şekil 1.25 Güçlendirilmiş modeller ve referans çerçevenin deneysel yanal yük kapasiteleri ve yerdeğiştirme diyagramı .....	26
Şekil 1.26 Deney test numuneleri boş çerçeve, çelik panel (SPW) ve kompozit panel (CPWF).....	27
Şekil 1.27 Paneller için uygulanan yük durumu .....	28
Şekil 1.28 Yanal yükleme ve yerdeğiştirme ile enerji tüketme grafikleri.....	28
Şekil 1.29 Yükleme ve yerdeğiştirme deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçları .....	28
Şekil 1.30 Çelik çerçeve ve dolgu panel deney düzeneği .....	30
Şekil 1.31 a) Çekme ve basınç yönleri için ortalama yük ve yerdeğiştirme, b) Ortalama yük yer değiştirme karşılaştırılması beş farklı FRP, hibrit ve çelik (SSW) kontrol panel duvar için sonuçlar.....	30
Şekil 1.32 a) Enerji sönmüleme ve her bir yerdeğiştirme yüklemesi için panel türlerinin performansı; b) Enerji sönmüleme ve yer değiştirme karşılaştırılması .....	31
Şekil 1.33 Yıllara göre kullanılan beton dayanım sınıfları yüzdelik dağılımı .....	33
Şekil 1.34 Türkiye deprem bölgeleri detayı .....	34
Şekil 1.35 2018 deprem yönetmeliğinde mevcut olan 50 yılda aşılma ihtimali %10 olan depremler için hazırlanmış Türkiye Deprem Tehlike Haritası .....	35
Şekil 2.1 Hognestad beton modeli.....	38
Şekil 2.2 Sheikh ve Üzümeri sargılı beton nonliner modeli .....	38
Şekil 2.3 Geliştirilmiş Kent ve Park sargısız ve sargılı doğrusal olmayan beton modeli .....	40
Şekil 2.4 Mander sargısız ve sargılı beton modeli .....	42
Şekil 2.5 Donatı çeliği malzeme modeli için doğrusal olmayan yöntemler ile gerilme-şekildeğiştirme .....	45
Şekil 3.1 Referans betonarme çerçeve modelin donatı ve geometrik kesit detayları .....	49
Şekil 3.2 Referans olarak seçilmiş betonarme çerçeve model. ....	50
Şekil 3.3 Referans betonarme çerçeve nümerik model. ....	50
Şekil 3.4 Referans betonarme çerçeve temel (a), kolon (b), kiriş (c) detayları.....	50
Şekil 3.5 Sonlu Eleman Modellerinde kullanılan doğrusal olmayan malzeme özellikleri. ....	51
Şekil 3.6 GFRP kuponlarının sayısal olarak doğrulanmış tek eksenli çekme testi .....	53
Şekil 3.7 GFRP kutu kesit ölçüleri.....	54
Şekil 3.8 Referans betonarme çerçeve analiz sonuçları. ....	55
Şekil 3.9 Deneylerin sonlu eleman modelleri doğrulaması.....	56

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.10 Çaprazlı betonarme moment çerçevelerinin yük-yerdeğiştirme eğrileri .....	58
Şekil 3.11 Son mafsal oluşumları ile bir betonarme çerçevesinde farklı tip çapraz konfigürasyonları .....	59
Şekil 3.12 Model 1 ve güçlendirme şekilleri.....	61
Şekil 3.13 Model 1 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğiştirmeler. ....	62
Şekil 3.14 Model 1 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri .....	62
Şekil 3.15 Model 2 ve güçlendirme şekilleri.....	63
Şekil 3.16 Model 2 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğiştirmeler. ....	63
Şekil 3.17 Model 2 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri .....	64
Şekil 3.18 Model 3 ve güçlendirme şekilleri.....	65
Şekil 3.19 Model 3 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğiştirmeler. ....	65
Şekil 3.20 Model 3 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri .....	66
Şekil 3.21 Model 4 ve güçlendirme şekilleri.....	67
Şekil 3.22 Model 4 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğiştirmeler. ....	67
Şekil 3.23 Model 4 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri.....	68
Şekil 3.24 Farklı kesitlerdeki kolonların P-M diyagramları. ....	69
Şekil 3.25 Betonarme kiriş detayı .....	69
Şekil 3.26 Betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi .....	70
Şekil 3.27 Etriye ve donatı stres-uzama grafikleri .....	70
Şekil 3.28 Sonlu eleman kiriş modeli.....	71
Şekil 3.29 Betonarme kirişin orta noktasındaki sehimin yük altında davranış verilmektedir..	71
Şekil 3.30. Üç boyutlu sonlu eleman kiriş model .....	72
Şekil 3.31 Boyuna donatı ve etriye detay görünümü .....	72
Şekil 3.32 Kiriş sonlu eleman modeli üzerinde oluşan mesnet reaksiyonları .....	73
Şekil 3.33 Düşey doğrultuda oluşan yerdeğiştirme.....	73
Şekil 3.34 Düşey doğrultuda oluşan elastik deformasyon. ....	74
Şekil 3.35 Düşey doğrultuda oluşan plastik deformasyon. ....	74
Şekil 3.36 Kirişte meydana gelen çatlaklar. ....	75
Şekil 3.37 Donatılarda meydana gelen düşey yerdeğiştirme. ....	75
Şekil 3.38 Donatılarda meydana gelen birincil asal gerilmeler. ....	76
Şekil 3.39 Donatılarda meydana gelen plastik eşdeğer stres. ....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.40 Donatılarda meydana gelen plastik deformasyon. ....	77
Şekil 3.41 Ansys doğrulama modelinde kiriş yükleme sonrasında elde edilen kiriş orta noktası yerdeğiştirme. ....	77
Şekil 3.42 Elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel ve nümerik analizlerle kıyaslanması. ....	78
Şekil 4.1 Betonarme çerçeve kalıp ve donatı hazırlıkları. ....	79
Şekil 4.2 Betonarme çerçevelerin beton hazırlık aşaması. ....	80
Şekil 4.3 Beton test numunelerin kür havuzuna yerleştirilmesi ve kalıpları sökülen çerçeveler. ....	81
Şekil 4.4 Beton test numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi. ....	81
Şekil 4.5 Beton basınç testlerinden elde edilen kuvvet-zaman grafiği. ....	82
Şekil 4.6 Epoksinin hazırlanması ve tatbiki. ....	83
Şekil 4.7 GFRP plakaların çerçeveye tatbiki. ....	84
Şekil 4.8 Mesnetleri tatbik edilmiş ve teste hazır çerçeveler. ....	85
Şekil 4.9 Referans (güçlendirilmemiş) Çerçevenin Sarsma Test Düzeneği. ....	86
Şekil 4.10 Çaprazlarla Güçlendirilmiş Çerçevenin Sarsma Test Düzeneği. ....	86
Şekil 4.11 Imperial Valley (1938) depremi X bileşen verileri ölçek 20. ....	87
Şekil 4.12 Imperial Valley (1938) depremi Y bileşen verileri ölçek 20. ....	87
Şekil 4.13 Kobe (1995) depremi X bileşen verileri ölçek 0.36. ....	88
Şekil 4.14 Kobe (1995) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.36. ....	88
Şekil 4.15 Chi-Chi (1999) depremi X bileşen verileri ölçek 8. ....	89
Şekil 4.16 Chi-Chi (1999) depremi Y bileşen verileri ölçek 8. ....	89
Şekil 4.17 Düzce (1999) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.04. ....	90
Şekil 4.18 DASK1 (2019) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.02. ....	90
Şekil 4.19 DASK2 (2019) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.02. ....	91
Şekil 4.21 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek: 20/1). ....	93
Şekil 4.22 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 20/1). ....	94
Şekil 4.23 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek: 20/1). ....	94

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.24 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 20/1).....	95
Şekil 4.25 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 20/1).....	95
Şekil 4.26 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 20/1) .....	96
Şekil 4.27 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.36).....	96
Şekil 4.28 1995 Kobe Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.36).....	97
Şekil 4.29 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.36).....	97
Şekil 4.30 1995 Kobe Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.36) ..	98
Şekil 4.31 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.36).....	98
Şekil 4.33 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:8).....	99
Şekil 4.34 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 8).....	100
Şekil 4.35 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:8).....	100
Şekil 4.36 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 8). 101	
Şekil 4.37 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:8).....	101
Şekil 4.38 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 8).....	102
Şekil 4.39 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.04) .....	102
Şekil 4.40 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.04).....	103
Şekil 4.41 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.04).....	103
Şekil 4.42 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.04).....	104
Şekil 4.43 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.04).....	104
Şekil 4.44 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.04).....	105
Şekil 4.45 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02) .....	105
Şekil 4.46 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02S).....	106

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.47 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02) .....	106
Şekil 4.48 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02) .....	107
Şekil 4.49 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02) .....	107
Şekil 4.50 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02) ..	108
Şekil 4.51 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02) .....	108
Şekil 4.52 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02) .....	109
Şekil 4.53 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02) .....	109
Şekil 4.54 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02) .....	110
Şekil 4.55 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02) .....	110
Şekil 4.56 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02) ..	111
Şekil 4.57 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02) .....	111
Şekil 4.58 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02) .....	112
Şekil 4.59 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02) .....	112
Şekil 4.60 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02) .....	113
Şekil 4.61 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02) .....	113
Şekil 4.62 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02) ..	114
Şekil 4.63 Referans betonarme çerçeve statik itme analizi öncesi .....	115
Şekil 4.64 Referans betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası .....	115
Şekil 4.65 Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi öncesi .....	116
Şekil 4.66 Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası .....	116
Şekil 4.67 Referans ve güçlendirilmiş çerçevelere ait deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri .....	117
Şekil 4.68 Referans betonarme çerçeve statik itme analizi sonrasında zayıf düğüm noktalarındaki mafsallaşmalar .....	118
Şekil 4.69 Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası plakalarda meydana gelen şekil değişimi .....	118
Şekil 4.70 Kirişin kolona bağlandığı yüzeylerde çaprazların kirişlerde oluşturduğu kesme etkisi .....	118
Şekil 5.1 Nümerik Referans Çerçeve (NRÇ) geometri ve donatı detayı .....	123
Şekil 5.2 Nümerik Güçlendirilmiş Çerçeve (NGÇ) geometri ve donatı detayı .....	123
Şekil 5.3 Deneysel ve nümerik betonarme çerçeve modellerin doğrulanması .....	124

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.4 Nümerik Referans ve Güçlendirilmiş Çerçevelerin (NRC, NGÇ) aksenal yerdeğiştirmeleri deneysel ve nümerik olarak.....	125
Şekil 5.5 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin donatı detayı .....	127
Şekil 5.6 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin X eksenini yerdeğiştirmeleri..	127
Şekil 5.7 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin X eksenini donatı yerdeğiştirmeleri .....	128
Şekil 5.8 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin donatı plastik deformasyonlar .....	128
Şekil 5.9 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin X eksenini gerilmeleri.....	129
Şekil 5.10 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin elastik deformasyonları.....	129
Şekil 5.11 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin plastik deformasyonları ....	130
Şekil 5.12 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin yanal yük-yerdeğiştirme grafiği tam bağlı durum için .....	130
Şekil 5.13 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin yanal yük-yerdeğiştirme grafiği fracture durum için.....	131
Şekil 5.14 Üç farklı L/H oranlarına sahip referans betonarme çerçeve sonlu eleman model	133
Şekil 5.15 Üç farklı L/H oranlarına sahip güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model .....	133
Şekil 5.16 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları .....	133
Şekil 5.17 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenini yerdeğiştirme sonuçları .....	134
Şekil 5.18 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenini gerilme sonuçları.....	134
Şekil 5.19 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları.....	134
Şekil 5.20 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları.....	135
Şekil 5.21 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları .....	135
Şekil 5.22 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenini yerdeğiştirme sonuçları .....	136
Şekil 5.23 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenini gerilme sonuçları.....	136

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.24 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları.....	136
Şekil 5.25 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları.....	137
Şekil 5.26 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları .....	137
Şekil 5.27 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli yerdeğiştirme sonuçları .....	137
Şekil 5.28 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları.....	138
Şekil 5.29 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları.....	138
Şekil 5.30 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları.....	138
Şekil 5.31 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve donatı sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları.....	139
Şekil 5.32 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve donatı sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları .....	139
Şekil 5.33 L/H oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve yanal yük taşıma kapasiteleri .....	140
Şekil 5.34 Farklı rijitliklere sahip modellenmiş betonarme çerçeve yalın modelleri.....	142
Şekil 5.35 Farklı rijitliklere sahip güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman modelleri .....	142
Şekil 5.36 Betonarme çerçevelerde kesit rijitlik değişimlerinin yanal yük kapasitesi yerdeğiştirme sonuçları yalın ve güçlendirilmiş modeller için.....	142
Şekil 5.37 Yalın ve farklı GFRP plaka genişliğine sahip kompozit elemanlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeve modelleri.....	144
Şekil 5.38 Yalın ve farklı aksel rijitliğe sahip GFRP plaka kompozit elemanlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeve modellerin yanal yük-yerdeğiştirme değerleri	144
Şekil 5.39 Yalın ve farklı rijitlik oranlarındaki GFRP kompozit plaka ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve modellerin enerji yutma kapasiteleri birim alan değerleri.....	145
Şekil 6.1 Betonarme çerçevede plastik mafsall oluşması.....	147

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Donatı Çeliklerine Ait Bilgiler.....	45
Çizelge 3.1 Beton Küp Numune Basınç dayanım sonuçları .....	51
Çizelge 3.2 Sonlu eleman modellerinde atanan malzeme özellikleri.....	52
Çizelge 3.3 GFRP kutu ve IPE100 çelik profil detayları .....	54
Çizelge 3.4 GFRP Kutu kesit profilleri için kritik burkulma yükleri.....	58
Çizelge 3.5 Farklı tip güçlendirme şekillerinden elde edilen değerler.....	68
Çizelge 4.1 Beton basınç deneyi sonuçları.....	82
Çizelge 4.2 Çerçvelere ait dinamik parametreler .....	92
Çizelge 4.3 Sismik analizlerde kullanılan depremler ve ölçekleri. ....	93



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$a$	: İki boyuna komşu donatı arasındaki uzunluk
$a_d$	: Basınç çubuğunun genişliği
$n$	: Kolondaki boyuna donatı sayısı
$f_c$	: Sargısız betonun basınç dayanımı
$f_{cc}$	: Sargılı betonun basınç dayanımı
$f_{ex}$	: X doğrultusunda etkili sargılamanın denk geldiği beton basıncı
$f_{ey}$	: Y doğrultusunda etkili sargılamanın denk geldiği beton basıncı
$\rho_s$	: Sargı donatısının hacimsel oranı
$\varepsilon$	: Şekil değiştirme
$\varepsilon_{c0}$	: Sargısız betonda maksimum dayanıma denk gelen birim kısalma
$\varepsilon_{c0c}$	: Sargılı betonda maksimum dayanıma denk gelen birim kısalma
$\varepsilon_{cu}$	: Sargılı betonda meydana gelebilecek en büyük basınç birim şekil değiştirmesi
$\varepsilon_s$	: Donatıda meydana gelen şekil değiştirme
$\sigma$	: Gerilme
$k_e$	: Sargılama etkinlik katsayısı
$E_c$	: Betonun elastisite modülü
$E_s$	: Donatının elastisite modülü
$E_f$	: Lifli polimerin elastisite modülü
$\Delta$	: Delta
$n_f$	: Kesitin tek yüzünde bulunan fiber sayısı
$s_f$	: fiber şeritler arası eksenden eksene olan mesafe
$w_f$	: Fiber kalınlığını
$Z_u$	: Sargısız betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal bölümünün eğimi
$Z_c$	: Sargılı betona ait gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal bölümünün eğimi

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

$\psi$	: Roll
$V_u$	: Kolonlar için yanal yük taşıma kapasitesi
$M_F$	: Betonarme çerçevelerde dikdörtgen kolonların eğilme kapasitesi
$M_y$	: Akma momenti
$M_p$	: Plastik mafsalda ki moment
$V_s$	: Kesme kapasitesi
$V_{cr}$	: Betonarme yapılarda herhangi bir kesitin kesme çatlama dayanımı
$V_f$	: Betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısını ifade etmektedir
$\tau_d$	: Yatay kesitin kayma dayanımı
$f_d$	: Yatay kesitin basınç dayanımı
$V_d$	: Dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kesme kuvveti

## KISALTMALAR

<b>ABYYHY</b>	: Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
<b>ATC</b>	: Applied Technology Council
<b>ACI</b>	: American Concrete Institution
<b>GFRP</b>	: Glass Fiber Reinforced Polymer
<b>DASK</b>	: Doğal Afetler Sigortalar Kurumu
<b>DKY</b>	: Deplasman Katsayıları Yöntemi
<b>DBYBHY</b>	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
<b>KSY</b>	: Kapasite Spektrum Yöntemi
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency
<b>TDY</b>	: Türkiye Deprem Yönetmeliği
<b>TBDY</b>	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
<b>TDTH</b>	: Türkiye Deprem Tehlike Haritası
<b>PEER</b>	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
<b>BEÜ</b>	: Bülent Ecevit Üniversitesi
<b>FBE</b>	: Fen Bilimleri Enstitüsü

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Ülkemiz deprem gerçeğiyle yaşamakta olan bir ülke olduğundan, mevcut yapılarımızı depremlere karşı yeter düzeyde taşıma kapasitesine çıkarmamız gerekmektedir. Yapılan çalışmalar özellikle 2000 yılı öncesinde inşa edilen betonarme ve yığma yapılarda deprem performansı açısından büyük sıkıntıların olduğunu göstermektedir (Kaplan 2008).

Türkiye’de deprem riski araştırıldığında ülke şehirlerinin toplam alanının % 96’sının deprem riskinin var olduğu alanlarda yer aldığı ve ülkede yaşayan insanların % 98’inin ise bu risk bölgelerinde ikamet ettiği belirlenmiştir (Özmen ve Can 2010).

Bu risk dikkate alındığında olasılıksal deprem risk hesap metodu uygulanarak çeşitli meydana gelme ihtimalleri ve sismik aktivite parametreleri için Türkiye Deprem Tehlike Haritası’nın (TDTH) yeniden düzenlenmiş olması önemlidir. TDTH için yatay doğrultuda sismik hareket risk değerleri dört farklı tekrarlanma periyotları ve ihtimallerine (her 43, 75, 475 ve 2475 yılda bir meydana gelmesi veya aynı sırası ile 50 yılda aşılma ihtimali %68, %50, %10 ve %2 olası koşulu) bağlı olarak değerlendirilmiştir. Yapıların deprem açısından tasarlanma sürecinde bu bilgilerin referans alınması, özellikle 2018 yılından daha sonra yapılan inşaatların göçme olasılıklarını 2018’den önce yapılan yapılara kıyasla çok daha az tehlikeli kılmaktadır (Aral ve Tunç 2021).

#### 1.1 TEZİN AMACI VE KAPSAMI

Bu doktora tezinin amacı Türkiye’de mevcut ve problemlili betonarme yapıların durumunu genel olarak değerlendirmek ve güçlendirmenin bu gibi yapıların özellikle yatay yük taşıma kapasitesi, rijitliği ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmaktır.

Tezin özgünlüğü, GFRP kutu kesit kompozit profillerin güçlendirmede çelik profiller yerine kullanılabilmesi, özellikle kolon kiriş birleşim bölgelerinde düğüm noktalarındaki boyuna donatıların kenetlenme kusurlarının dahil edilmesi, bu düğüm noktalarının GFRP plakalar ile güçlendirme sonrasında nasıl davranacağı ve düğüm noktalarında plastik mafsall oluşumu da yapılan bu çalışmada incelenmiştir. Bunlara ek olarak İstanbul gibi hayli aktif sismik bölgede bulunan betonarme yapıların mevcut hallerini ve yapısal kusurlarını oluşturulan laboratuvar numunelerine ve sonlu eleman modellerine yansıtılabilmek için, düşük beton basınç dayanımlı ve donatı oranının minimum düzeyde olduğu, etriye sıklaştırmasının bulunmadığı ve narin kesitli betonarme çerçeveler laboratuvarında imal edilmiş ve sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Üretilen betonarme çerçeveler üzerinde tatbik edilen güçlendirmenin etkinliği yapılan deprem ve statik itme test ve analizlerinde deneysel ve sonlu eleman modelleri ile incelenmiştir.

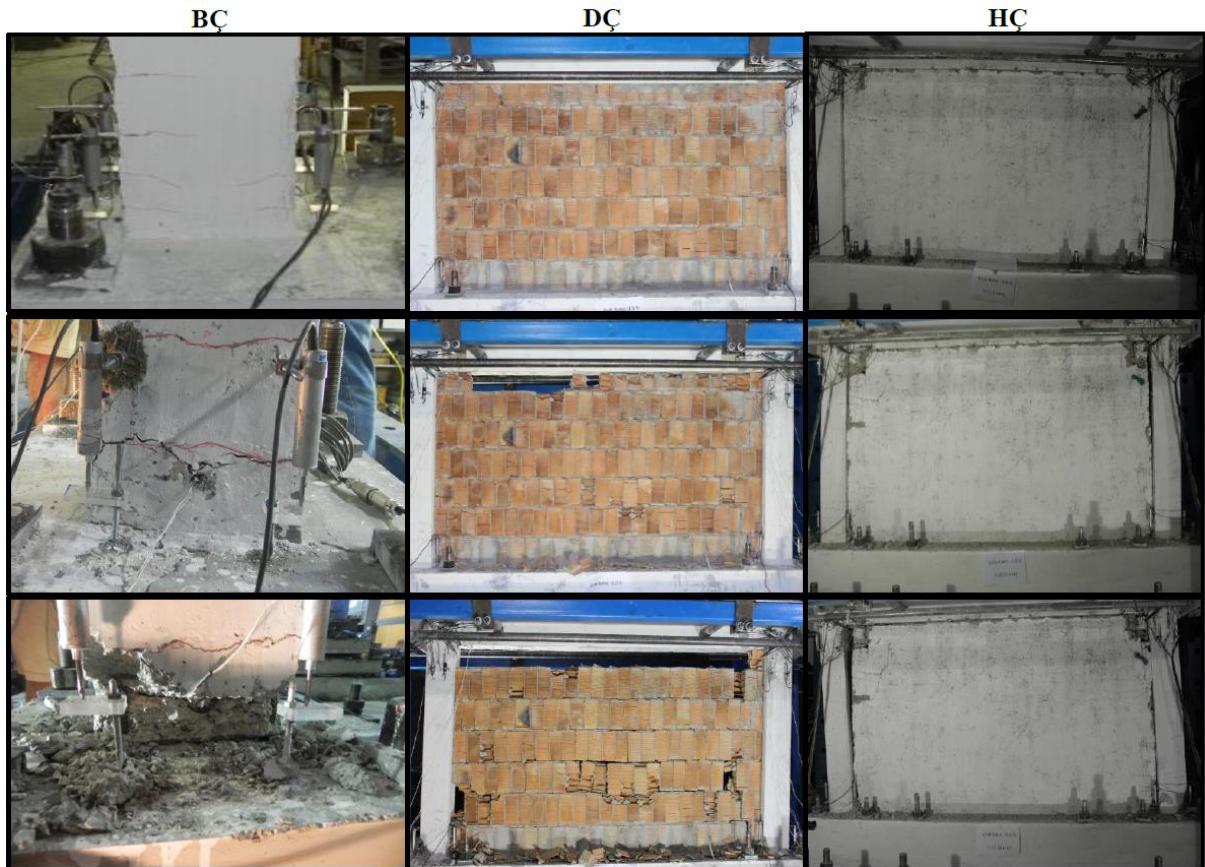
Özellikle çok yaygın kullanım alanına sahip tuğla duvarlı yapıların bu tez çalışmasında kompozit panellerle kıyaslanabilmesi için sismik davranışını, avantajlarını ve dezavantajlarını iyi bilmek gerekir. Tuğla duvarlı betonarme moment çerçeveli sistemleri daha rijit kılabilmek için ve onlara deprem açısından güçlü bir alternatif olarak geliştirilen ve önerilen perde duvarlı yapıları da bu bağlamda iyi analiz etmek gerekir.

Tez kapsamında kompozit elemanların, panellerin ve profillerin uygulama alanı olarak dolgu duvarlı ve duvarsız betonarme ve yığma yapılarda kullanılabilmesini düşünerek, betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların deprem performansına katkısını literatürde bu yapılar hakkında ki çalışmaları ve yönetmelikler de ki yeri ve önemini irdelememiz gerekir. Betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapılar hakkında yapılan araştırmalar literatür bölümünde verilmektedir.

## **1.2 LİTERATÜR TARAMASI**

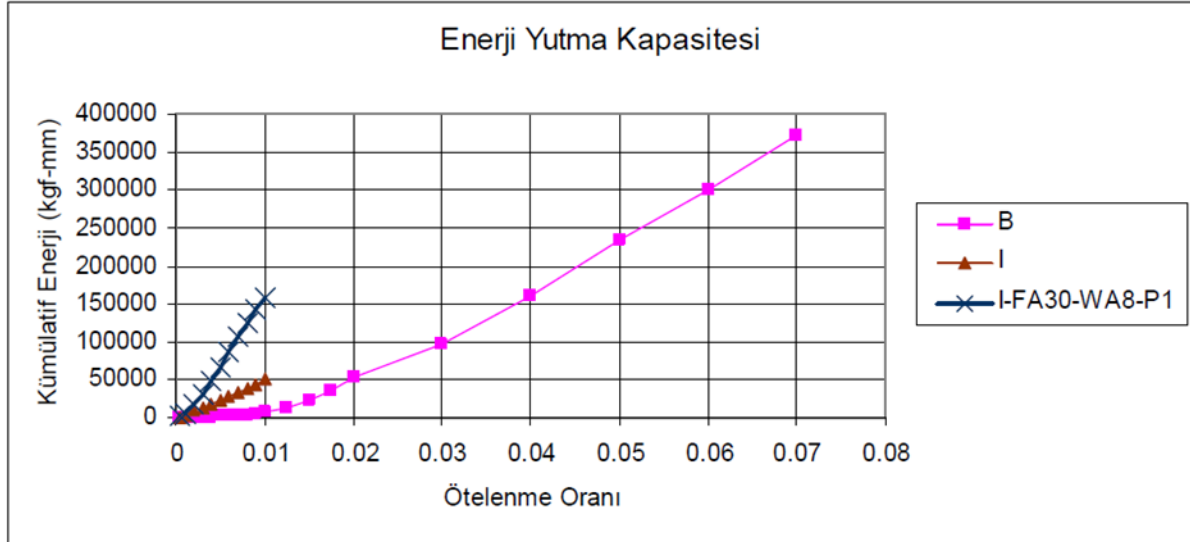
Demirel ve diğ. (2015) betonarme çerçevelerde dolgu duvar etkisini deneysel olarak incelemiştir. Üç tane bir açıklıklı, bir katlı, yarım ölçekli betonarme çerçeve numunelerin laboratuvar ortamında analizi gerçekleştirilmiştir. Bu üç çerçeve sırası ile boş (referans) betonarme çerçeve (BÇ), dolgu duvarlı ve sıvasız betonarme çerçeve (DÇ) ve dolgu duvarın her iki yüzünde hasır çelik tel ilave edilerek imal edilen sıvalı betonarme çerçeve (HÇ) test numuneleridir. Malzeme mekanik özelliklerinin ve dayanımlarının elde edilmesi için çerçeve

imalatında kullanılan tuğla, beton, donatı, harç deneylerinin yanı sıra prizma numuneleri kayma dayanımı, sehim referanslı basma ve eğik basma deneylerine tabi tutulmuştur. Deney düzeneğinde önce çerçevelerin her birine, kiriş yüzeylerine döşeme ağırlık yükünü denk yerleştirilen çelik blok kütleler ve kolon kapasitesinin %17.5' ine tekabül edecek biçimde düşey yükler yerine hidrolik pistonlar aracılığıyla yük uygulanmıştır. Sonrasında %4.0 kat yerdeğiştirme düzeyine ulaşınca kadar artarak devam eden döngüsel yerdeğiştirme çerçeveye tatbik edilmiştir. Dolgu duvar ve çerçeve yapısal davranışı öncesinde saptanmış kısımlara yerleştirilen toplam 50 civarı yük hücresi, gerinim pulları ve deplasman ölçerler ile izlenmiştir. Dolgu duvarın betonarme çerçeve taban kesme kuvveti değerini %43 civarında arttırdığı ama kapasite seviyesinin hızla azalarak ilerleyen yerdeğiştirme değerlerinde davranışın boş betonarme çerçeveye yaklaştığı görülmüştür. Dolgu duvarın her iki yüzeyine hasır çelik tel ilavesi ile sıvandığı durumda ise taban kesme kuvvet değeri %219 civarında artmış ve yüksek yerdeğiştirme seviyelerinde bile dolgu duvarın davranışa etkisi giderek azalsa dahi devam etmiştir. Şekil 1.1 de incelenen üç durum için farklı ötelenme değerleri için analiz sonrası hasar detayları verilmektedir.



**Şekil 1.1** Farklı yerdeğiştirme (%0.5, %2 ve %4) değerlerinde BÇ, DÇ ve HÇ hasar detayları (Demirel vd. 2015).

Özdemir ve diğ. (2009) bölme duvarının ve bu bölme duvar güçlendirilmesinin betonarme çerçeve yapısal davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Dolgulu çerçeve hesaplamaları doğru yapılır ve uygun bir projelendirme yapılırsa perde duvara benzer davranarak yapıların yatay rijitliğine ve dayanımına olumlu yönde etki eder bundan dolayı diğer taşıyıcı yapısal elemanların güçlendirilmesine gerek kalmayabilir. Bu çalışmada kusurlu olarak imal edildikleri kabul edilen binalara ait tuğla dolgulu betonarme çerçevelerin, duvar yüzeylerine ilave edilen hasır çelik donatı ve sıva ile güçlendirilmiş deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan araştırmada, üç adet bir katlı bir açıklıklı ve yarım ölçekli betonarme çerçeve imal edilmiştir. Betonarme test çerçevelerinden boş olan çerçeve referans çerçeve olarak kabul edilmiş ve deneyi gerçekleştirilmiştir. İkinci test çerçevesi duvar eklenerek deneyi yapılmış ve bölme duvar etkisi incelenmiştir. Üçüncü ve son test çerçevesi ise dolgu duvar yüzeyine hasır donatı tatbiki 2007 TDY’de sunulan parametrelere göre güçlendirilmiş ve deneyler yapılmıştır. Üretilen üç test çerçeve numuneleri, döngüsel yanal yük etkisi altında analizi gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasında ankastre durumu yansıtabilmek için rijit bir temel kısmı ve bunun üzerine, bir katlı, bir açıklıklı, güçlü kiriş ve zayıf kolon durumunu temsil eden ve beton basınç dayanımı yetersiz betonarme çerçeveler yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu araştırmada dolgu duvarların ve dolgu duvar güçlendirmesinin betonarme çerçeve yapısal davranışı üzerine etkisi incelenmiş ve teste tabi tutulan numunelerin yanal yük taşıma kapasiteleri, rijitlik ve enerji sönmüleme seviyelerindeki farklar incelenmiştir. Referans olarak belirlenen boş betonarme çerçeveye duvar eklenmesiyle 3.7 kat yanal yük taşıma kapasitesinde artma meydana gelmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevenin, hasır donatı eklenerek sıvanması durumunda ise çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesi 1.78 oranında daha fazla yüke ulaşmıştır. Başlangıç durumundaki rijitlikleri karşılaştırıldığında boş-referans çerçeve numune (B) ilk rijitliği 1.52 kN/mm, dolgu duvarlı betonarme çerçeve (I) numunesi ilk rijitliği 52.39 kN/mm, dolgu duvarlı güçlendirilmiş betonarme çerçeve numune (I-FA30-WA8-P1) ilk rijitliği ise 94.26 kN/mm’dir. Şekil 1.2’de kıyaslanan betonarme çerçeveler için enerji yutma değerleri verilmektedir.



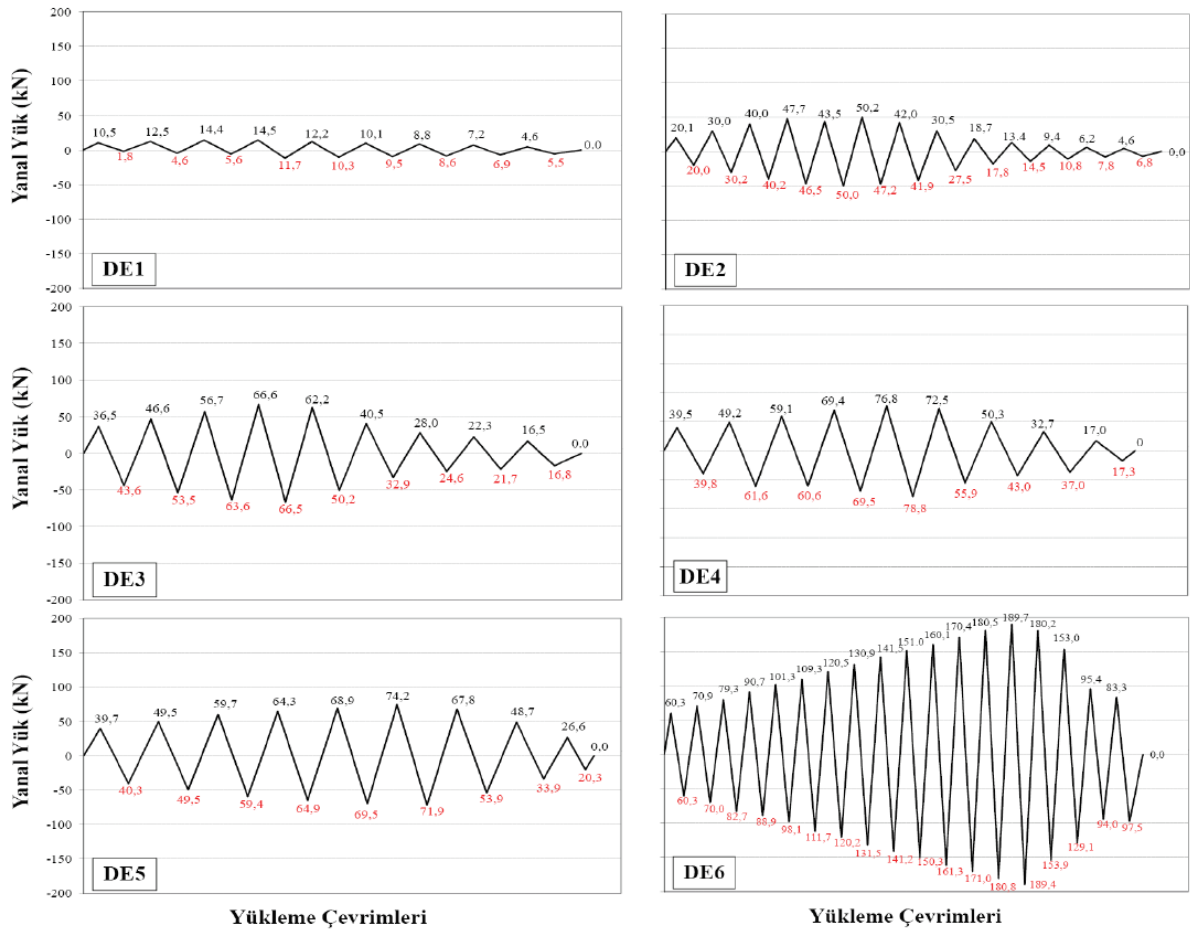
**Şekil 1.2** İncelenen durumlar için enerji yutma kapasiteleri (Özdemir vd. 2009).

İrtem ve diğ. (2005) yapmış oldukları çalışmada dolgu duvarlarının betonarme yapılara etkisi incelemiştir. Yapılan araştırmada, Türk Deprem Yönetmeliği esas alınarak dizayn edilen betonarme yapıların performansına dolgu duvarların etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Yapı taşıyıcı sisteminde duvarların yer almadığı ve duvarların olduğu farklı iki husus için sabit düşey yükler ve oransal bir şekilde artırılan yanal deprem yükleri uygulanarak geometri değişimleri ve malzeme açısından doğrusal olmayan teoriye göre analizleri gerçekleştirilerek yapısal davranışları kıyaslanmıştır. Bundan dolayı, referans olarak düzenli betonarme bir bina seçilerek Deplasman Katsayıları Yöntemi (DKY) ve Kapasite Spektrum Yöntemi (KSY) ile yapının performans seviyeleri hesaplanmıştır. Yürütülen analizler neticesinde, taşıyıcı sistemde duvarların dahil edilmesi ile yapı performansının iyileştiği ve yapısal davranışın duvarın lokasyonuna göre değişebildiği tespit edilmiştir.

Binaların performanslarının yorumlanmasında ATC 40 ve FEMA 356'daki parametreler ve şartlar dikkate alınmıştır. Türk Deprem Yönetmeliğinde de performans ve hasar seviyelerini ve doğrusal olmayan analiz metotlarını kapsaması faydalı olacaktır. Performans seviyeleri, doğrusal olmayan analiz metotlarından DKY ve KSY için her birinden temin edilmiştir. DKY'den hesaplanan deplasman değerleri ve dolayısıyla kesitlerdeki plastik dönme değerleri genellikle KSY'ye göre daha fazla olduğu bulunmuştur. Bu fazlalığın derecesi taşıyıcı sistemdeki dolgu duvarın dikkate alınıp alınmamasına, dolgu duvarların lokasyonunun ve sismik risk düzeylerine göre değiştiği, özellikle büyük ve çok yıkıcı depremler için yapı



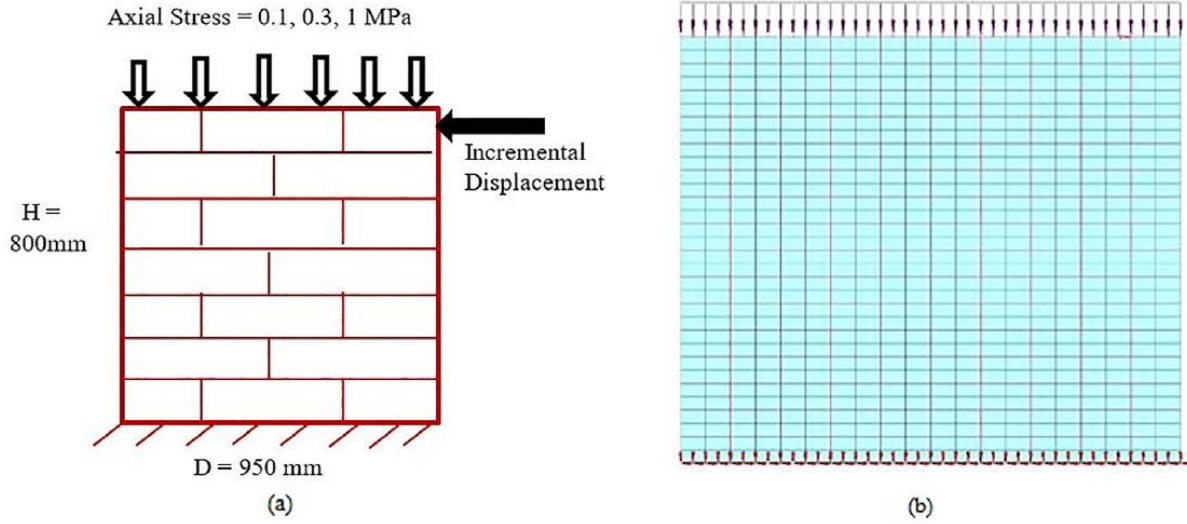
Betonarme çerçevede duvarların mevcut olması betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini boş-referans çerçeveye kıyasla 3.5 oranında artırmıştır. Sıva ile güçlendirilmiş tuğla dolgu duvarlar betonarme çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitesi seviyesini referans betonarme çerçeveye kıyasla 4.5 kat civarında artırmıştır. Tuğla dolgu duvar yüzeylerine beton harçla sıva yapılması, sıvanın daha gevrek olmasından kaynaklı, betonarme çerçevenin yük taşıma kapasitesini artırmanın yanında süneklik durumunu azaltacak yönde etki yapmıştır. Sıvası yapılmış duvar, sıvanmamış dolgulu duvara kıyasla daha etkili bir biçimde deformasyonları kısıtlamıştır. Şekil 1.4’de uygulanan yük detayları verilmiştir.



Şekil 1.4 Deney elemanlarının yükleme durumları (Baran 2012).

Vemuri ve diğ. (2019) yapmış oldukları çalışmada güçlendirilmemiş yığma yumuşak tuğla duvarları incelemişlerdir. Statik itme analizi (Pushover) yöntemi bu çalışmada kullanılmıştır ve nümerik ve analitik yaklaşım sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Yapılan nümerik analizler için DIANA programı kullanılmıştır. Nümerik analizlere bir alternatif olarak analitik bir yaklaşım yük deformasyon eğrilerinin çıkarılmasında önerilmiştir. Çeşitli olası hasar mekanizmaları için

hesaplanan analitik ve nümerik teknikler güçlendirilmemiş yumuşak yığma tuğla yapılar için önerilmiş ve uygulanabilir olduğu iddia edilmiştir. Şekil 1.5’de duvar modeli ve uygulanan yük detayları verilmiştir.



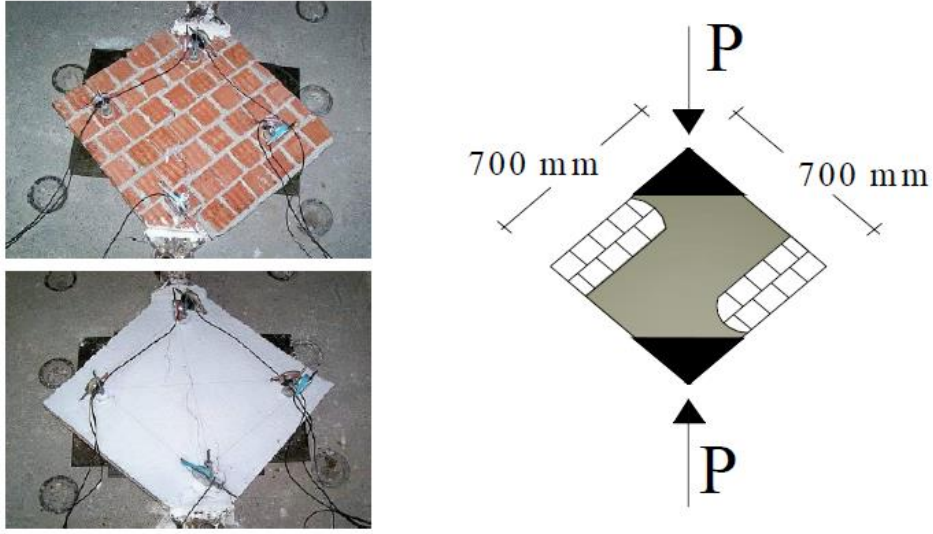
Şekil 1.5 (a) Duvar yük detayı, (b) duvar mesh detayı (Vemuri vd. 2019)

Tezcan ve diğ. (2007) yumuşak kat düzensizliği ve katların zayıf olması üzerine yapmış oldukları çalışmada özellikle tuğla dolgu duvarların etkisini incelemişlerdir. Yapıların giriş seviyesindeki kısımlarda, özellikle geniş alanlara ihtiyaç duyulan işletmeler bulunmaktadır (mağaza, banka, restoran, v.b.). Bu sebeple ara duvarlar örülmesi istenmemektedir. Bundan dolayı böyle yapılarda giriş katı, yatay yerdeğiştirmeler açısından, üst katlara göre nispeten, relatif olarak ciddi derecede zayıf olmaktadır. Yapılan bu araştırmada, öncelikle zayıf katlı yapıların Japonya, ABD, Meksika ve Türkiye’de meydana gelen depremlerde uğradığı hasar ve göçmelerden örnekler sunulmuştur. Sonrasında, herhangi bir giriş katının zayıf veya yumuşak kat diye tanımlanabilmesi için, Türk Deprem Yönetmeliği’nin (TDY-2007) sunduğu şartlar yeterli olmadığı ve aldatıcı olabileceği, 1999 Kocaeli depreminde göçmüş ve ciddi hasar görmüş yapılar ele alınarak örneklendirilmiştir. Nihai aşamada, yetersiz ve aldatıcı olabilecek şartların yenilenebilmesi için ve ek olarak zayıf / yumuşak kat düzensizliğinin ortadan kaldırılabilmesi için tavsiyeler sunulmuştur. Şekil 1.6’da Sakarya ilinde çok katlı bir yapının zayıf katında kalıcı ağır yanal yerdeğiştirme meydana gelmiştir.



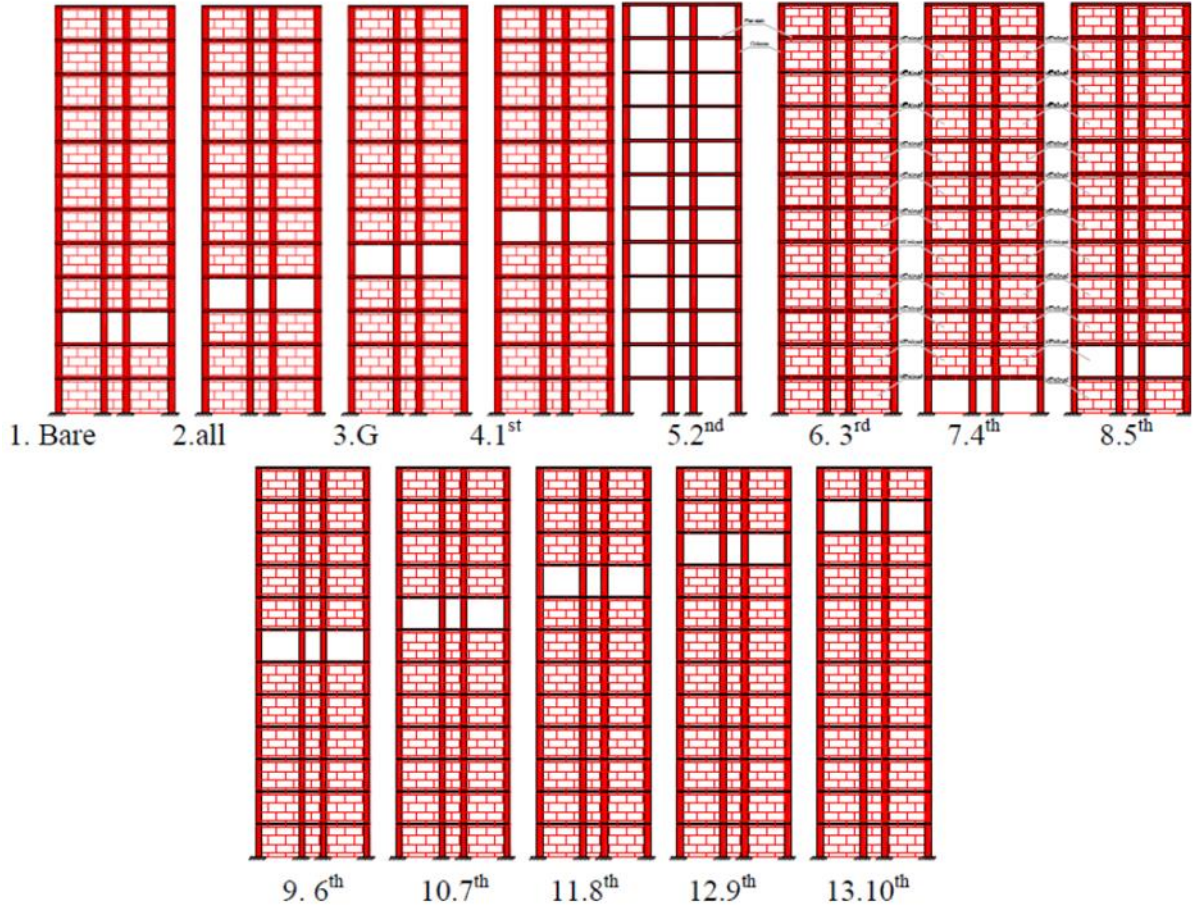
**Şekil 1.6** Sakarya’da çok katlı yapının zayıf katında ağır hasar (Tezcan vd. 2007)-17 Ağustos 1999 Kocaeli Depremi,  $M = 7.4$  ).

Sevil ve diğ. (2010) betonarme çerçevesi binaların yapısal davranışına tuğla dolgulu duvarların etkisi yapmış oldukları çalışmada deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapılan bu araştırmada, laboratuvar ortamında imal edilmiş bir açıklıklı ve iki katlı betonarme çerçeveler düşey ve deprem yükleri için çevrimsel yanal yüklerle test yapılmış, sıvasız ve sıvası yapılmış boşluklu tuğla duvarların betonarme çerçevesi deney test numuneleri yapısal davranışları üzerine olan etkileri çalışılmıştır. Betonarme test çerçevelerinde tuğla duvarların bulunması betonarme çerçevenin yatay yük taşıma seviyesini yalın (çıplak) betonarme çerçeveye kıyasla 3.5 kat civarında artırmıştır. Tuğla dolgu duvar yüzeyine sıva yapılması betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesini referans çerçeveye kıyasla 4.5 oranı civarında artırmıştır. Şekil 1.7’de tuğla duvar üzerine yapılan deney örneği verilmiştir.



**Şekil 1.7** Tuğla duvar üzerine yapılan deney örneği (Sevil vd. 2010).

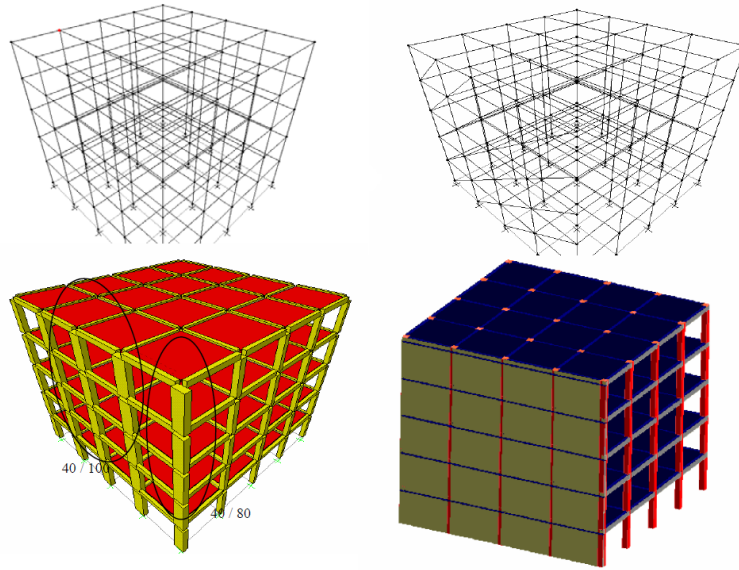
Farghaly ve Rahim (2013) yapmış oldukları çalışmada tuğla duvarların yapıların sismik performansına etkisini incelemiştirlerdir. Bu amaçla 13 adet 3 boyutlu bina seçilmiş ve SAP2000 programı ile analiz edilmiştir. Crisafulli (1997) tarafından yığma duvarların histerik davranışı üzerine önerdiği metot bu çalışmada kullanılmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre yığma dolgu duvarların global olarak çerçeve sistemli yapıların dayanımını ve rijitliğini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir. Yapısal analizler sonucunda tuğla duvarların tepe deplasmanları %17 oranında artmaya izin verdiği belirlenmiştir. Şekil 1.8’de oluşturulan nümerik modeller verilmiştir.



**Şekil 1.8** İncelenen nümerik modeller (Farghaly ve Rahim 2013).

Sayın ve Kaplan (2005) yapmış oldukları çalışmada betonarme yapılarda dolgu duvarların sonlu eleman yöntemleriyle modellenme tekniklerini sismik yükler altında incelemiştir. Betonarme yapıların analiz aşamalarında yapısal taşıyıcı olarak düşünülmeyen dolgu duvarlar, sadece zati yük olarak dikkate alınması sta4cad programı ve sap2000 programında tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen nümerik ve deneysel testler neticesinde dolgu duvarlar eşdeğer çapraz basınç elemanı ve panel şeklinde tasarlanmıştır. Modele ilave edilen dolgu duvarlar bina yapısal analizi, sonlu eleman metoduyla çalışan sayısal analiz yazılımlarında gerçekleştirilmiş ve alınan sonuçların kıyaslanması ile tavsiyeler verilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, dolgu duvarın dayanım ve rijitliklerinin tahkik edilmesi durumunda oluşturulan sonlu eleman modellerinin yapısal davranışını gerçeğe benzer olarak çalıştığı gözlenmiştir. Betonarme çerçevede, deneysel testlerden alınan sonuçlarla dolgu duvarın çapraz basınç elemanı gibi modellenip yanal yük tatbik edildiğinde, dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yalın-boş betonarme çerçeveye kıyasla daha rijit davranış sergilediği sonucu saptanmıştır. Dolgu duvarların binanın yapısal davranışını ciddi mertebede etki edebileceği görülmüştür. Dolgu

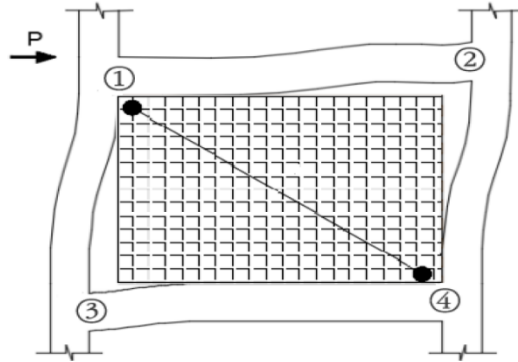
duvarlar ile yapının yük dağılımı değiştirmesinin yanı sıra ağırlık merkezi ve rijitliğine de etki edebilir. Dolgu duvar ilavesi durumunda, taşıyıcı sistem geometrisinin özellikle simetrik özelliğine bağlı olarak binalarda burulma problemleri doğurabilir. Dolgu duvarın genişliği ve tuğla kalınlığı dikkate alınarak oluşturulan diyagonal çubuk eleman modelinin, yapılmış olan laboratuvar testleriyle tutarlı sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Dolgu duvarlar, betonarme çerçevelerin açıklığında, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak panel gibi varsayılıp analizler tamamlanmış ve öncesinde yürütölen laboratuvar testlerinden alınan sonuçlara benzer veriler elde edilmiştir. Bitişik nizam olan binaların bir tarafının komple dolgu duvarlı olması, deprem esnasında kütle merkezinin ve rijitlik örtüşmemesine sebep olarak, aksine etki edecek bir faktör yoksa, binada burulma problemi oluşacağı belirlenmiştir. Zemin kat seviyesinde dolgu duvarların az veya olmaması hem mimari hem ticari nedenlerden kaynaklanırken, yapılan analizler sonucunda, zemin katta bulunan ana taşıyıcı eleman kolonların deprem sırasında tasarım momentlerinden bir miktar daha fazla momentlere maruz kalabildiği görölmüştür. Analizlerde incelenen binanın SAP2000 modeli aşağıda Şekil 1.9'da verilmektedir.



**Şekil 1.9** İncelenen binanın SAP2000 modeli (Sayın ve Kaplan 2005).

Sağlıyan (2018) dolgu duvarların sonlu eleman yöntemiyle yapılan modellenme tekniklerinin betonarme çerçeve yapısal davranışına etkisini araştırmıştır. Yanal yüklerin uygulandığı betonarme çerçeveye dolgu duvarların etkisini görmek için dolgu duvarları temsilen basınç çubuk elemanlar gibi modelleri oluşturulmuştur. Analizlerden hesaplanan kolon ve taban kesme kuvvetleri, görelî kat yerdeğiştirmesi ve periyotlar gerçekteştirilen değerlendirmelerde ana

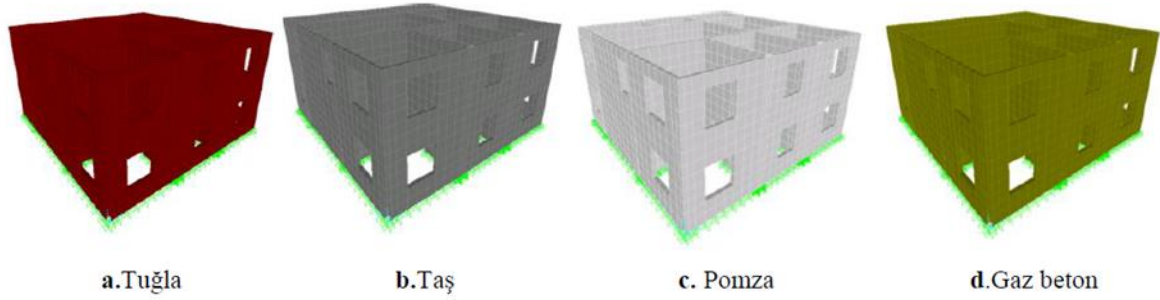
etkenler olarak hesaba katılmıştır. Üç farklı kat sayısına ve zemin tiplerine sahip dolgu duvarlı betonarme çerçeveler tasarlanmıştır bunlar sırasıyla 12, 9 ve 5 katlı olup Z3 ve Z1 zemin sınıflarında kabul edilmiştir. Dolgu duvarların eşdeğer basınç çubuk elemanı gibi model oluşturulmasında Hendry (1981) tarafından ve DBYBHY-2007 yönetmeliğinde verilen yöntemler uygulanmıştır. Araştırma neticesinde dolgu duvarların binanın rijitliğini değiştirebildiği ve buna bağlı olarak ta kolonlara gelen kesme kuvveti değerini, periyot ve göreceli kat ötelemesi azaltabileceği, taban kesme kuvvetini ise arttırılabildiği sonucu elde edilmiştir. Şekil 1.10’da yanal yük etkisinde şekil değiştirmiş betonarme çerçeve ve eşdeğer basınç çubuk eleman modeli sunulmuştur.



**Şekil 1.10** Yanal yük etkisinde şekil değiştirmiş betonarme çerçeve ve eşdeğer basınç çubuk eleman modeli (Sağlıyan 2018).

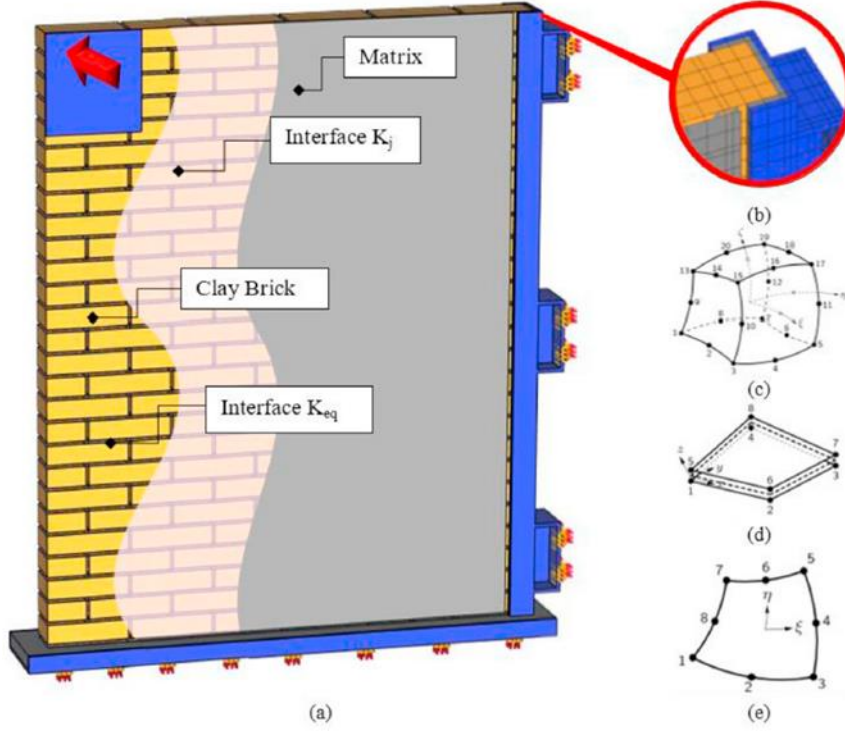
Korkmaz ve diğ. (2014) çeşitli malzemelerin yığma yapı yapısal davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Yığma binaların inşaat süreçleri, farklı yapı malzemeleri kullanımı ve üretim yöntemleri ile yıllardır devam etmektedir. Halen yapı stoğunun büyük bir kısmını oluşturan yığma yapıların davranışlarının doğru bir biçimde saptanması önemli bir husustur. En etkili faktörlerden olan yapısal malzeme mekanik özelliklerinin, bina davranışına olan etkisinin araştırılması gereklidir. Yapılan bu araştırmada farklı tipte malzemeler kullanılarak modellenen yığma binalar dikkate alınmıştır. Tasarlanan yığma yapı sonlu eleman modellerde yapısal malzemenin pomza, tuğla, taş ve gaz beton olması halinde modellerin sergileyeceği yapısal davranışlar araştırılmıştır. Analizlerde zaman tanım alanı metodu kullanılarak, çeşitli malzeme durumlarına göre, yirmi farklı sismik kayıtlar kullanılmıştır. Farklı deprem kayıtları kullanılarak yürütülen analiz sonuçları yorumlandığında elastisite modülü değeri daha küçük olan tuğlanın yer değiştirme değeri daha büyük, elastisite modülü daha büyük olan taş malzeme durumu için ise yer değiştirme değerinin daha küçük olduğu belirlenmiştir. Yer değiştirme değerleri en büyükten küçüğe doğru sırasıyla tuğlayı gaz beton, pomza ve taş izlemektedir.

Elastite modülü arttıkça yer değiştirme değerinin azaldığı belirlenmiştir. Şekil 1.11 de tuğla, pomza, gaz beton ve taş için oluşturulan sonlu eleman modelleri verilmektedir.



**Şekil 1.11** Malzeme t¼r¼ne g¼re binanın sonlu eleman modelleri (Korkmaz vd. 2014).

Ambra ve diğ. (2019) kil tuğla duvarların d¼zlem dışı y¼kler iin g¼lendirilmesi ¼zerine alışma yapmışlardır. ¼ncelikli olarak tuğla duvarların bire bir ¼lekli n¼merik modelleri oluşturulup test edilmiş ve geliştirilmiştir. D¼zlem dışı davranış yalnızca d¼z duvarlar iin değil kubbe ve tonoz gibi yapılardada g¼lendirmenin etkili olduğu g¼r¼lm¼řt¼r. Bu alışmada iki duvar test iin kullanılmıştır. İlk duvar g¼lendirilmemiřtir ve ciddi bir hasar seviyesine sahip hale geldikten sonra g¼lendirilip tekrar test edilmiştir. İkinci duvar ise ¼nce g¼lendirilmiř ve daha sonra birinci duvara uygulanan y¼k kadar bir y¼kle test edilmiştir. Bu sayede g¼lendirmenin etkisini hasara uğramış ve uğramamış duvarlarda g¼rmeęi sağlamıştır. N¼merik analizler, tahribata uğramış ve uğramamış duvarların g¼lendirilmesi ile duvarın rijitliğini global y¼k ve yerdeğiştirme kapasitelerini artırdığı g¼r¼lm¼řt¼r. Şekil 1.12’de oluşturulan n¼merik duvar modeli verilmektedir.



**Şekil 1.12** Oluşturulan nümerik model ve detayları (a-kil tuğla yığma duvar, b- yanal güçlendirme detayı, c-tuğla katı modeli, d-ara yüzey elemanı, e- düzlem gerilme elemanı) (Ambra vd. 2019).

Yadollahi ve diğ. (2016) betonarme yapılarda kısa kolon durumunun meydana gelmesinde dolgu duvar etkisini incelemiştir. Dolgu duvar betonarme çerçeve yapılarının analizleri çoğunlukla nümerik modellerde tuğla duvar ihmal edilerek yapılır ama bu genel bir yanıştır. Dolgu duvarın yatay kuvvetlere karşı dayanım düzeyleri gerçekte kolonu duvar yüksekliğine kadar kısıtlamaktadır, duvar yüksekliğinin üzerinde kalan kolon daha hızlı deforme olabilir. Yapılan bu araştırmada, ülkemiz’de askeri bir karakol merkezinde bulunan kulede depremten dolayı oluşan kısa kolonda, dolgu duvar etkisi irdelenmiş ve analiz neticesinde deprem öncesi hali ile kıyaslanmıştır. Betonarme kolonların yatay davranışını yığma duvarların dayanımı yapısal olmayan eleman olarak dikkate alınsa bile etkilemektedir. Kolonların sünekliğini ve ötelenmeği duvarlar azaltmaktadır. Yapısal düzensizliklerin oluşmasına sebep olan duvarlar sebebiyle oluşacak kısa kolona gelen kesme kuvveti artar. Şekil 1.13’de incelenen binada kısa kolonda oluşan hasar verilmektedir.

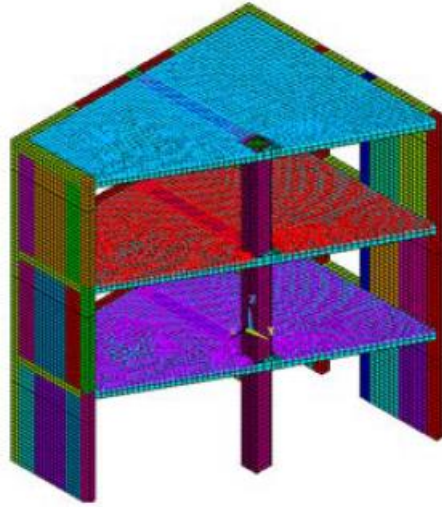


**Şekil 1.13** Kısa kolonda oluşan tahribat (Yadollahi vd. 2016).

Sakcalı ve diğ. (2015) betonarme yapılardaki perde duvar oranının yapı performansına etkisini araştırılmıştır. Sekiz katlı olacak şekilde oluşturulan betonarme bir yapının perde duvarlı ve perde duvarsız sonlu eleman modelleri ile analizler gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yapıların doğrusal elastik olmayan metot kullanılarak performans seviyeleri belirlenmiştir. Perde duvar alanının kat toplam alanına göre oransal düzeyi farklı kolon kesitleri ve perde duvarlar için araştırılmıştır. Perde duvar oran miktarının artmasıyla yapıya ait yanal yük taşıma kapasitesi düzeyi %80'e kadar artış sergilemiştir. Meydana gelen artış miktarı kolon kesitinin büyümesiyle %36'ya kadar küçülmüştür. Buna bağlı olarak kolon kesiti arttıkça, perde duvarın artış miktarı yapı kesme kapasitesi üzerindeki etkisi azalmaktadır. Perde duvar oranının büyümesiyle yerdeğiştirme ve doğal periyod azalmaktadır. Kolon kesitinin daha narin olması perde duvar oran miktarı artışının bu faktörler üzerindeki etkisi daha aşikâr olmaktadır.

Akansel ve diğ. (2011) perde duvarlar içeren bir yapı modelinin dinamik davranışını incelemek için değişen parametrelerle bir araştırma yapmışlardır. Burulma problemine mevcut olduğu perde duvar içeren bir yapının davranışını analiz etmek maksadıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapısal davranışını uygun biçimde simüle edebilmek için yapının davranışını değiştiren faktörlerin etki miktarlarını doğru belirlenmesi elzemdir. Yapılan bu araştırmada Fransa – Saclay'de yer alan ve Atom Enerji Düzenleme Kurumunun (CEA) organize ettiği proje kapsamında sarsma tablası deneyleri gerçekleştirilen (AZALEE) 0.25 ölçeğe sahip SMART-2008 perde duvarlı yapısı tahkik edilmiştir. Yapının davranışını

değiştiren unsurlar türetilen iki takım yapay yatay sismik hareketler altında gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki 0.2 g derecesinde tasarım seviyesinde, ikincisi ise 0.6 g büyüklüğündedir. Her bir sismik hareket için 12 takım hesaplama gerçekleştirilmiştir. 12 analiz içinde beşi için değişen parametre: E (Betonun Elastisite Modülü), üçü için değişen parametre: donatının akma seviyesi  $F_y$ , ikisi için değişken: sönüm oranı ve diğer ikisi için de ilave yüklerdir. Analizler neticesinde kat düzeylerinde saptanmış belirli bölgeler üzerinde katlar arası yerdeğiştirme, katlar arası ötelenme miktarı, en büyük deplasman ve en büyük taban kesme kuvvetler değerleri araştırılmıştır. Yapının depremden kaynaklanan yükler sonucu üç boyutlu davranışı, betonun elastik olmayan davranışı ve performansa yönelik değişkenler dikkate alınarak yorumlanmıştır. Oluşturulan model sonlu elemanlar metodu dikkate alınarak çözülmüştür. Yapı planında düzensizlik olmasından kaynaklı burulma problemi meydana gelmiştir. Duvarlarda oluşan kesme kuvvet değerleri için, değişkenlerin sonuçları etkilediği belirlenmiştir. Minimum değişim donatı akma dayanımına ait olan aşamadır. Şekil 1.14’de incelenen binanın ANSYS modeli verilmektedir.

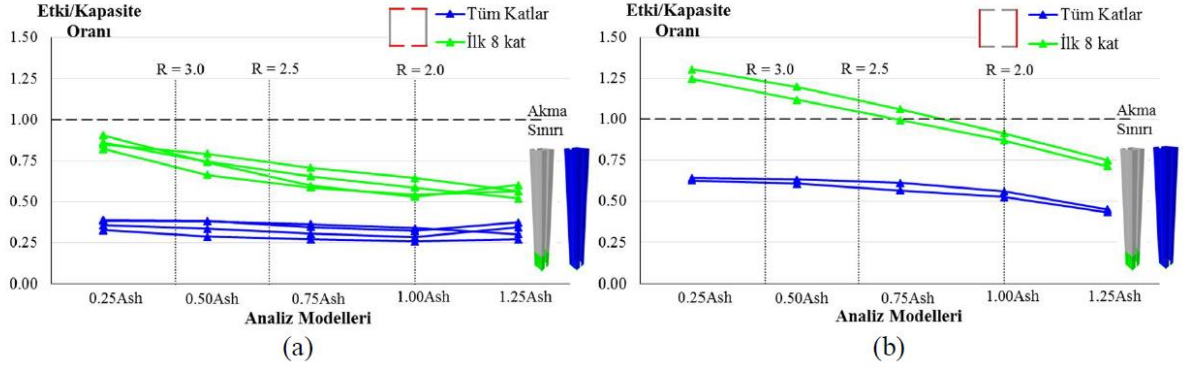


**Şekil 1.14** İncelenen binanın ANSYS modeli (Akansel vd. 2011).

Uçar ve Merter (2009) perde-betonarme çerçevesel yapıların deprem açısından yapısal davranışını perde lokasyonunun plandaki değişimine göre etkisini araştırmışlardır. Kat planındaki detayındaki lokasyonları çoğunlukla mimari dizayna bağlı kalarak ortaya çıkan perdelerin planda ki yerleşimi ve kesit alanları deprem etkisindeki davranışlarında hayli ciddi derecededir. Yapılan bu araştırmada, kat planında simetrik biçimde yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli perdelerin, yapının iç ya da dış cephesine konulmasına perde-çerçeve sistemli yapıların deprem davranışına etkileri incelenmiştir. Özdeş plan şekline sahip ve DBYBHY’ye esas

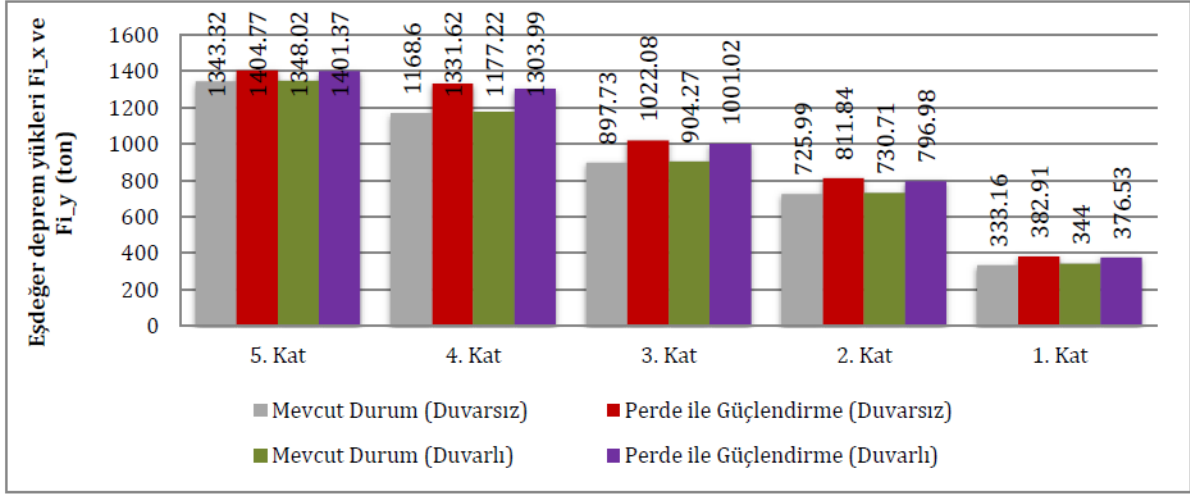
alınarak tasarlanan 8 katlı betonarme perde-çerçeve sistemli iki yapıdan ilkinde perdeler iç kısma, ikincisinde ise dış kısma yerleştirilmiştir (DBYBHY, 2007). Yapıların doğrusal elastik sismik hesabında perdelerin taşıdığı taban kesme kuvvet değeri, kat yanal ötelenmeleri ve ayrıca % 5 ek dış merkezlik için burulma problemi katsayıları elde edilmiştir. Perdelerin yapının dış cephesine yerleştirilmesi halinde kat yatay yerdeğiştirmelerinin ihmal edilebilecek düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Araştırmada göz önüne alınan perdelerin farklı yerleştirme şekilleri için en bariz fark burulma düzensizliği katsayılarıyla alakalıdır. Perdelerin yapının kat planında dış cepheye yerleştirilmesi durumunda burulma düzensizliği katsayıları azalmaktadır.

Özcan ve Erkuş (2016) çok katlı yüksek betonarme binalarda perde kesit genişliğinin ve kesme donatısının perde kesme davranışına üzerine etkisi doğrusal olmayan (nonliner) nümerik analizlerle incelenmiştir. Yüksek yapı perde duvarlarının kesme kuvvet değerleri için tasarım aşamasında, ilgili teknik şartnamelerin esas alınması sonucunda hesaplanan kesit tasarımın gerçek deprem davranışının nasıl olacağı üzerine yeterli araştırmalar bulunmamaktadır. Yapılan araştırma kapsamında, perde duvar kesme davranışını anlamak için ülkemizde inşası yakın zamanda bitmiş olan 43 katlı yüksek betonarme perde duvarlı bir bina referans olarak irdelenmiştir. Başlangıçta, çeşitli perde duvar kesit ebatlarının pik yer değıştirmesi, taban kesme kuvvet değeri ve perde eksenel ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri doğrusal analizler ile irdelenmiştir. Akabinde sabit perde duvar kesit ebatlarında kesme donatısı miktarları artırılıp-azaltılarak, kesme davranışını da içerecek şekilde doğrusal olmayan bina tasarımı yapılmış ve 2500 senelik tasarım ivme spektrumuna göre yedi çift tarihi deprem verileri için zaman tanım alanında analizler tamamlanmıştır. Çeşitli kesme donatısı çaplarının bina davranışına ve perde duvarların kesme davranışına katkısı hesaplanmıştır. Yapılan analizler neticesinde, perde duvar kesit kalınlığındaki büyümenin benzer miktarda bina performansına etki etmediği gözlemlenmiştir. Ayrıca kesme kuvvetlerinin küçük kesitli oranından ciddi mertebede etkilendiği de kullanılan teknik şartnameler ile modellenmiş az narin olan duvarlarda doğrusal olmayan kayma şekil değıştirmelerinin gerçekleştiği anlaşılmıştır. Perde duvar kesit boyutları ile alakalı gerçekleştirilen doğrusal analizlerde perde duvar kesit ebatları özellikle genişlik azalması ile binanın esnekliği artmış ve meydana gelen deprem kuvvetleri küçülmüştür. Bu yüzden perde kesit genişliğinde artış, binada genellikle daha emniyetli bir hal yaratmayabilir. Şekil 1.15’de 6.5 metre ve 16 metre ölçülerindeki perde duvarlar için tamamlanan analiz sonuçları sunulmaktadır.



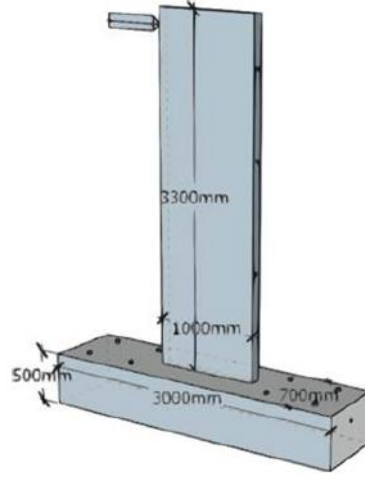
**Şekil 1.15** (a) 6.5 m ölçülerindeki duvarlarda etki-kapasite miktarı, (b) 16 m ölçülerindeki duvarlarda etki-kapasite oranları (Özcan ve Erkuş 2016).

Dönmez (2019) yurt olarak kullanılan betonarme bir yapıya perde duvar güçlendirmesi sonrasında yapının davranışına duvarların etkisinin incelemiştir. Betonarme yapılarda yıllardır süregelen yetersiz basınç dayanımına sahip beton kullanılması imal edilen betonarme yapıyla mimari bakımdan farklı mekanların oluşturulmasına olanak sağlayan tuğla ve taş duvarların malzeme özellikleri, tasarım ve imalat gibi konularda kusurlu kurgulanması deprem reaksiyonuna yönelik binaları güçsüzleştirmektedir. Binaları depreme karşı güçlü kılmak için deprem perde duvarlarının yapıdaki dayanımı artırıcı yönde fayda sağlaması nedeniyle genel olarak kullanıldığı söylenebilir. Deprem perde duvarlarının binayı güçlendirmedeki önemli yararına ilaveten binadaki dolgu duvarların faydasını da dikkate almanın önemli olduğu söylenebilir. Binanın mevcut duvarları ele alınmadan yürütülecek çalışmalarda yapının deprem yükleri, hakim periyodu, taşıyıcı sistem elemanlarında aktarılan deprem yükü, binadaki düzensizlik problemi, binanın deprem karşısında enerji yutma kapasitesi, meydana gelebilecek hasar-yıkılma şekli gibi ciddi faktörlerin yorumlanması doğru yapılmayabilmektedir. Ara duvarların nümerik sonlu eleman modeli tasarlanarak analizlerde ve perde duvar güçlendirilmesi uygulanan bir binada nasıl etki edebileceği bu çalışmada araştırılmıştır. Mevcut binada farklı ara duvar kesit birim metre kareye sahip sonlu eleman modelleri tasarlanarak, deprem yüklerinden kaynaklı binaya ve taşıyıcı sistem eleman hasarına olan etkisi ve düzensizlik problemleri incelenmiştir. Duvarlar dikkate alındığında deprem perde duvarları ile güçlendirme yapılan bir binada etkileri araştırılıp duvarların analizlere ihmal edilmesi haliyle kıyaslanmıştır. Yapılan bu çalışmada belirlenen 4 farklı durumdan alınan sonuçlar neticesinde dolgu duvarların depremin başlangıç saniyelerinde deprem yüklerinin önemli bölümünü aldığı saptanmıştır. Dolgu duvarlar tasarlanarak analizlere eklendiğinde perde duvar ve kolon göçme -hasar miktarını ve etki/kapasite seviyelerini düşürdüğü bulunmuştur. Şekil 1.16'da katlara göre eşdeğer deprem yükü dağılımı verilmektedir.



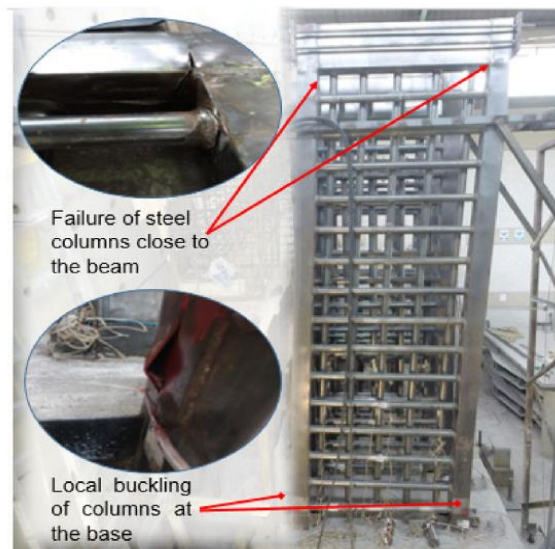
Şekil 1.16 Eşdeğer deprem yükünün katlara göre dağılımı verilmektedir (Dönmez 2019).

Olabi ve diğ. (2018) kompozit perde duvarlara uygulanan yanal yük etkisiyle davranışlarını irdemişlerdir. Özellikle son on senede bilim insanları, deprem yükleri uygulanan binalardan yüksek performans alabilmek için geleneksel betonarme perde duvarların kullanılmasına alternatif olabilecek kompozit perdeler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Kompozit perde ve paneller taşıyıcı sistem elemanı olarak; artırılmış yatay yük taşıma kapasite değerlerine ek olarak mimari açıdanda narin kesit alanlarla kullanılabilmesi bakımından mimarların ve mühendislerin yöneldiği sistemler olmaya başlamıştır. Yapılan araştırma konusu dahilinde mühendisler yaygın olarak ön üretimli profil olarak kullanılabilen elemanları yönelmişlerdir. Yürütülen araştırmada ön üretimli profil kesitlerin kullanılmasına alternatif olarak L kesitli çelik levhalar seçilmiştir, 1/3 ölçekli olan kompozit yapıda bir betonarme perde duvar imal edilmiştir. Üretilen kompozit betonarme perde duvar yatay yükler altında deprem laboratuvarında test edilmiştir. Kompozit betonarme perde duvarın nümerik sonlu eleman modeli OpenSees sonlu eleman yöntemi ile çalışan programda tasarlanmıştır ve sonlu eleman modeli deney sonuçları ile kıyaslanarak doğrulanmıştır. Deney sonuçları ile kıyaslanıp doğruluğu ispatlanan sonlu eleman modeli kullanılarak değişken parametrelili bir araştırma yürütülmüştür. Kompozit perde duvarın yapısal davranışını doğru biçimde tasarlamada sonlu eleman model hayli tutarlı sonuçlar vermiştir. Şekil 1.17’de oluşturulan model verilmektedir.



**Şekil 1.17** İncelenen nümerik kompozit panel modeli (Olabi vd. 2018).

Pazmiño ve diğ. (2019) yanal çevrimsel yükleme altında çelik paneller deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmada 4 çelik tüp panel yanal yük altında deneysel olarak test edilmiştir. Bu çalışmada yapının rijitlik ve enerji tüketimi üzerine odaklanılmıştır. Çalışma sonucunda kolonlardaki çelik profillerin yere yakın olan kısımlarında lokal burkulma meydana gelmiştir. Bu yüksek basınç kuvvetinden kaynaklanmaktadır. Kolonların kirişe yakın olan kısımlarında çekme gerilmesi sebebiyle çatlaklar ve yorulma deformasyonları oluşmuştur. Zemin döşemesinde hiç yerdeğiştirme olmadığı görülmüştür. Daha çok çalışma yapılarak paneller üzerinde daha kesin yorumlar yapılmalıdır. Şekil 1.18’de oluşan tahribat detayı verilmektedir.



**Şekil 1.18** Oluşan tahribat detayı (Pazmiño vd. 2019).

Assaad ve diğ. (2018) rüzgar ve deprem yüküne karşı sandviç hafif panellerin modellenmesi ve test edilmesi üzerine çalışmışlardır. Bu çalışma panel bağlantı mekanizmasının ve yük aktarım detaylarının anlaşılması için önem taşımaktadır. SAP2000 programı ile duvar yerine panel modeli oluşturulmuştur. Yapılan analiz sonuçlarına göre panel için gerekli emniyet değerinin yoğunluk ve yanal yük kuvveti derecesi ile alakalı olduğu söylenmiştir. Şekil 1.19'da SAP2000 programında oluşturulan panel modeli verilmektedir.

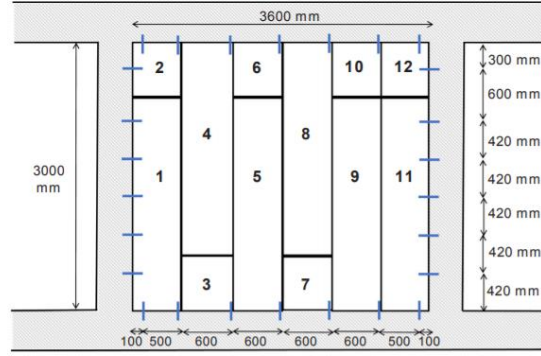
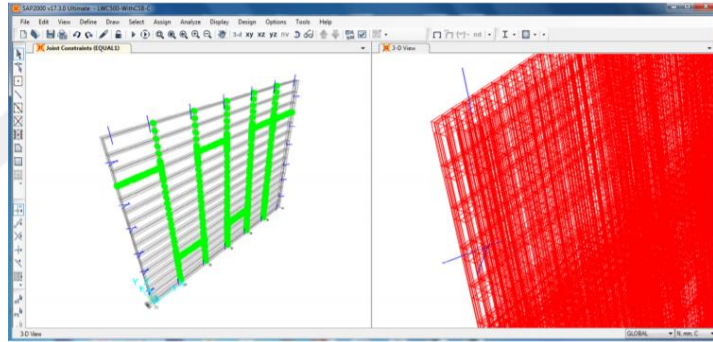
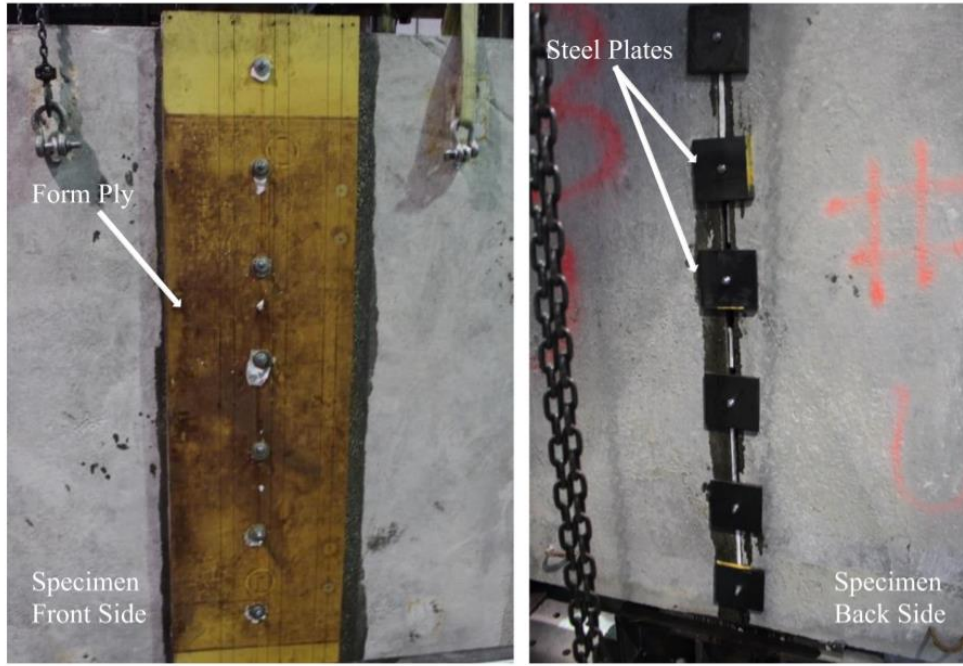


Fig. 10. Schematic representation of 3.6 x 3 m<sup>2</sup> wall constructed using lightweight panels.



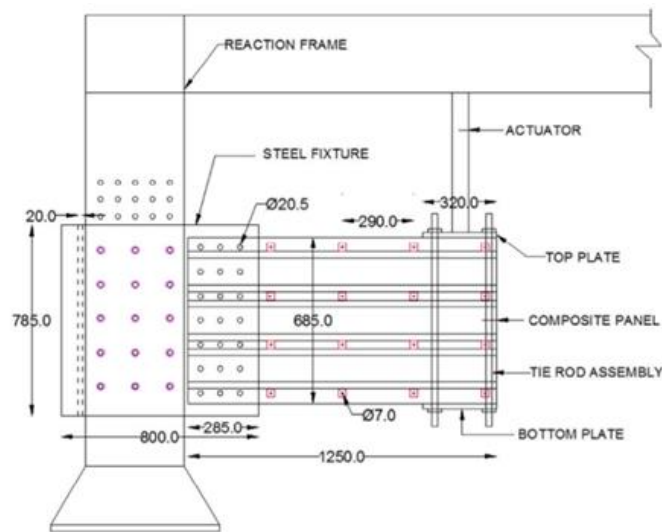
Şekil 1.19 Oluşturulan panelin program modeli (Assaad vd. 2018).

Nye ve diğ. (2018) ön üretilmiş beton panellerin cam fiber takviyeli polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)) kompozit bağlantı detaylarını incelemişlerdir. Numuneler iki yada dört tabaka kompozit bağlantı detayından oluşmaktadır. 8 numune çevrimsel yük altında bağlantı kapasitesi ve tabakaların yüzey basıncı incelenmiştir. Kompozit bağlantı detayı yanal yük, yanal yer değiştirme ve kesme kuvveti transferi bakımından kabul edilebilir sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür. Cam fiber takviyeli polimer tabakalara uygulanan karbon fiber takviyeli polimer ankrajlar sayesinde yanal yük ve yer değiştirme kapasitesi önemli ölçüde artmıştır. Şekil 1.20'de uygulanan kompozit bağlantı detayları verilmektedir.



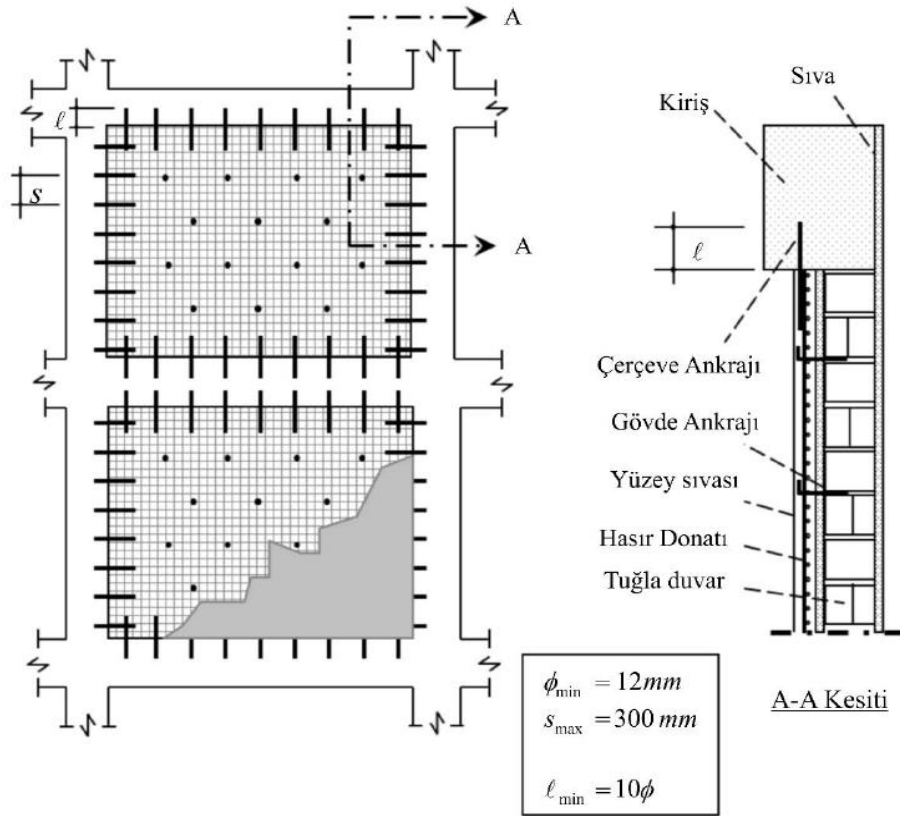
Şekil 1.20 Uygulanan kompozit bağlantı detayları (Nye vd. 2018).

Prabha ve diğ. (2017) yanal yük altında çelik köpük betonarme panelleri incelemiştir. İki panel numune statik ve yanal çevrimsel yükleme altında analiz edilmiş ve çelik levhalar burkulmadan önce akmışlardır. Önerilen panelinin sismik dirençli bir perde duvar görevi görmesinin uygunluğu binalar için bu çalışmayla kanıtlanmıştır. Yapılarda kullanılan duvar ağırlıkları bu paneller sayesinde ciddi miktarda hafifleyeceği görülmektedir. Şekil 1.21’de panelin deneysel modeli verilmektedir.

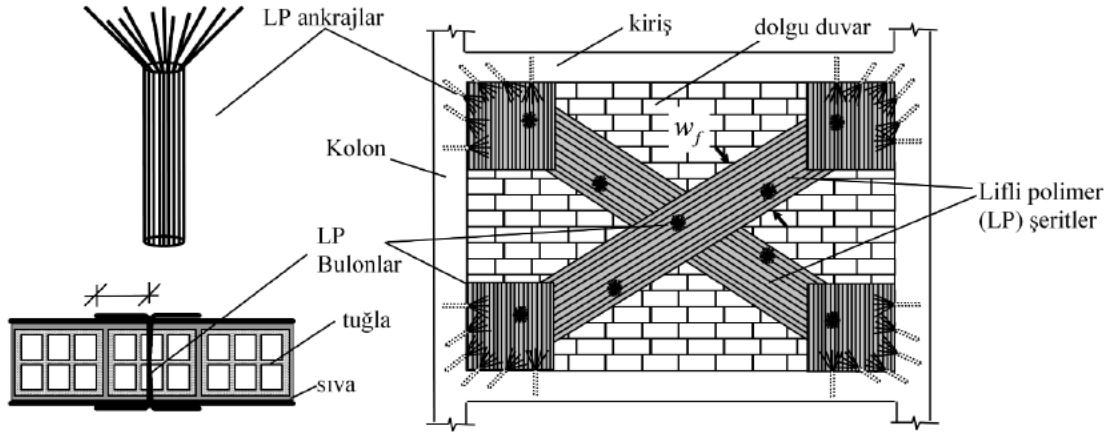


Şekil 1.21 Kompozit panelin deneysel modeli (Prabha vd. 2017).

2018 yılında yayınlanan ve ülkemizde şuan uygulanan deprem yönetmeliğinde (TBDY 2018) yer alan dolgu duvar güçlendirmeleri aşağıda şekil 1.22-1.23’de verilmektedir. Temelin üst kısmından yukarıya doğru ve sürekliliği olan betonarme çerçeve sistem açıklığında bulunan dolgu duvarlarının kesme kuvvet dayanımı ve rijitliği aşağıda gösterilen güçlendirme tekniği ile iyileştirilebilir.

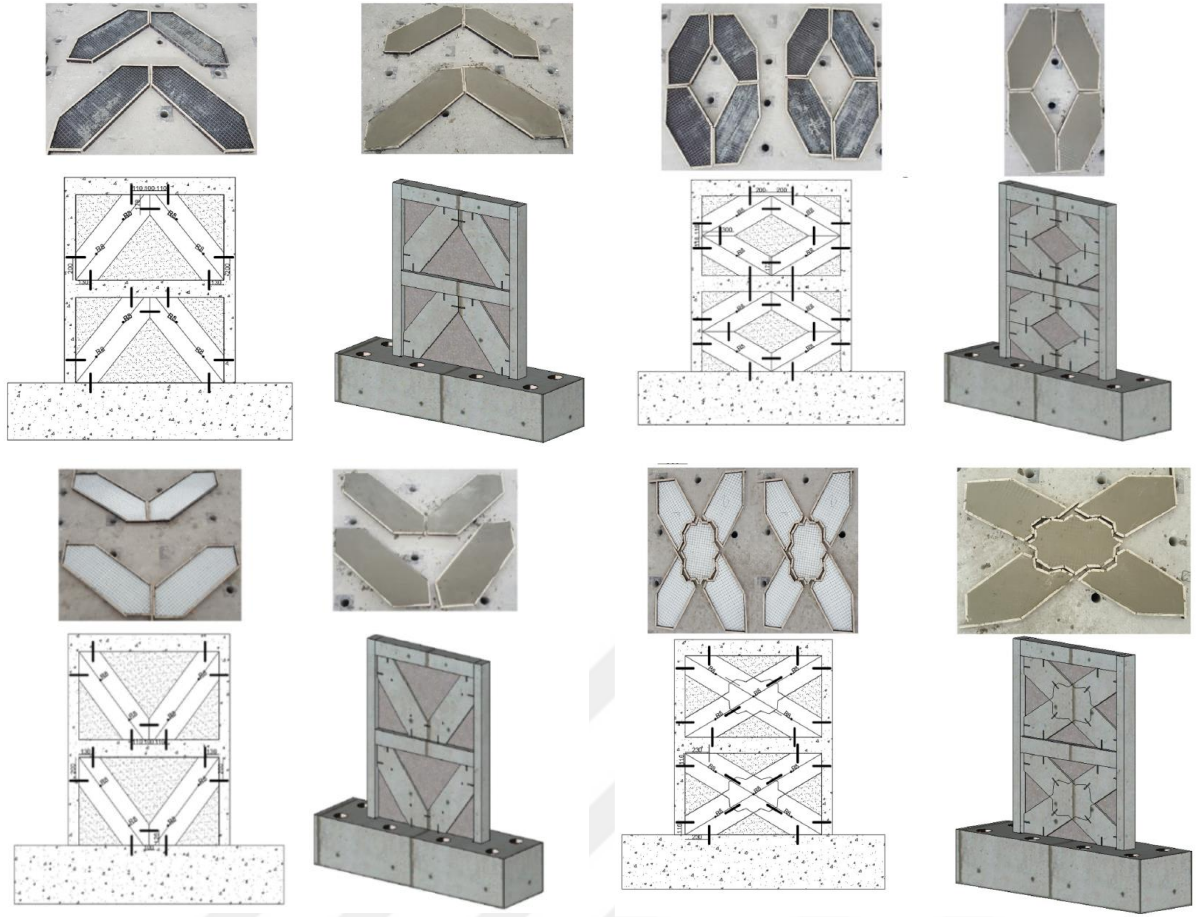


**Şekil 1.22** Hasır donatılar tatbik edilerek betonarme çerçeve arasında yer alan dolgu duvarların özel sıva kullanımı ile güçlendirilmesi (TBDY 2018).

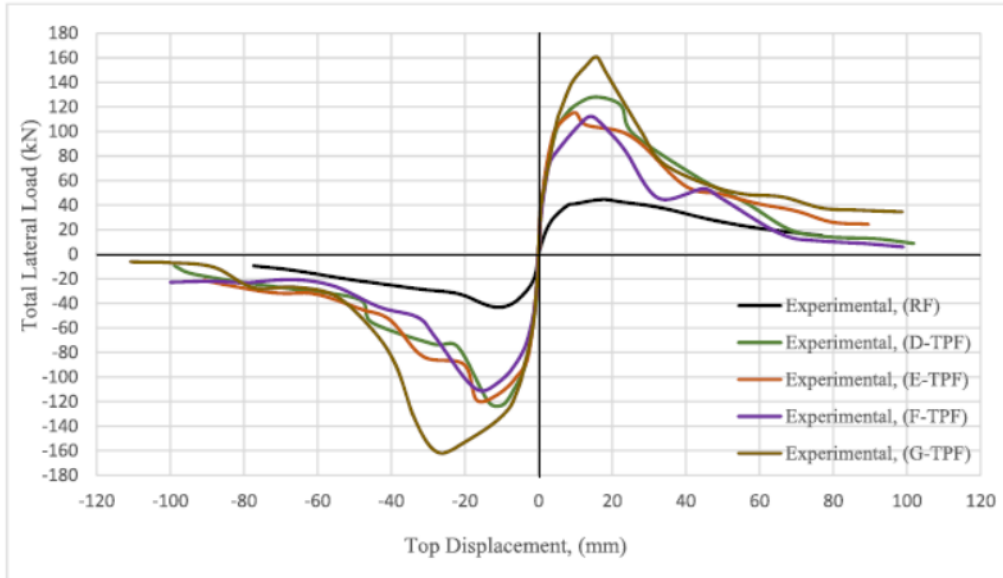


**Şekil 1.23** Lifli polimer şeritlerin tatbik detayı (TBDY 2018).

Aksoylu ve Kara (2020) yüksek mukavemetli diyagonal prekast paneller kullanarak betonarme çerçevelerinin güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Tersinir tekrarlanır yatay yük altında yapılan deneysel çalışmalar Selçuk Üniversitesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Prekast beton paneller ile farklı geometrik modeller oluşturularak, dolgu duvarlı çerçeve sistemlere tatbik edip yanal yükleme altında, betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların yatay yük taşıma kapasitesini, maksimum yük altındaki rijitliğini ve enerji sönümlene kapasitesini artırmayı hedeflemişlerdir. Uygulanan farklı geometrik paneller içerisinde en iyi sonuç veren geometrik modelden elde edilen deneysel analiz sonuçlarına göre yatay yük taşıma kapasitesi, maksimum yük altındaki rijitliği ve enerji sönümlene kapasitesi sırasıyla 3.74, 12.34 ve 4.29 kat artış gösterdiği elde edilmiştir. Şekil 1.24’de dolgu duvarlara tatbik edilen farklı tip güçlendirme şekilleri görülmektedir. Şekil 1.25’de ise yapılan deneyler sonucunda elde edilen yanal yük değerleri ve yerdeğiştirme değerleri kıyaslanmıştır.

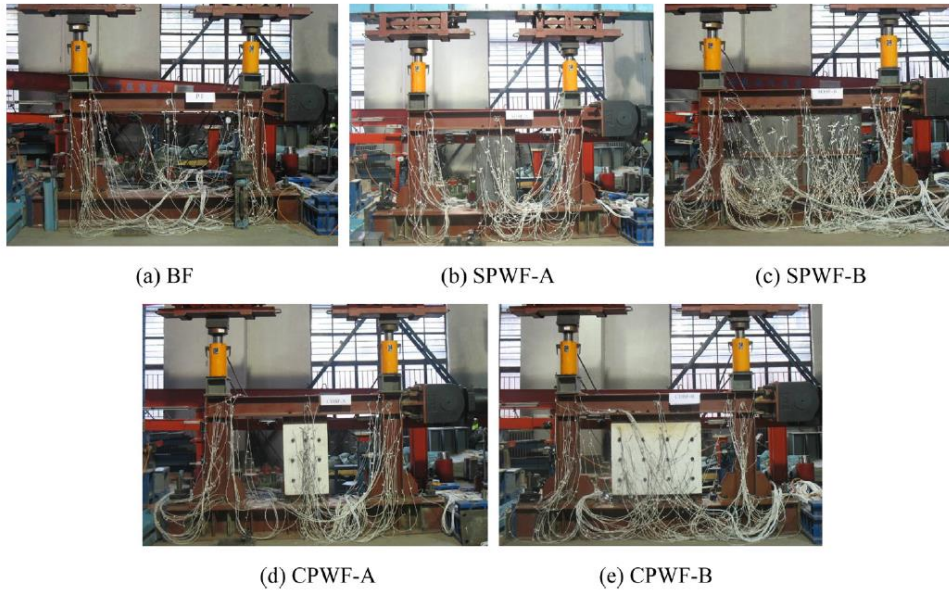


Şekil 1.24 Birinci oluşturulan panel modeller ve tatbik şekilleri (Aksoylu ve Kara 2020)



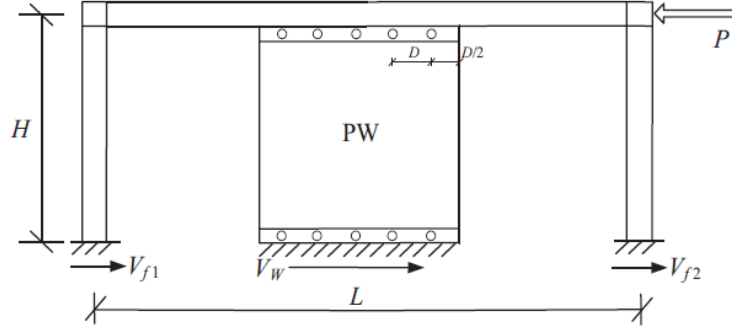
Şekil 1.25 Güçlendirilmiş modeller ve referans çerçevenin deneysel yanal yük kapasiteleri ve yerdeğiştirme diyagramı (Aksoylu ve Kara 2020).

Çelik ve kompozit panel duvarların güçlendirilmiş çelik çerçevelerin deneysel sismik performansı incelenmiştir (Jiang vd. 2017). Ayrıntılı deneysel araştırma tek açıklıklı ve tek katlı beş adet 1/3 ölçekli deney elemanları ile yürütüldü. Yenilme modları, yük taşıma kapasitesi, histerik davranış, süneklik, enerji yutma (tüketme, sönüm) kapasitesi araştırıldı. Uzunluk / yükseklik oranı, takviyeler ve duvar tiplerinin sismik davranış üzerindeki etkileri de ayrıca araştırılmıştır. Deney sonuçları, numunelerin % 4 ila yaklaşık % 5 kat kaymasını tolere ettiğini, çelik ve kompozit çelik panel duvarın çelik çerçevenin sismik performansını geliştirdiğini göstermektedir. Uzunluk / yükseklik oranı, yük taşıma kapasitesi, süneklik ve rijitlik üzerinde büyük etkiye sahiptir. Ek olarak, sonlu elemanlar modelleri çelik panel duvarları ve kompozit panel duvarların doğrusal olmayan davranışlarını simüle etmek için oluşturulmuş ve sonuçlar deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Ayrıca, formüller test numunelerinin başlangıçtaki yanıl rijitlik ve kesme dayanımını tahmin etmek için geliştirilmiştir ve bu teorik tahminler deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Beş adet tek açıklıklı, tek katlı, 1/3 ölçekli panel duvar güçlendirilmiş 1.8 m genişliğinde ve 1.0 m yüksekliğinde çelik çerçeveler deney programında test edilmiştir. Şekil 1.26’da test numuneleri görülmektedir.

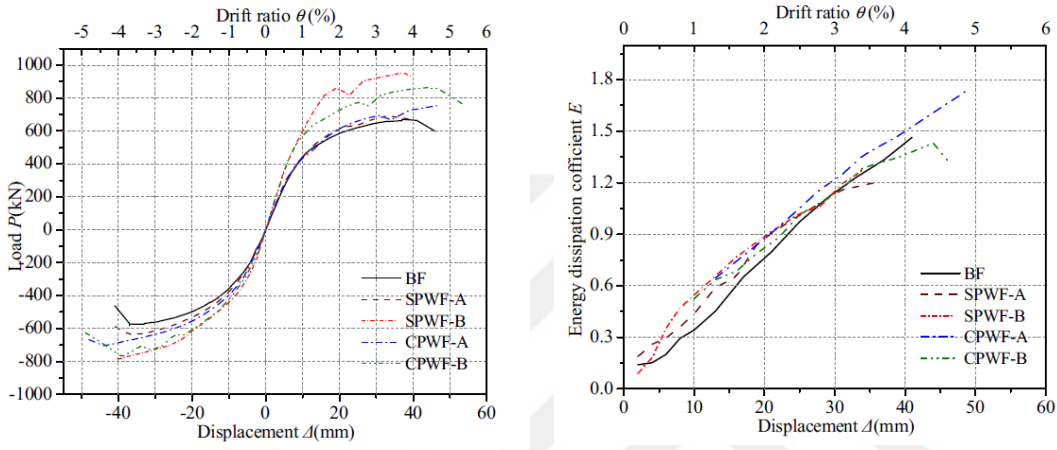


**Şekil 1.26** Deney test numuneleri boş çerçeve, çelik panel (SPW) ve kompozit panel (CPWF) (Jiang vd. 2017).

Çelik ve kompozit çelik panel duvar takviyeli çerçevelerin sismik performansını araştırmak, 1/3 oranlı beş deney numunesi ve döngüsel yükler altında test edilmiştir. Numunelerin nihai yükleme kapasitesini tahmin etmek için teorik ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır.



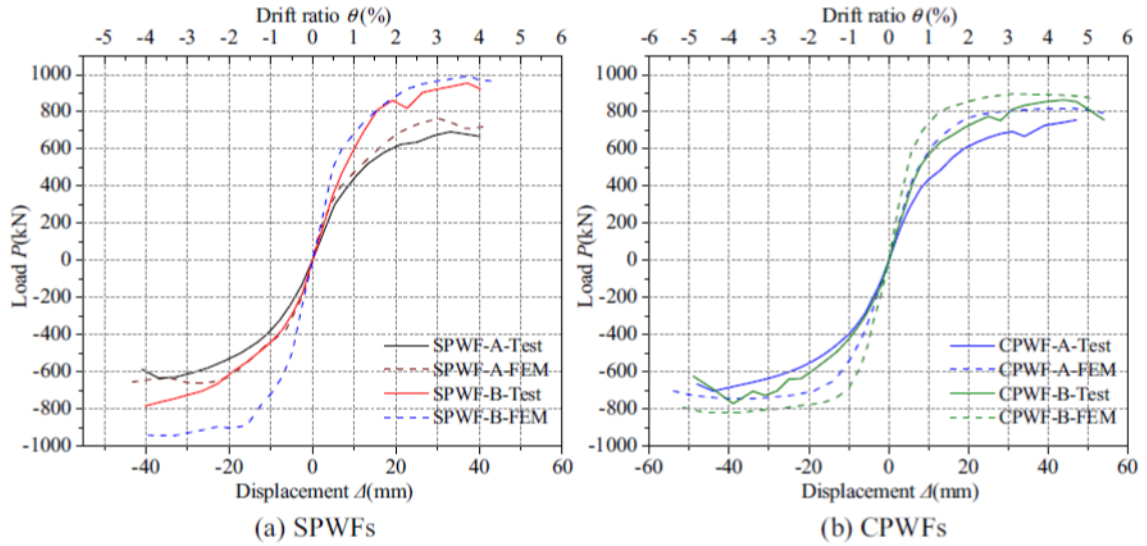
Şekil 1.27 Paneller için uygulanan yük durumu (Jiang vd. 2017).



a) Yanal yük-yerdeğiştirme

b) Enerji tüketme-yerdeğiştirme

Şekil 1.28 Yanal yükleme ve yerdeğiştirme ile enerji tüketme grafikleri (Jiang vd. 2017).



(a) SPWFs

(b) CPWFs

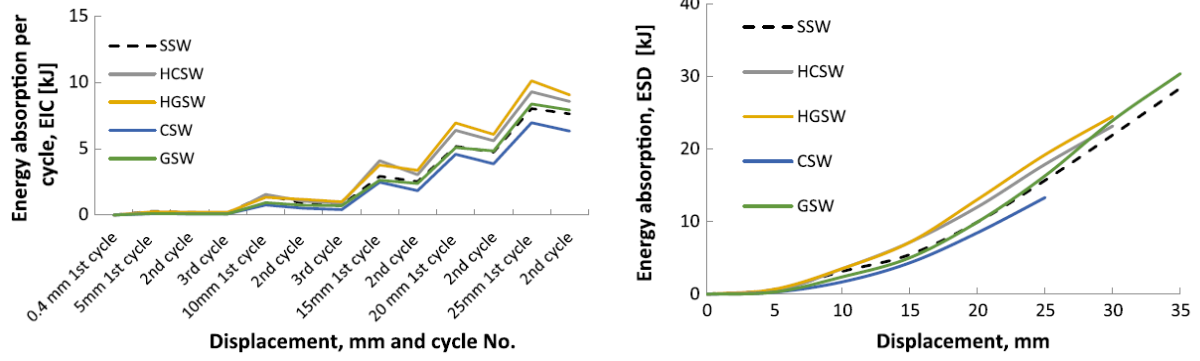
Şekil 1.29 Yükleme ve yerdeğiştirme deneysel ve sonlu eleman analiz sonuçları (Jiang vd. 2017).

Çelik panel ve kompozit panel duvar etkili bir şekilde çelik çerçevenin başlangıç rijitliğini, enerji tüketme kapasitesini, sünekliği ve yük kapasitesini artırabilir. Hem SPWF hem de CPWF iyi süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesine sahiptir. CPWF sistemi için betonarme panel, çelik levhanın genel olarak burkulmasını önleyerek kompozit hareketi sağlayabildi. Betonarme panellerin veya takviyelerin kısıtlanması ile, çelik panel duvarının nihai yükü büyük ölçüde artırılabilir, çünkü bu kısıtlamalar numuneler için etkili çekme gerilme alanını arttırmıştır. Kısıtlamalar deney numunelerinin yanal elastik rijitliğinde çok az artış göstermiştir. Numunelerin uzunluk / yükseklik oranı, panel duvarların nihai yük taşıma kapasitesi, sünekliği ve yanal elastik rijitliği üzerinde büyük bir etki göstermiştir. SPWF-B'nin nihai yük taşıma kapasitesi (uzunluk SPW yükseklik oranı 1.33 idi)% 37.7 daha yüksek iken SPWF-A (0.5); CPWF-B'nin (1.0) bu değeri CPWF-A'dan (0.5) 14.3 daha büyüktür. SPWF-B ve CPWF-B yanal elastik rijitlikleri, sırasıyla SPWF-A ve CPWF-A % 52.6 ve% 27.6 daha büyüktür.

Çelik panel duvarla güçlendirilmiş çerçeve daha fazla yük taşıma kapasitesine sahipken, kompozit panel duvarlı çerçeveler sünmesi ile daha fazla yerdeğiştirme yapabilmektedir. Çelik ve kompozit panel duvarların sonlu eleman modelleri ile deneysel analiz sonuçları arasındaki uyumluluğun gözlenmesi yanı sıra sonlu eleman modellerinden elde edilen yük taşıma kapasitelerinin daha yüksek olduğu da görülmektedir.

Çelik, FRP ve hibrit (kompozit ile çeliğin birleşimi) duvarların çevrimsel sismik yük altında davranışının rijitlik ve enerji sönümlenme açısından karşılaştırılması incelenmiştir (Petkune vd. 2018). Çelik perde duvarlar (SSW) gibi hafif yanal yüke dayanıklı sistemlerin kullanılması özellikle çok katlı binalar için faydalıdır. Lif takviyeli fiber polimer (FRP) malzemeler ile bu tür çerçeve elemanların daha da geliştirilmesi nihai yük kapasitelerinin, rijitliklerinin ve enerji sönümlenmelerinin artmasına katkı sağlar. Sunulan araştırmanın amacı, panel tasarımına FRP dahil edilerek modifiye SSW'nin davranışını karşılaştırmaktır. Üretilen ve test edilen panel duvar örnekleri üç farklı tiptedir: çelik dolgu panel (kontrol), FRP dolgu panel ve hibrit çelik / FRP dolgu panel. Tüm örnekler ATC-24 protokolünde tanımlandığı gibi yarı statik döngüsel sismik yükleme altında yüklenmiştir. En yüksek yük kapasitesi ve en düşük rijitlik kaybı FRP kompozit dolgu panelinden elde edilirken bunu takiben hibrit (karbon FRP / çelik ve cam FRP / çelik) paneli gelir. En yüksek kümülatif enerji sönümlenme araştırmanın büyük kısmında hibrit numunelerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar FRP ve hibrit dolgu panellerine sahip yenilikçi perde duvarların mükemmel yük taşıma kapasitesi ve enerji sönümlenmesi, nispeten





**Şekil 1.32** a) Enerji sönümlenme ve her bir yerdeğiştirme yüklemesi için panel türlerinin performansı; b) Enerji sönümlenme ve yer değiştirme karşılaştırılması (Petkune vd. 2018).

Oluşturulan panel duvar sistemlerinin nihai yük kapasitesi, deforme olabilirlik, dinamik rijitlikte değişim ve enerji sönümlenme çelik çerçevesi ve çeşitli malzeme türleri ile ince dolgu paneller incelenmiştir. Saf GFRP dolgu paneline (GWS) sahip numune, en yüksek yük kapasitesine, nispeten yüksek seviyede enerji sönümlenmesine ve en düşük dinamik rijitlik azalmasına ulaştı. Hibrit karbon ve cam yünü kesme panellerinde 30 mm yükleme altında önemli derecede farkla daha iyi sonuçlara ulaşıldı. En yüksek enerji sönümlenmesi, diğer örneklerle karşılaştırıldığında hibrit cam yünü FRP (HGSW) numunesinden elde edilmiştir. Çelik dolgu panelleri için korozyona karşı koruma potansiyelinden dolayı, hibrit numuneleri gelecekteki uygulamalar için daha da cazip bir seçenek haline getirir. FRP kompozit ve hibrit ince dolgu panelleri mükemmel yük taşıma kapasitesi, enerji sönümlenme, rijitlik kaybına dayanıklılık, duraylılık potansiyelinde artış ve çelik panel duvar sistemleri ile karşılaştırıldığında ağırlıkta önemli ölçüde azalma görülmüştür.

### 1.3 DEPREM VE BETONARME YAPI YÖNETMELİKLERİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Ülkemizde geçmişten günümüze deprem ve betonarme yapılar hakkında kullanılan yönetmelikler sayısı ile 10 ve 7 defa değişmiştir. Kullanılan yönetmelikler aşağıda verilmektedir. Bu değişiklikler içerisinde yapı emniyetini ciddi oranda etkileyen faktörler bulunmaktadır. Ülkemizde geçmişten günümüze kullanılan deprem ve betonarme yapılar hakkında yönetmelikleri aşağıdaki listelerde kronolojik olarak sıralanmıştır.

## **Türkiye’de Kullanılan Deprem yönetmelikleri:**

- 1940 - Zelzele Mıntıklarında Yapılacak İnşaata ait İtalyan Yapı Talimatnamesi (Pampal ve Özmen, 2007)
- 1944 - Zelzele Mıntıklarında Muvakkat Yapı Talimatnamesi (Pampal ve Özmen, 2007)
- 1949 - Türkiye Yersarsıntısı Bölgeleri Yapı Yönetmeliği (Pampal ve Özmen, 2007)
- 1953 - Yersarsıntısı Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (Pampal ve Özmen, 2007)
- 1961 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (T.C. Resmi Gazete, 1961)
- 1968 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (T.C. Resmi Gazete, 1968)
- 1975 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (T.C. Resmi Gazete, 1975)
- 1998 - Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (T.C. Resmi Gazete, 1997)
- 2007 - Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (T.C. Resmi Gazete, 2007)
- 2018 - Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (T.C. Resmi Gazete, 2018)

## **Türkiye’de Kullanılan Betonarme Yapı yönetmelikleri:**

- 1953: Betonarme şartnamesi, Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti
- 1962: Betonarme şartnamesi, Türkiye Köprü ve İnşaat Cemiyeti
- 1969: TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (elastik yöntem)
- 1975: TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (elastik yöntem)
- 1981: TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (elastik yöntem ve taşıma gücü)
- 1984: TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları (elastik yöntem ve taşıma gücü)
- 2000: TS500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, (sadece taşıma gücü. Değişiklik: 6.2.2001, Değişiklik: 19.4.2002)

Bu değişimler içerisinde kullanılan kolon-kiriş kesit boyutları, malzeme mekanik özellikleri ve hesap yöntemleri gibi bir çok konuda radikal değişimler ve iyileştirme yapılmıştır. Elastik yöntem (Emniyet gerilmeleri yöntemi) de Hooke Kanunu geçerlidir, Taşıma Gücü Yönteminde Hooke Kanunu geçersizdir. Taşıma gücü yöntemine göre beton maksimum gerilme altında kırılmaz, beton maksimum birim kısalmaya ( $\epsilon_{cu}$ ;  $\epsilon_{cu} \approx 0.003$ ) ulaşınca kırılır. Elastik yöntemde çelik malzeme modeli için Hooke geçerli iken çelik akmamış ise Hooke kanunu geçerlidir.

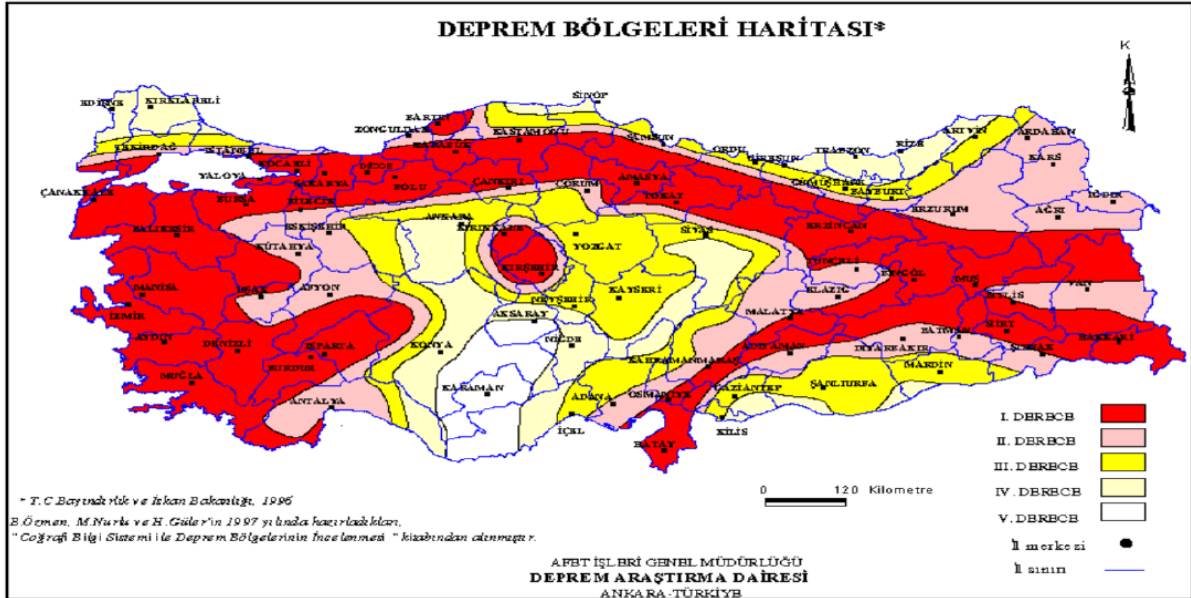
Dünyada 1886-1970 yıllarıda Elastik yöntem (Emniyet gerilmeleri metodu) kullanılırken ülkemizde 2000 yılına dek kullanılmıştır (Topcu 2017). Betonarme yapılar yönetmeliğinde bu metod 2000 yılından itibaren kullanılmamıştır. Taşıma gücü metodu ise dünyada 1970 yılından itibaren uygulanmaya başlanmıştır. Ülkemizde taşıma gücü yöntemi ilk defa TS500-1981 yönetmeliğine dahil edilmiştir ve 2000 yılına kadar elastik yöntemle birlikte kullanılırken 2000 yılından itibaren tamamen taşıma gücü yöntemi kullanılmaktadır.

1981 yılında izin verilen en küçük kolon kesit boyutları 25x30 cm, kiriş uzunluğa bağlı olarak 5 metreden büyük açıklıklar için 25x50 cm olarak verilmiştir. Bu ölçülerin yanı sıra kolon kiriş birleşim bölgesi dediğimiz plastik mafsallaşmanın ilk oluşacağı bölgelerde etriye sıklaştırması yapılmamıştı ayrıca kullanılacak donatıların nervürlü olması da kenetlenme problemlerine ayrıca yol açmaktadır. Güçlü kiriş zayıf kolon gibi zayıf betonarme çerçeve sistemlerinin oluşması bu sebeple kaçınılmaz olmuştur. Ülkemizde ve özellikle istanbul gibi devasa şehirlerimizde ki yapı stoğunun büyük bir kısmı bu 1981 TS500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları'na göre inşa edildiğinden dolayı mevcut yapıların depreme karşı ne derece zayıf olduğu görülmektedir.

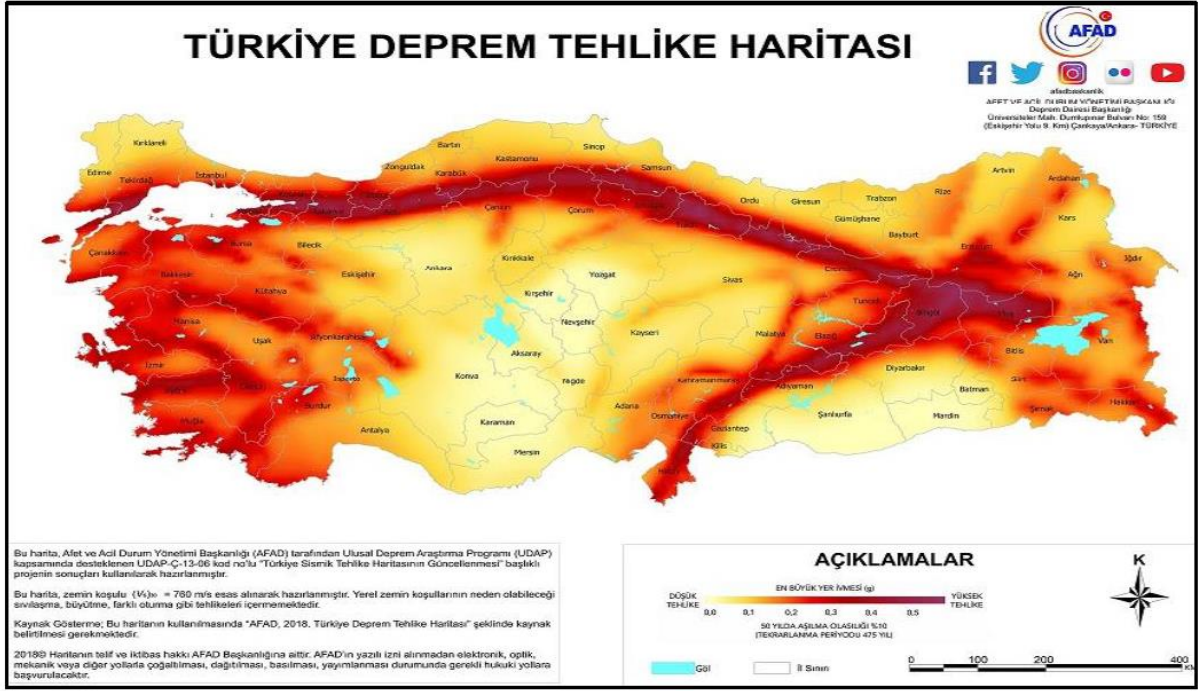
	C14	C16-18	C20	C25	C30 ve üstü
1996	37.5	52.5	6.4	3.4	0.6
1997	27.0	51.1	12.0	7.6	2.3
1998	24.4	45.4	18.0	8.1	4.1
1999	22.7	35.9	27.6	10.3	3.3
2000	11.5	25.1	41.3	13.2	4.9
2001	7.0	21.3	47.9	18.0	5.8
2002	5.9	21.1	46.9	19.2	6.9
2003	4.6	14.7	39.6	25.4	15.7
2004	3.3	10.3	40.6	30.7	15.1
2005	3.2	8.4	31.2	42.1	15.1
2006	2.9	7.7	35.1	36.6	17.8
2007	2.9	5.6	27.0	35.3	29.4
2008	2.8	5.5	22.1	38.8	30.8
2009	2.4	3.4	23.9	36.1	34.1
2010	2.0	2.4	14.6	38.5	39.3
2011	2.2	2.0	14.6	43.7	37.1
2012	1.6	2.2	14.2	43.1	38.4
2013	1.3	1.7	10.3	44.2	42.5

Şekil 1.33 Yıllara göre kullanılan beton dayanım sınıfları yüzdelik dağılımı (Topcu 2017).

1996 senesinde kullanılan betonun yaklaşık %96 sı C14-C20 arasında iken 2013 senesinde C14-C20 tüketimi %13.3 civarına kadar düşmüştür (Topcu 2017). Kullanılan düşük dayanımlı beton sınıfının günümüzde İstanbul'da yapılarda ortalama 8 Mpa civarında olduğu yapılan incelemelerden elde edilmiştir. Kullanılan nervürlü donatı ve yapıların bir kısmının etriyesiz olması da düşünüldüğü zaman depreme karşı güçlendirmenin ne kadar elzem olduğunu gözler önüne sermektedir. Bu bağlamda, yapılacak sonlu eleman analizlerinde modellenecek betonarme çerçevelerin belirtilen düzensizlikleri ve kusurları içermesi ve malzeme dayanım özelliklerinin de mevcut durumu yansıtacak şekilde analize dahil edilmelidir. TBDY18 ile birlikte 1940 yılından günümüze kadar referans alınan deprem bölgeleri haritası tamamen değiştirilerek, tasarlanacak deprem yer hareketi düzeyine bağlı olarak deprem tehlike haritaları Şekil 1.34 ve 1.35 oluşturulmuştur (Aral ve Tunç 2021).



**Şekil 1.34** Türkiye deprem bölgeleri detayı (T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü 1996)



**Şekil 1.35** 2018 deprem yönetmeliğinde mevcut olan 50 yılda aşılma ihtimali %10 olan depremler için hazırlanmış Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD 2018).



## BÖLÜM 2

### MALZEME MODELLERİ VE METOTLARI

#### 2.1 BETON MALZEME MODELLERİ

Beton farklı bileşenlerin bir araya gelmesiyle üretilen kompozit bir yapıya sahiptir. Beton yapısının homojen olmaması sabit bir gerilme birim deformasyon diyagramı sunmayı olanaksız hale getirmektedir. Ancak eksenel yük altında yapılan araştırmalar sonucunda gerilme birim deformasyon grafiklerini idealleştirerek matematiksel denklemlere dönüştürülmüştür. Beton için birçok nonliner (doğrusal olmayan davranış) malzeme modeli deneysel ve nümerik analizler ile geliştirilmiş ve kullanılmıştır (Akkaya 2014). Betonarmede yaygın olarak kullanılan nonliner malzeme yenilme modellerin sınıflandıracak olursak:

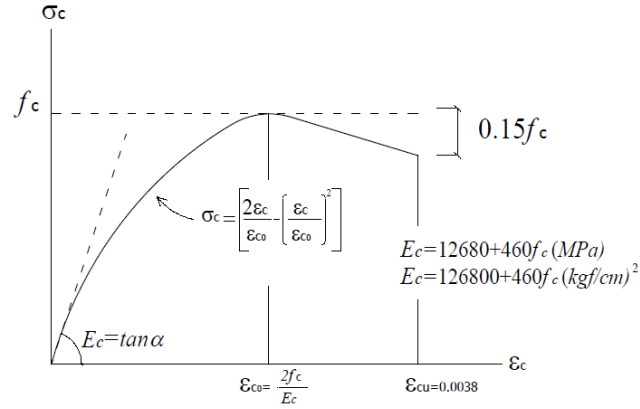
Beton Modelleri

- 1- Sargısız Beton Modeli
- 2- Sargılı Beton Modeli

##### 2.1.1 Sargısız ve Sargılı Beton Modelleri

###### 2.1.1.1 Hognestad Beton Modeli

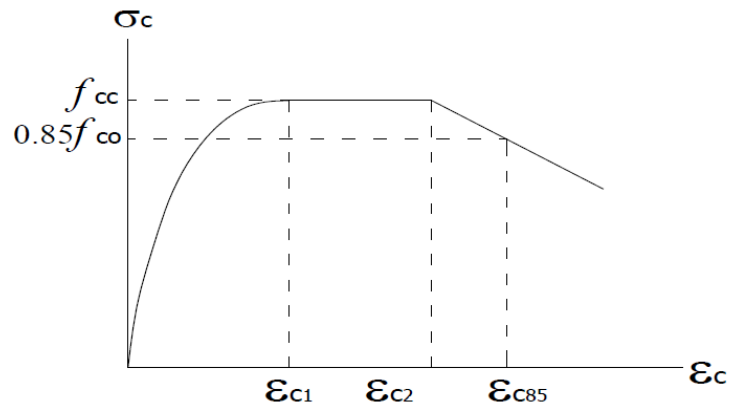
Bu beton modelinde beton sargısız olarak dikkate alınmış ve oluşturulmuş nonlineer (doğrusal olmayan) beton modelidir. Hognestad modelinde oluşturulan gerilme-deformasyon ilişkisinde, dayanım en büyük değere ulaşana dek 2. dereceden parabol ile ifade edilmekte, en büyük dayanımdan sonraki bölümde ise liner olduğu ifade edilmektedir. En büyük gerilmeyi karşılayan deformasyon değeri, beton dayanımından ilişkisiz 0.002 civarındadır (Doğangün, 2007). Şekil 2.1’de Hognestad beton modeli verilmektedir. Betonda kırılmanın gerçekleştiği andaki gerilme  $0.85f_c$  ve birim deformasyon ise 0.0038 değerindedir.



Şekil 2.1 Hognestad beton modeli (Ersoy ve Özcebe 2012, Akkaya 2014).

### 2.1.1.2 Sheikh Ve Üzümeri Beton Modeli

Bu model Sheikh ve Üzümeri tarafından betonun sargılı olması dikkate alınarak önerilen bir nonlineer (doğrusal olmayan) beton modelidir. Sheikh ve Üzümeri modelinde beton kesitlerde sargı etkisiyle dayanımın arttığı varsayılmaktadır. Gerilmenin maksimuma ulaşmaya kadar olan kısım 2. dereceden parabol olarak idealleştirilmiş, gerilme değeri en büyük değere eriştikten sonra sabit gerilme altında deformasyonun arttığı kabul edilmiş ve eğrinin iniş kısmı da lineer olduğu ifade edilmiştir. Sheikh ve Üzümeri modele ait gerilme-deformasyon ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrileri ve formülasyonlar aşağıda şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2 Sheikh ve Üzümeri sargılı beton nonlineer modeli (Ersoy ve Özcebe, 1998 Akkaya 2014)

$$\epsilon_{c1} = 8K_0 f_c 10^{-6} \quad (2.1)$$

$$f_{cc} = K_0 f_c \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{c0} \left[ 1 + \frac{7.8}{a} \left( 1 - 5 \left( \frac{s}{b_k} \right)^2 \right) \frac{\rho_s f_{yw}}{\sqrt{f_c}} \right] \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_{c85} = 0.225 \rho_s \sqrt{\frac{b_k}{s}} + \varepsilon_{c2} \quad (2.4)$$

$$K_0 = 1 + 23 \frac{b_k^2}{N_{oc}} \left[ \left( 1 - \frac{na^2}{5.5b_k^2} \right) \left( 1 - \frac{s}{2b_k} \right)^2 \right] \sqrt{\rho_s f_{yw}} \quad (2.5)$$

$a$  : İki boyuna komşu donatı arasındaki uzunluk.

$n$  : Kolondaki boyuna donatı sayısı.

$\rho_s$ : Sargı donatısının hacimsel oranı

$A_{ck}$  : Sarılmış beton kesit alanı

$A_{st}$  : Kolon kesitindeki toplam boyuna donatı oranı.

$b_k$  : Çekirdek beton küçük boyutu.(Sargı donatısının merkezinden merkezine olan mesafe)

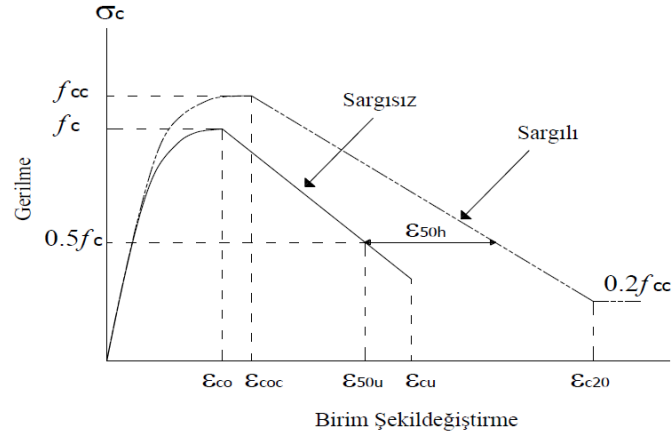
$f_c$  : Sargısız betonun basınç dayanımı

$f_{cc}$  : Sargılı betonun basınç dayanımı

$f_{yw}$  : Sargı donatısının akma dayanımı (Ersoy ve Özcebe, 1998)

### 2.1.1.3 Geliştirilmiş Kent Ve Park Sargılı ve Sargısız Beton Modeli

Geliştirilmiş Kent ve Park sargılı beton modelinde beton dayanımının ve deformasyonun sargıdan dolayı arttığı kabul edilmektedir. Beton modelleri için idealleştirilen eğriler maksimum gerilme anına denk 2. derece parabol olarak devam etmektedir. Maksimum gerilme noktasından sonra ise sargılı ve sargısız modellerde beton dayanımında azalmalar doğrusal olarak kabul edilmektedir. Sargısız betona ait azalma eğrisi sargılı betona kıyasla daha büyüktür. Sargısız betonda en büyük kısalma sınırı  $\varepsilon_{cu}$  iken, sargılı beton dayanımın kısalmasında böyle bir sınır yoktur.



**Şekil 2.3** Geliştirilmiş Kent ve Park sargısız ve sargılı doğrusal olmayan beton modeli (Ersoy ve Özcebe 2012, Akkaya 2014).

### Parabolik eğri için formülasyonlar:

Sargılı Beton

$$\sigma_c = f_{cc} \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0c}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0c}} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

$$f_{cc} = K f_c \quad (2.7)$$

$$\varepsilon_{c0c} = K \varepsilon_{c0} \quad (2.8)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yw} k}{f_c} \quad (2.9)$$

Sargısız Beton

$$\sigma_c = f_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (2.10)$$

### Doğrusal Eğri için formülasyonlar:

Sargılı Beton:

$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\varepsilon_c - \varepsilon_{c0c})] \geq 0.2 f_c \quad (2.11)$$

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{c0c}} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0.75\rho_s \left(\frac{b_k}{s}\right)^{1/2} \quad (2.13)$$

Sargısız Beton:

$$\sigma_c = f_c[1 - Z_u(\varepsilon_c - \varepsilon_{c0})] \quad (2.14)$$

$$Z_u = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} - \varepsilon_{c0}} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3+0.285f_c}{142f_c-1000} \geq \varepsilon_{c0} \quad (2.16)$$

$f_c$  : Sargısız betonun basınç dayanımı

$f_{cc}$  : Sargılı betonun basınç dayanımı

$\varepsilon_{c0}$  : Sargısız betonda maksimum dayanıma denk gelen birim kısalma.

$\varepsilon_{coc}$  : Sargılı betonda maksimum dayanıma karşılık gelen birim kısalma.

$b_k$  : Çekirdek betonun boyutu (Sargı donatısının dış tarafından dış tarafına olan mesafe)

$s$  : Sargı donatısı adım mesafesi

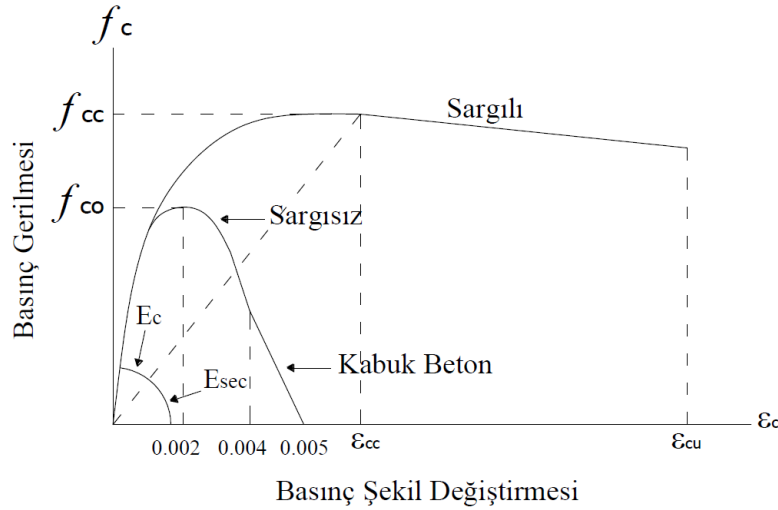
$\rho_s$  : Sargı donatısının hacimsel oranı

$Z_u$  : Sargısız betona ait  $\sigma - \varepsilon$  eğrisinin doğrusal bölümünün eğimi

$Z_c$  : Sargılı betona ait  $\sigma - \varepsilon$  eğrisinin doğrusal bölümünün eğimi (Ersoy ve Özcebe, 2012)

### 2.1.1.4 Mander Sargısız Ve Sargılı Beton Modeli

Mander geliştirdiği beton malzeme modelinde, sargı donatısı etkisiyle betonunun en büyük dayanımı ve buna denk olan birim deformasyonun arttığı kabul edilmektedir.



Şekil 2.4 Mander sargısız ve sargılı beton modeli (Mander 1988, Akkaya 2014).

Mander beton modeli TDY-2007 yönetmeliğinde de aşağıdaki şekliyle sunulmuştur.

#### Sargılı beton kesiti için;

Sargılı beton basınç gerilme değeri  $f_c$ , basınç birim şekil değışirnesi  $\epsilon_c$ 'nin fonksiyonu olarak sunulmaktadır.

$$f_c = \frac{f_{cc} x^r}{r-1+x^r} \quad (2.17)$$

Bu bağıntıdaki sargılı beton dayanımı  $f_{cc}$  ile sargısız beton dayanımı  $f_{co}$  arasındaki ilişki aşağıda sunulmaktadır.

$$f_{cc} = \lambda_c f_{co} \quad (2.18)$$

$$\lambda_c = 2254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_e}{f_{co}}} - 2 \frac{f_e}{f_{co}} - 1.254 \quad (2.19)$$

Buradaki  $f_e$  etkili sargılamannın denk geldiği beton basıncı, dikdörtgen kesitlerde birbirine dik iki doğrultu için aşağıda verilen değerlerin ortalaması olarak alınabilir:

$$f_{ex} = k_e \rho_x f_{yw} \quad (2.20)$$

$$f_{ey} = k_e \rho_y f_{yw} \quad (2.21)$$

Denklemlerde  $f_{yw}$  enine donatının akma dayanımının değeri,  $\rho_x$  ve  $\rho_y$  ilgili doğrultulardaki enine donatıların hacimsel oranlarını,  $k_e$  ise aşağıda ifade edilen sargılama etkinlik katsayısını vermektedir.

$$k_e = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_0h_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2h_0}\right) \left(1 - \frac{A_s}{b_0h_0}\right)^{-1} \quad (2.22)$$

Yukarıda verilen denklemde  $a_i$  kesit çevresindeki düşey donatıların eksenleri arasındaki mesafeyi,  $b_0$  ve  $h_0$  göbek betonunu çevreleyen etriyelerin eksenleri arasında olan kesit ölçülerini,  $s$  düşey doğrultuda etriyelerin eksenleri arasındaki mesafeyi,  $A_s$  ise boyuna donatı alanını ifade etmektedir (DBYBHY 2007, TBDY 2018). Denklem 2.17’de normalize edilmiş beton birim şekildeğiştirmesi  $x$  ile  $r$  değişkenine ilişkin bağıntılar aşağıda sunulmuştur.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0} [1 + 5(\lambda_c - 1)] \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_{c0} \cong 0.002 \quad (2.25)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (2.26)$$

$$E_c \cong 5000 \sqrt{f_c} \text{ [MPa]} \quad (2.27)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (2.28)$$

Sargılı betonda meydana gelebilecek en büyük basınç birim şekildeğiştirmesi  $\epsilon_{cu}$  aşağıda sunulmuştur:

$$\epsilon_{cu} = 0.004 + \frac{1.4\rho_s f_{yw} \epsilon_{su}}{f_{cc}} \quad (2.29)$$

Denklem 2.29'da  $\rho_s$  toplam enine donatının hacimsel oranını (dikdörtgen kesitlerde  $\rho_s = \rho_x + \rho_y$ ),  $\epsilon_{cu}$  enine donatı çeliğinde en büyük gerilme altındaki birim uzama şekildeğiştirmesini ifade etmektedir.

### Sargısız beton kesiti için;

Sargılı beton için 2.20 ve 2.21'denklemlerinde verilen ,  $\epsilon_c = 0.004$ 'e kadar olan bölgede sargısız beton için de geçerlidir. Sargısız betonda etkin sargılama basıncı  $f_e = 0$  ve buna bağlı olarak  $\lambda c = 1$  olacağından  $f_{cc} = f_{c0}$  ve  $\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0}$  alınacaktır.  $\epsilon_c = 0.005$ 'de  $f_c = 0$  olarak tanımlanır.  $0.004 < \epsilon_c \leq 0.005$  aralığında gerilme şekildeğiştirme ilişkisi doğrusaldır.

## 2.2 ÇELİK MALZEME MODELLERİ

### 2.2.1 Donatı Çeliği Malzeme Modelleri

Donatı çeliği malzeme modeli için doğrusal olmayan yöntemler ile gerilme-şekildeğiştirme bağıntıları aşağıda ki denklemlerle (TBDY 2018) sunulmuştur.

$$f_s = E_s \epsilon_s \quad (\epsilon_s \leq \epsilon_{sy}) \quad (2.30)$$

$$f_s = f_{sy} \quad (\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh}) \quad (2.31)$$

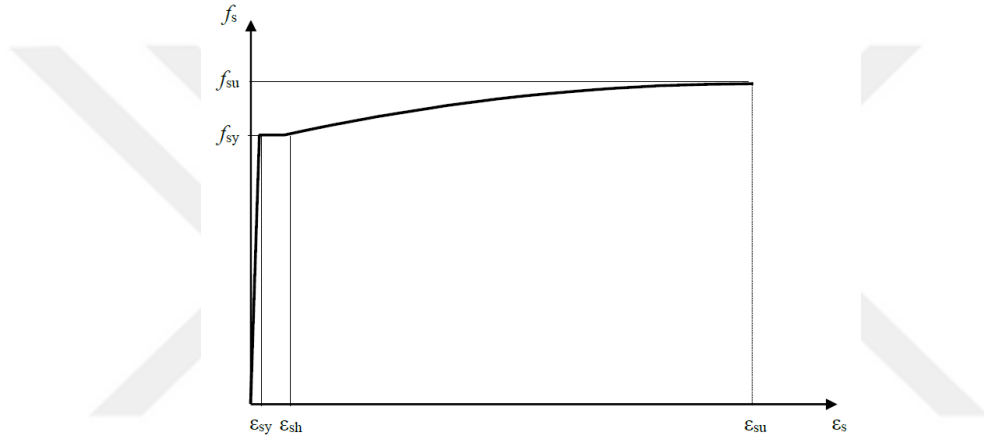
$$f_s = f_{su} - (f_{su} - f_{sy}) \frac{(\epsilon_{su} - \epsilon_s)^2}{(\epsilon_{su} - \epsilon_{sh})^2} \quad (2.32)$$

Betonarmede kullanılan donatının elastiklik modülüs değerı  $E_s = 2 \times 10^5$  MPa'dır. Donatı çeliklerine ait diğer bilgiler Çizelge 2.1'de sunulmaktadır:

**Çizelge 2.1** Donatı Çeliklerine Ait Bilgiler (TBDY 2018)

Kalite	$f_{sy}$ (MPa)	$\epsilon_{sy}$	$\epsilon_{sh}$	$\epsilon_{su}$	$f_{su}/f_{sy}$
S220	220	0.0011	0.011	0.12	1.20
S420	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 – 1.35
B420C	420	0.0021	0.008	0.08	1.15 – 1.35
B500C	500	0.0025	0.008	0.08	1.15 – 1.35

Donatı çeliği malzeme modeli için doğrusal olmayan yöntemler ile gerilme-şekildeğiştirme grafiği Şekil 2.5’de sunulmuştur (TBDY 2018).



**Şekil 2.5** Donatı çeliği malzeme modeli için doğrusal olmayan yöntemler ile gerilme-şekildeğiştirme (TBDY 2018).



## BÖLÜM 3

### SAYISAL ÖN ÇALIŞMA MODELLERİ

#### 3.1 SAP2000'DE OLUŞTURULAN BETONARME ÇERÇEVE SONLU ELEMAN MODELLERİ

##### 3.1.1 Pultrude GFRP Kutu Profil İle Güçlendirilmiş Betonarme Çerçevenin Statik İtme (Pushover) Analizi ile Yanal Yük Performansı

Betonarme yapıların güçlendirilmesi konusunda birçok farklı teknik uygulanmış ve bu konuda yenilikçi çalışmalar devam etmektedir. Mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde eleman veya sistem bazında güçlendirmeler yapılabilmektedir. Kolon mantolama ve lifli polimer uygulamaları, eleman seviyesindeki güçlendirme yöntemleri arasında sıralanabilir. Sistemsel güçlendirme teknikleri içerisinde kesme duvar ilavesi, lifli polimerli dolgu duvar güçlendirilmesi ve çelik çapraz uygulamalarını sıralayabiliriz. Bunlara ek olarak son zamanlarda özellikle pultrüzyon yöntemiyle üretilen levhalar, dolu ve kutu kesitli kompozit profiller ile donatılar uygulanmaya başlanmıştır. Literatürde farklı tip ve yöntemlerle GFRP kompozit elemanlar ile çalışmalar yapılmıştır. Bunlara örnek olarak, çevrimsel tersinir (cyclic) yük testleri altında betonarme kiriş-kolon birleşimleri deneysel olarak incelenmiştir (Chalioris vd. 2008). Betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizlerine odaklanılmıştır (Hu vd. 2004). Fiber takviyeli plastiklerle güçlendirilmiş dikdörtgen betonarme kirişlerin nihai yükleme kapasitesini belirlemeye çalışmışlardır. Betonarme çerçevesel binaların sünekliliğinin geliştirmesi araştırılmıştır (Cruz vd. 2021). Farklı olarak yapıya zarar vermeyen (non-invaziv) güçlendirme tekniklerine başvurmuşlardır. Kolonlarda, çelik ceketler ve FRP sargılar kullanılırken, betonarme kirişlerde plakalar ve tekli çelik çaprazlar uygulanmıştır. Burkulma önleyici çaprazlarla güçlendirilen mevcut bir betonarme yapının deprem performansı incelenmiştir (Castaldo vd. 2021). Dışardan harici olarak yapıştırılmış FRP'lerle güçlendirilen betonarme binalar üzerinde çalışılmıştır (Mahdaviipur vd. 2020). Yapısal parametrelerdeki varyasyonun ve farklı güçlendirme tipleri kullanımının çerçevenin yenilme ve hasar modu

üzerinde ciddi etkileri olduğu bulunmuştur. FRP-sarma ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve yapıları araştırılmıştır (Ferracuti ve diğ 2020). Hibrit FRP levhaları ile güçlendirilen dikkörtgen betonarme kolonların tekrarlanır yük altında (cyclic) tepkisi araştırılmıştır (Shin ve Kim 2020). FRP kompozitler ile betonarme kirişlerin kesme açısından güçlendirilmesi incelenmiştir (Kareem 2014). Betonarme çerçeveler için güçlendirme teknikleri araştırılmıştır (Erdem ve diğ 2006). Çalışmada yanal dayanımın yaklaşık %500 arttığını ve güçlendirilmiş çerçevelerin rijitliğinin yalın çerçevenin en az on katı olduğunu elde edilmiştir. V tipi diyagonallerle (chevron) güçlendirilmiş bir betonarme çerçevesinin statik (pseudo) dinamik testine odaklanılmıştır (Özçelik vd. 2012). Yüksek enerji sönümlenmeli çelik bağlantı elemanları ile güçlendirilmiş betonarme çerçeveler incelenmiştir (Karalis ve Stylianidis 2013). Çelik çaprazlı dikey bağlantılar ile betonarme çerçevelerin güçlendirilmesi araştırılmıştır (İnce vd. 2015).

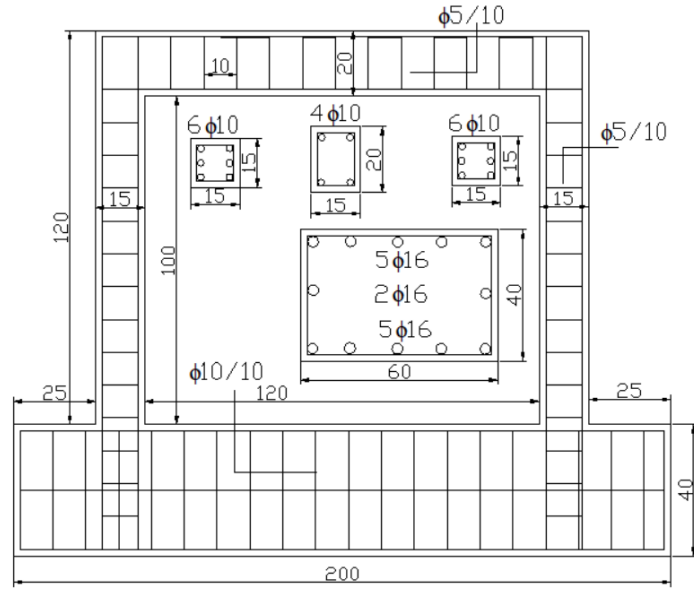
Tez çalışmasının bu kısmında, referans çerçeve olarak çelik çaprazlarla (chevron) güçlendirilmiş tek katlı -tek açıklıklı bir betonarme çerçeve seçilmiş ve kırılmaya kadar yanal olarak yüklenmiştir. İlk adımda, deneysel olarak elde edilen statik yanal yük-yerdeğiştirme eğrisi, doğrusal olmayan sonlu elemanlar (FE) analizi ile doğrulanmıştır. Seçilen cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) malzemelerin tek eksenli çekme özellikleri, literatürde bulunan sonuçlarla FE analizi kullanılarak doğrulanmıştır. İkinci aşamada, farklı eksenel rijitliklere sahip üç farklı GFRP kutu çapraz incelenmiş ve sonuçlar çelik (chevron) çaprazlarla karşılaştırılmıştır.

Son olarak, bir betonarme moment çerçevesinde GFRP kutu çaprazlarının yanal yük performansı ve beklenen burkulma yenilmesi bu çalışmada sunulmuş ve tartışılmıştır. GFRP kesitlerinin hafifliği göz önüne alındığında, GFRP çaprazlı betonarme çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesi çelik çaprazlarla güçlendirmiş kadar artırdı ve çelik çapraza eşit eksenel rijitlikteki GFRP çapraz tatbik edildiğinde maksimum artış yaklaşık %47 daha fazla olmuştur.

### **3.1.1.1 Betonarme Çerçeve Sonlu Eleman Modelleri**

Nümerik olarak SAP2000'de oluşturulan betonarme çerçeve sistemlerin doğru sonuçlar verdiğini göstermek ve güçlendirmede kullanılan çelik profillerin yerine kutu kesit GFRP kompozitlerin kullanılması durumunu incelemek için literatürde daha önce deneyi yapılan bir referans betonarme çerçeve model seçilerek (İnce vd. 2015), deneysel ve nümerik analiz sonuçlarının örtüşmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda deneysel olarak imal edilip yanal yük

taşıma kapasitesi analiz edilen bir yalın (güçlendirilmemiş) betonarme çerçeve referans olarak kabul edilmiştir. Betonarme çerçeve sonlu eleman modeli bütün malzeme mekanik özellikleri ve kesit geometri özellikleri laboratuvar ortamında imal edilmiş olan betonarme çerçeve ile bire bir aynı olacak şekilde bilgisayar programı ile modellenmiştir. Şekil 3.1’de imal edilen betonarme çerçeve modelin donatı detayları ve geometrik kesit detayları verilmektedir.



**Şekil 3.1** Referans betonarme çerçeve modelin donatı ve geometrik kesit detayları (Ulger vd. 2022)

Oluşturulan betonarme çerçevede 2 cm pas payı bırakılmıştır. Kolonlar 15x15 cm kesitlerinde imal edilmiş olup 6 adet φ10 boyuna donatı kullanılırken φ5’lik etriyeler her 10cm’de bir olacak şekilde tasarlanmıştır. Kiriş 20x15 cm kesite sahipken 4 adet φ10 boyuna donatı ve 10 cm aralıklar ile φ5 etriyeler ile sarılmıştır. İmal edilen temel detayı ise 60x40 cm kesite sahiptir. Temel içerisinde alt kısımda 5 adet φ16, orta kısımda 2 adet φ16 ve üst kısımda 5 adete φ16 boyuna donatı kullanılmıştır. Temel kısmında φ10’luk etriyeler 10 cm aralıklarla yerleştirilmiştir. Şekil 3.2’de laboratuvar ortamında imal edilmiş olan betonarme çerçeve modeli verilmektedir.



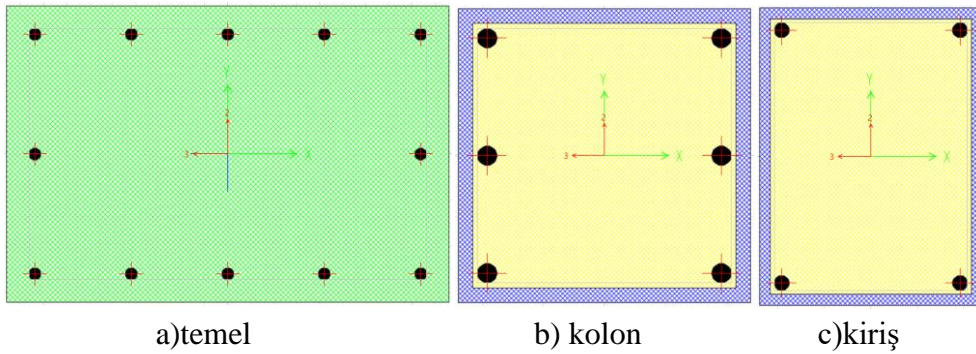
Şekil 3.2 Referans olarak seçilmiş betonarme çerçeve model.



a) Önden görünüş

b) 3 boyutlu görünüş

Şekil 3.3 Referans betonarme çerçeve nümerik model.



a) temel

b) kolon

c) kiriş

Şekil 3.4 Referans betonarme çerçeve temel (a), kolon (b), kiriş (c) detayları.

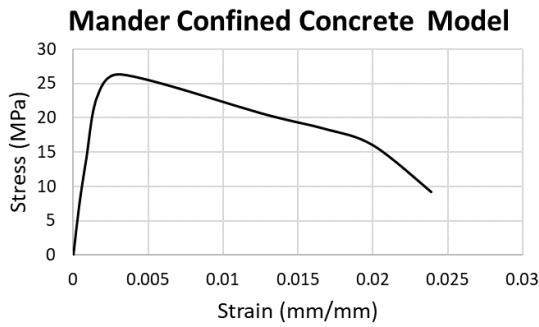
### 3.1.1.2 Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri

Ince ve diğ. (2015) deneysel çalışmada kullandıkları donatı S420 iken beton küp numunelerinin beton basınç dayanımlarından elde ettikleri sonuç değerleri aşağıda Çizelge 3.1’de verilmektedir:

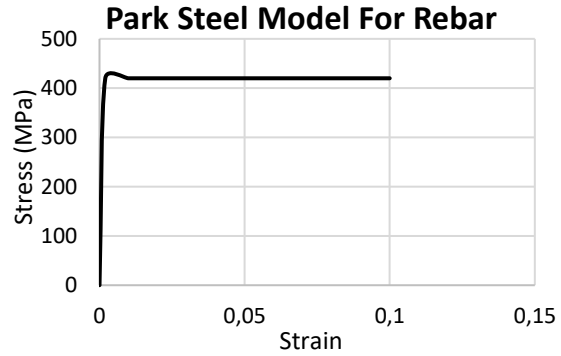
**Çizelge 3.1** Beton Küp Numune Basınç dayanım sonuçları (Ince vd. 2015)

Numune	Küp Basınç Dayanımı (MPa)
1	33.28
2	31.38
3	31.15

Elde edilen beton küp numune basınç dayanım sonuçlarının ortalaması 31.94 KN, silindir numune dayanımına çevrildiğinde 25.55 KN’luk bir basınç dayanımına denk geldiği görülmektedir. Yapılan nümerik modellerde bu değerler baz alınmıştır. . Analizlerde betonun doğrusal olmayan davranışını tanımlamak için Mander modeli kullanılmıştır. Betonun sargılı ve sargısız kısımları için kullanılan stress-strain diyagramları şekil 3.5a’da verilmektedir. Ayrıca donatının doğrusal olmayan davranışını tanımlaması için ise Park Çelik modeli kullanılmıştır ve şekil 3.5b’de verilmiştir.



(a) Beton gerilme-şekil değiştirme diyagramı



(b) Çelik gerilme-şekil değiştirme diyagramı

**Şekil 3.5** Sonlu Eleman Modellerinde kullanılan doğrusal olmayan malzeme özellikleri.

### 3.1.1.3 GFRP Kupon ve Kesit Özellikleri

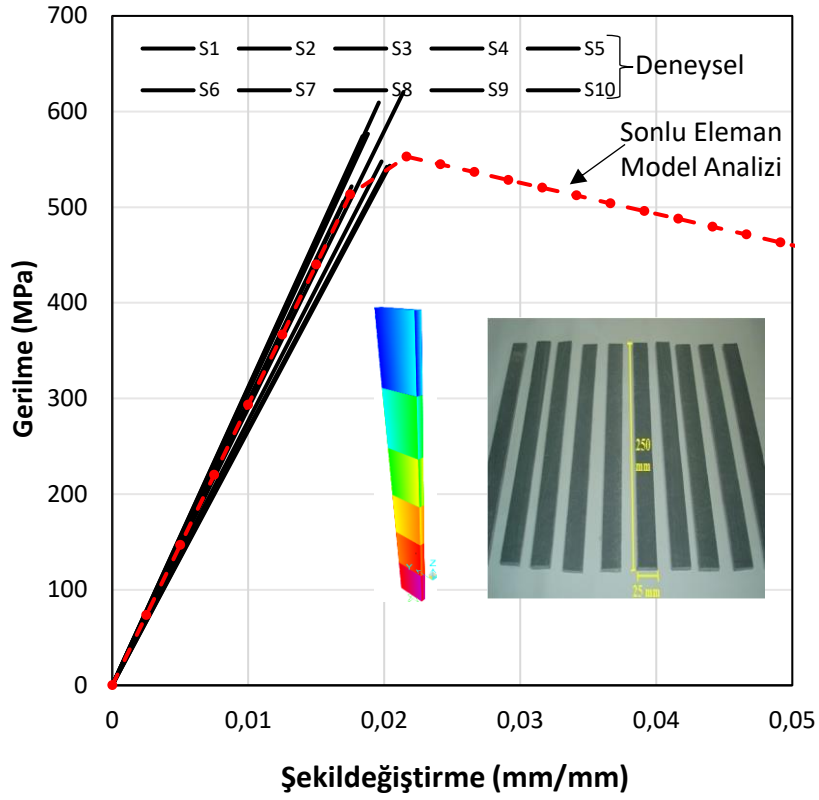
GFRP kuponlarının deneysel olarak elde edilen mekanik özellikleri, solu elemanlar (FE) modellerinde GFRP kutu bölümlerine tanımlanmıştır. İlgili standartlara (ASTM D 3039-2007; TS EN ISO 527-4-2007; TS EN ISO 527-5. 2010) ve test koşullarına (Aydın ve Sarıbiyik 2013

, Yılmaz vd. 2018) uygun olarak tek eksenli çekme test kuponu numuneleri hazırlanmış ve test edilmiştir. GFRP kompozit malzemenin çekme özellikleri ve elastisite modülü Aydın ve Sarıbıyık (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmalarda hesaplanmış ve belirlenmiştir. Fiber yönüne paralel çekme testi için 25x250x4 mm boyutlarında toplam 10 adet test numunesi kullanılmıştır. Ortalama deneysel test sonuçları, GFRP kuponlar ve beton için Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

**Çizelge 3.2** Sonlu eleman modellerinde atanan malzeme özellikleri (Aydın ve Sarıbıyık 2013, Ince vd. 2015).

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson Ratio ( $\mu$ )	Kopma ve Kırılma Gerilmesi (MPa)
GFRP	29334	0.34	561
Beton	27000	0.30	25.5

GFRP malzemesinin çekme mukavemetini ve yenilmesini doğrulamak için bir numune kupon modeli (25x250x4 mm) oluşturulmuş ve sonlu eleman (FE) modellerinde doğrusal olmayan tek eksenli çekme testleri altında test edilmiştir. Kuponların orta yüksekliğine eksenel plastik mafsalları atanarak GFRP malzemesinin deneysel çekme testlerinde olduğu gibi istenilen kopuşun yakalanması sağlanmıştır. Ancak, yakınsama problemlerini ortadan kaldırmak için sonlu eleman (FE) modellerine hafif yumuşama (süneme) davranışı dahil edilmiştir. GFRP kuponlarının deneysel ve doğrulanmış sonlu eleman (FE) modeli gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 46'da gösterilmektedir. Sonuç olarak, mühendislik hata limitleri dikkate alındığında tutarlı sonuçların deneysel ve sayısal sonuçların oldukça tutarlı ve doğru olduğu Şekil 46'da görülmektedir. Böylece GFRP kuponların mekanik davranışı, eğer kesitler bükülmezse sonlu eleman modellerinde eksenel mafsalları tanımlanarak simüle edilmiştir (Ulger vd. 2022). Öte yandan, GFRP kesiti bükülürse, eksenel mafsalları oluşmayacak ve nihai eksenel yük kapasitesine ulaşmayacaktır.



**Şekil 3.6** GFRP kuponlarının sayısal olarak doğrulanmış tek eksenli çekme testi

Yapılan GFRP kupon çekme dayanımı test doğrulama işlemlerinin ardından betonarme çerçevelerin güçlendirilmesinde kutu kesit GFRP kompozit elemanların etkisi araştırılmıştır. Literatürde deneysel olarak çelik IPE 100 profili ile güçlendirme yapılmış bir çalışma referans alınmıştır (İnce vd. 2015). IPE100 çeliğinin aksel rijitliği dikkate alınarak, aynı rijitlik değerine sahip GFRP kompozit kutu kesit elemanlar oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada chevron (ters Y) şeklinde çelik profil tatbik edildiğinden kutu kesit kompozit elemanlarda aynı şekilde tatbik edilmiştir. Böylece elde edilen sonuçları kıyaslanmak daha anlamlı olacaktır. Kutu kesit kompozit profillerin IPE100 çeliğinin rijitliğinin yarısına ve 0.2'lik kısmında denk gelecek şekilde farklı kutu kesit elemanlarda türetilmiş ve güçlendirme için tatbik edilmiştir. Çelik profilin rijitliğinin belirlenmesi için IPE100 profilinin kesit alanı  $10.32 \text{ cm}^2$  ilgili Çizelgeden alınmıştır (Steel Structures Tables 2019). IPE100 çelik profilinin rijitliğinin (EAS) belirlenmesi:

EAS: IPE100 profili için rijitlik değerini ifade etmektedir.

$(EA)_{\text{steel}} = (EA)_{\text{kompozit}}$ ,  $EAS = (\text{Modulus of Elasticity} \times \text{Area})_{\text{Steel}}$

$(210 \text{ GPa} \times 10.32 \text{ cm}^2) = (29.3 \text{ GPa} \times A_{\text{kompozit}}) \Rightarrow A_{\text{kompozit}} = 7371 \text{ mm}^2$

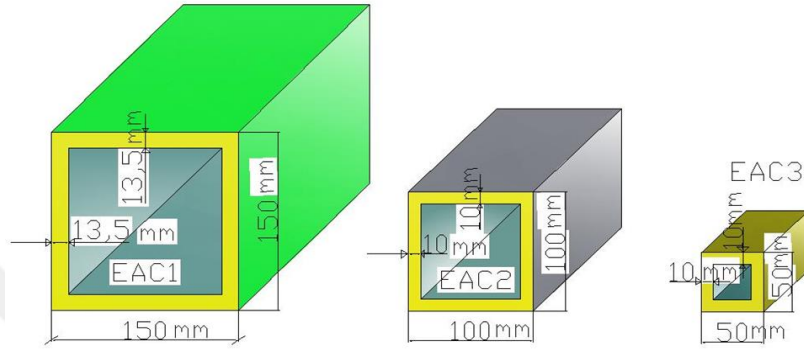
Kompozit kutu kesit rijitliğinin (EAC) çelik profil rijitliğine (EAS) oranları için üç farklı kutu kesit belirlenmiştir.

$$EAC1/EAS=1$$

$$EAC2/EAS=0.5$$

$$EAC3/EAS=0.2$$

Belirlenen GFRP kutu profil kesit detayı şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7 GFRP kutu kesit ölçüleri

GFRP kutu kesitlerinin betonarme moment çerçevesi içindeki etkinliği araştırılmış ve sonlu eleman (FE) modellerine tanımlanan boyutsal ve mekanik özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.

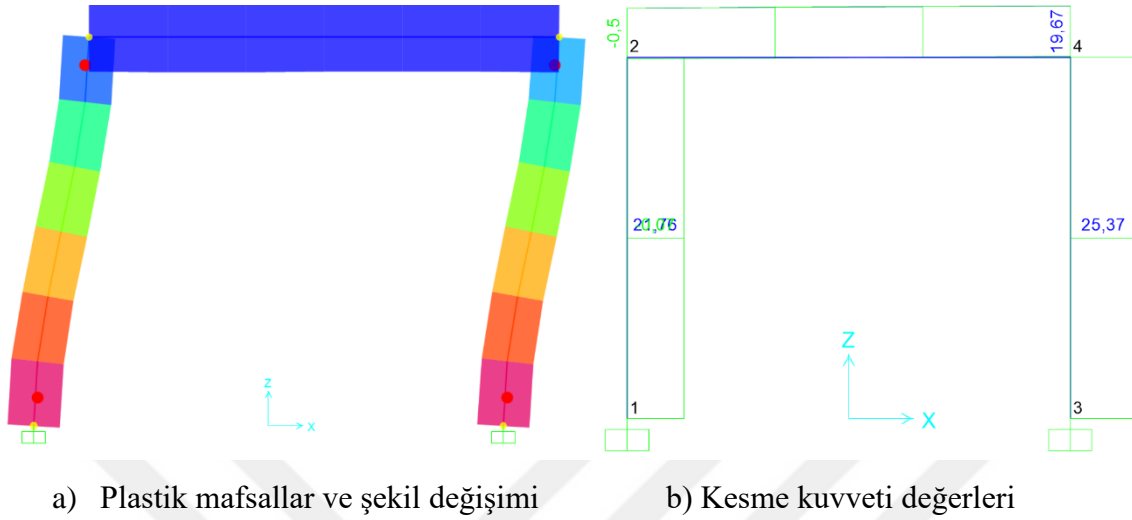
Çizelge 3.3 GFRP kutu ve IPE100 çelik profil detayları

Diyagonal kesitler	Ölçüler (mm)	Alan (mm <sup>2</sup> )	Elastik Modül (MPa)	$\frac{EA_{GFRP}}{EA_{IPE100}}$
EAS	IPE 100	1013	200000	1
EAC1	150 x 150 x 13,5	7371		1
EAC2	100 x 100 x 10	3600	29333	0.5
EAC3	50 x 50 x 10	1600		0.2

#### 3.1.1.4 Betonarme Çerçeve Sonlu Eleman Modelleri ve Deneysel Statik İtme (Pushover) Analiz Sonuçları

Bilgisayar modelinin doğru çalışıp çalışmadığını kontrol etmek için yanal itme (Pushover) analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile kıyaslanmıştır. Nümerik analiz sonucunda oluşan plastik mafsallar ve kesme kuvveti diyagramı şekil 3.8’de verilmektedir. 25.37 KN sağ kolonda ve

21.76 KN'da sol kolonda kesme kuvveti oluştuğu görülmektedir. İki kolonda toplan 47.1 KN civarında yanal yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.



Şekil 3.8 Referans betonarme çerçeve analiz sonuçları.

Deney ile sonlu eleman modelli yalın betonarme çerçeve sonuçları arasında %0.21 hata hesaplanmıştır. Referans (yalın) betonarme çerçeve ve çelik çaprazlı betonarme çerçevenin deneysel ve nümerik statik itme (pushover) analizleri sonucunda, yanal yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.9'da verilmektedir. Öte yandan deney sırasında kolon tabanında erken göçme (cıvata kayması) nedeniyle çelik çaprazlı çerçevenin tam yük kapasitesine ulaşamamıştır (Ince vd. 2015). Kolon ve kiriş kesitlerinin kesme dayanımı (TS500, 2000) denklem (3.1) kullanılarak tahmin edilmiştir.

$$\begin{aligned}
 V_r &= V_c + V_w \\
 V_c &= \mu_c \times f_{ctd} \times b \times d \\
 V_w &= \mu_s \times F_{yw} \times A_{sw} / s \times d
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de ki ifadeler aşağıda verilmektedir (TS500, 2000):

$V_r$ : toplam kesme dayanımı

$V_c$ : Kesme dayanımına beton katkısı

$V_w$ : Kesme dayanımına kesme donatısı katkısı

$\mu_c$ : 0.8, azaltma katsayısı beton Poisson oranı

$\mu_s$ : 1.15, çelik arttırma katsayısı

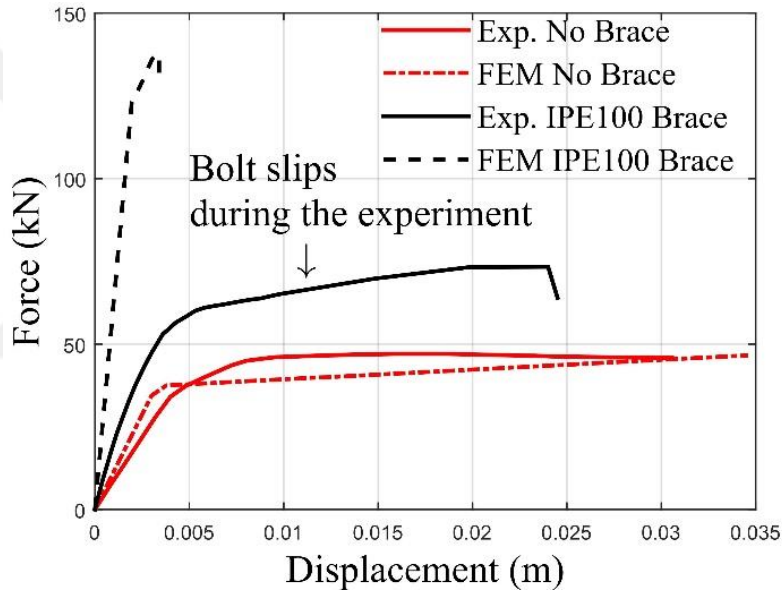
$f_{ctd}$ : beton tasarım aksenal çekme dayanımı

$F_{yw}$  : donatı akma dayanımı

$A_{sw}$  : donatı alanı

$b$  ve  $d$  : kesit ölçüleri

Kolon ve kiriş sırasıyla yaklaşık 138 ve 165 kN kesme yük kapasitelerine sahiptir. Bu yüzden, bu beklenmeyen yenilmeler bu çalışmaya dahil edilmemiştir, ancak olası kesme yenilmeleri, kesme mafsalları atanarak betonarme çerçevelerin sonlu elemanlar modelinin kapasite tahminine dahil edilmiştir. Bu nedenle, bu iki deney sonlu eleman modelleri ile doğrulandı ve betonarme çerçeve modellerinin yanal yük kapasitesi ve yer değiştirmesinin tahmini için kabul edilebilir doğruluk sağlanmıştır.



Şekil 3.9 Deneylerin sonlu eleman modelleri doğrulaması (Ulger vd. 2022).

Ters Y tipi (Chevron) GFRP kutu çaprazları ile tüm betonarme moment çerçevelerinin sonlu eleman model analizinin sonucu tezin bu bölümünde sunulmaktadır. Referans (yalın) betonarme moment çerçevesinin yanal yük sapma eğrisi, 47.1 kN nihai yük kapasitesine ulaştı ve çerçeve 0.05 mm yanal sapmada akmaya başladı. Ters Y tipi (Chevron) IPE100 çelik çaprazların dahil edilmesi, EAS çerçevesinin yük kapasitesini 138 kN'ye kadar artırdı ve referans betonarme çerçevenin ilk rijitliği, EAS çaprazlarla yaklaşık %342 oranında artırıldı. Çelik çaprazlar deney ve sonlu eleman model analizi sırasında burkulmadı. IPE100 profil kesitinin aynı aksenal rijitliğine sahip muadili GFRP kutu çaprazı EAC1, betonarme çerçeve modeline dahil edildi ve maksimum yük kapasitesini Şekil 3.10'da gösterildiği gibi 165,8 kN'a

çıkardı, bu da Şekil 3.10'da gösterilenden EAS çelik çaprazlı çerçeveden %20 daha fazladır. Kolon ve kirişlerde çoklu plastik mafsalların oluştuğu görülmüştür. Bunlara ek olarak, kullanılan her bir çapraz elemanın kritik burkulma kapasitesi denklem (3.2)'de verilen Euler Kritik Burkulma formülüne (Ulger vd. 2022) göre ve doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri ile gerçekleştirilmiştir.

Euler Kritik Burkulma Formülü:

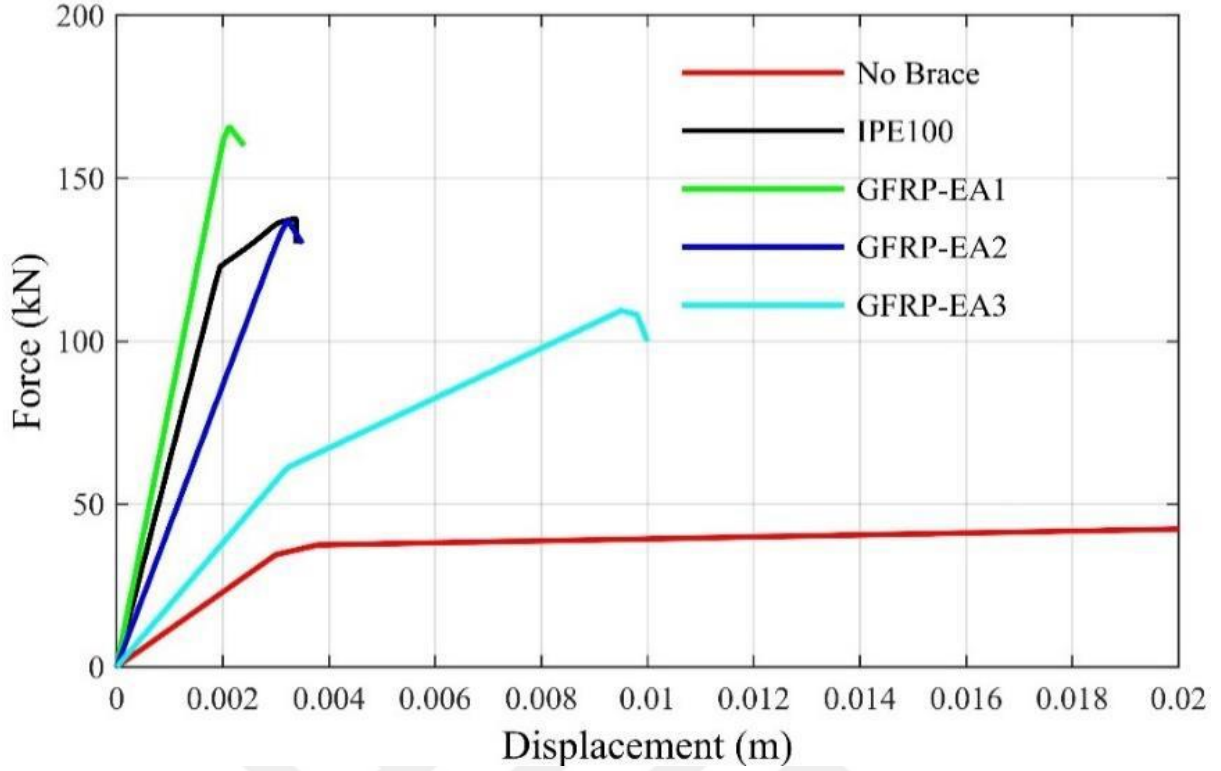
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.2)$$

$P_{cr}$  = kritik burkulma yükü,  $EI$  = eğilme rijitliği,  $L$  = eleman uzunluğu.

GFRP Kutu kesitlerinin kritik burkulma yük kapasiteleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. EAC1 çaprazının burkulma yük kapasitesinin en küçük değeri 4925 kN olarak hesaplanmıştır; bu da çaprazın burkulmasının betonarme çerçevesinde bir kontrol hatası olmadığını göstermiştir.

İkinci durumda, EAC2 GFRP kutu kesitleri referans betonarme çerçevesine güçlendirme elemanı olarak eklenmiştir. Nihai yük kapasitesi 136.9 kN olarak hesaplandı ve bu, EAS destekli (çelik çaprazlı) betonarme çerçeve ile neredeyse aynı kapasiteye ulaşmıştır. Bununla birlikte, GFRP çaprazların aksel rijitliğinde %50 azalma, başlangıçtaki rijitlik azalmasının yaklaşık %33'üne neden olmuştur. Şekil 3.10'da, EAC2 çaprazlarının yük yerdeğiştirme eğrisi, plastik mafsallar betonarme çerçevesinde oluşana kadar aksel olarak eğilme veya burkulma meydana gelmedi.

Son durumda, EAC3 çaprazlarının aksel rijitlik oranı, çelik çaprazların EAS'sinin 0,2'sine düşürüldüğünde, yük kapasitesi, EAS (çelik) çaprazlı betonarme çerçevenin yük kapasitesinden daha az olan 108,2 kN'ye ulaştı. EAC3 kutu kesiti diğer GFRP kutu en kesitleri arasındaki en narin kutu kesittir. EA3 kesiti sonlu eleman analizi sırasında 0,0093 mm yanal yerdeğiştirmeye ve 103 kN kritik burkulma yük kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Şekil 3.10'da EAC3 çapraz güçlendirme kutu elemanlarının yük-yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir.



**Şekil 3.10** Çaprazlı betonarme moment çerçevelerinin yük-yerdeğiştirme eğrileri (Ulger vd. 2022).

**Çizelge 3.4** GFRP Kutu kesit profilleri için kritik burkulma yükleri.

Kesit İsmi	Sayısal Burkulma Yüğü (kN)	Euler Burkulma Yüğü (kN)
EAC1	4925	5287
EAC2	1075	1125
EAC3	103.4	103.7

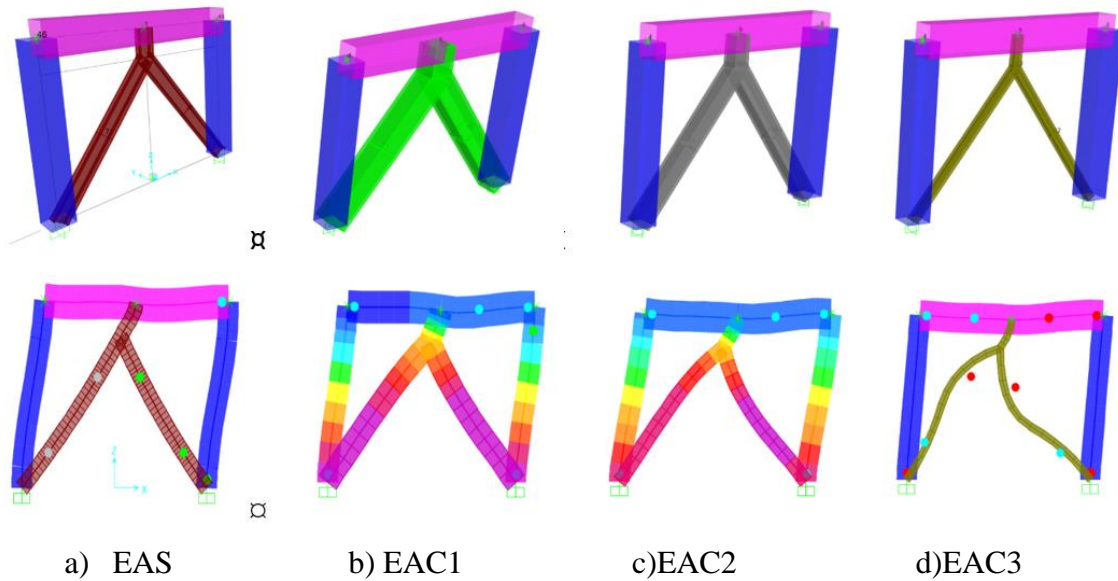
### 3.1.1.5 Plastik Mafsal Oluşumları

Betonarme çerçeve ve çaprazların yenilmesi (kırılması) bu bölümde plastik mafsal oluşumları ve açıklamaları ile takip edilmiştir. Bu mafsallar, Şekil 3.11'de gösterildiği gibi, yenilen kesitlerin son aşamasını gösterir ve yanal olarak güçlendirilmiş (rijitleştirilmiş) çerçevelerin kırılma mekanizmasını kontrol etmek için önemlidir.

EAS çelik çapraz, Şekil 3.11a'da gösterildiği gibi basınç çaprazında aksenal akma meydana geldi ve bu çaprazın burkulmasının Şekil 3.10'da gösterildiği gibi yaklaşık 122 kN'de gerçekleşmesi bekleniyordu. EAC1 ve EAC2 çaprazları, yanal yükleme sırasında aksenal olarak akmadı ve burkulmadı ve çerçevenin son yükleme aşamalarındaki deforme şekli sırasıyla Şekil 3.11b ve Şekil 3.11c'de gösterildi. Her iki GFRP kutu kesitlerde plastik mafsal oluşmadı.

Son olarak, narin GFRP çaprazlar yanal yükleme sırasında yaklaşık 62,5 kN'de aktı ve burkuldu ve EAC3 çaprazlarının plastik mafsalları Şekil 3.11'de görülebilir. EAC3 çaprazları, GFRP çaprazlı betonarme çerçeveler arasında maksimum yanal yerdeğiştirmeye izin verdi ve bu da betonarme çerçevenin kiriş ve kolon elemanlarında çoklu plastik mafsalları oluşmasına neden oldu. Diğer betonarme çerçevelerdeki plastik mafsallar, Şekil 3.11'a'dan Şekil 3.11c'ye kadar gösterildiği gibi pik yüklerinde bile tam olarak gelişmemiştir. Şekil 50'den bu çaprazlar için aynı sonuç çıkarımı yapılabilir ki bu sayısal tutarsızlık problemlerinin, en büyük yük kapasitelerine ulaştıktan sonra yükün düşmesine neden olduğu sonucuna varılabilir.

Aynı zamanda, yanal yüklemeler sırasında bu pik yükler elde edilene kadar kolon ve kirişlerin teorik olarak hesaplanan kesme dayanımlarına ulaştığı varsayılmıştır. Bununla birlikte, betonarme kirişler ve çaprazlar üzerindeki yanal yük kapasiteleri ve karşılık gelen göçme lokasyonları Şekil 3.11'de görülebilir. Son mafsalları oluşmaları ile bir betonarme çerçevesinde farklı tip çapraz konfigürasyonları Şekil 3.11'de verilmektedir.



**Şekil 3.11** Son mafsalları oluşmaları ile bir betonarme çerçevesinde farklı tip çapraz konfigürasyonları

Tez çalışmasının bu kısmında, betonarme bir moment çerçevesi içindeki (chevron) ters Y tipi çapraz konfigürasyonu incelenmiştir. Çelik çaprazlı ve çaprazsız moment çerçevesinin deneysel sonuçları sonlu eleman modellerinde doğrulanmıştır. Doğrulanmış sonlu eleman betonarme moment çerçevelerinde üç farklı ebattaki GFRP kutu kesit çaprazının alternatif

kullanımı tatbik edilmiş ve bunların beklenen nihai yük kapasiteleri ve karşılık gelen yanal deplasmanları sunulmuş ve çelik çaprazların yapısal performansı ile karşılaştırılmıştır. GFRP çaprazların aksenal rijitlik azalması ve düzlem dışı burkulması, dikkate alınan moment çerçevelerinin olası göçmesine dahil edilmiştir. GFRP kutu kesit çaprazlara IPE100 çaprazlarının eşit aksenal rijitliği sağlandığında, burkulma olasılığı olmadan betonarme çerçevenin yanal yük kapasitesi artmıştır. GFRP kutu çaprazlara bu aksenal rijitliğin yarısı sağlandığında, GFRP kutu çaprazların yük kapasitesine yakın yük kapasitesi elde edildi, ancak doğrusal yükleme aşamasındaki ilk rijitlik IPE100 çaprazlarından biraz daha az elde edildi. GFRP kutu güçlendirme elemanlarının yenilmesi, pik yüke kadar gerçekleşmedi. Narin GFRP kutu kesitler, burkulma olayına karşı daha olasıydı ve bu, moment çerçevelerinde plastik mafsallar gelişmeden önce meydana geldi.

IPE100 çelik çaprazların %20 aksenal rijitliğine sahip narin GFRP kutu kesitli çaprazlar, GFRP çaprazlar arasında en düşük yanal performansı göstermiştir. GFRP profillerin hafif bir malzeme olması ve yapının toplam ağırlığını azaltması, korozyona dayanıklı olması ve gelişmiş üretim yöntemleri ile daha ekonomik olması gibi ve ileri mekanik özellikleri göz önüne alındığında, GFRP profiller, yapısal yanal güçlendirmede ana bileşen olarak yapılarda kullanılabilir.

Aynı kapsamda, GFRP kesitinin betona entegre edilebilirliğinin ele alınması ve bağlantı detaylarından kaynaklanan rijitlik kayıplarının ileride yapılacak çalışmalara özel olarak dahil edilmesi gerekmektedir.

### **3.1.2 Farklı Tip GFRP Kompozit Elemanlar ile Güçlendirmenin Betonarme Çerçevelerin Yanal Yük Taşıma Kapasitesine Etsiki**

Betonarme çerçevelerin kompozit panellerle güçlendirilmesi üzerine yapılacak olan deneysel çalışmalar için toplam 4 farklı betonarme çerçeve sonlu eleman modeller üzerinde 5 farklı güçlendirme uygulaması için analizler yapılmıştır. Bunları kategorize edecek olursak 4 adet farklı kesit ve geometrik özelliklerine sahip tek açıklıklı-tek katlı ve tek açıklıklı-çift katlı betonarme çerçeve sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller yanal yük altındaki yerdeğiştirme reaksiyonlarına göre ve kesit kontrolleri açısından TS500-2000R2018'e göre irdelenmiştir. Oluşturulan nümerik modellerin kesit ebatları ve açıklık ölçüleri sırasıyla:

Model 1: Kolon-kiriş ebatları 8x8 cm, çerçeve yüksekliği 1.2m ve genişliği 0.8 metredir.

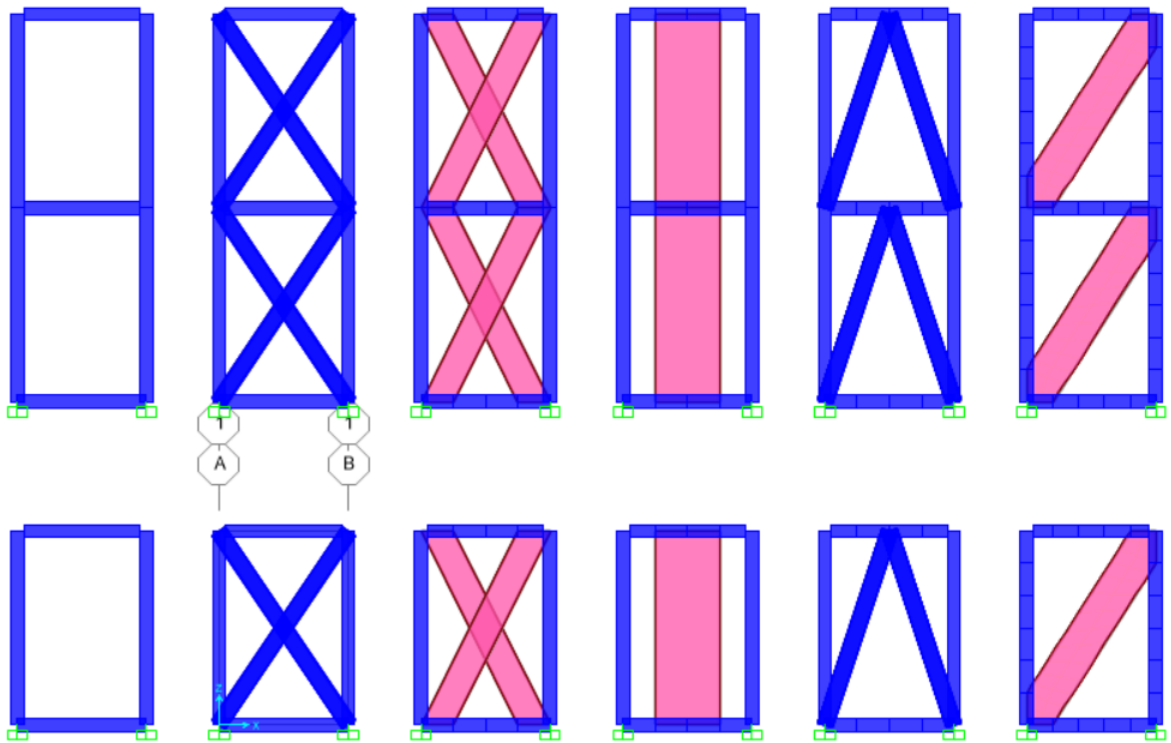
Model 2: Kolon-kiriş ebatları 10x10 cm, çerçeve yüksekliği 1m ve genişliği 1 metredir.

Model 3: Kolon-kiriş ebatları 10x10 cm, çerçeve yüksekliği 1.2m ve genişliği 0.8 metredir.

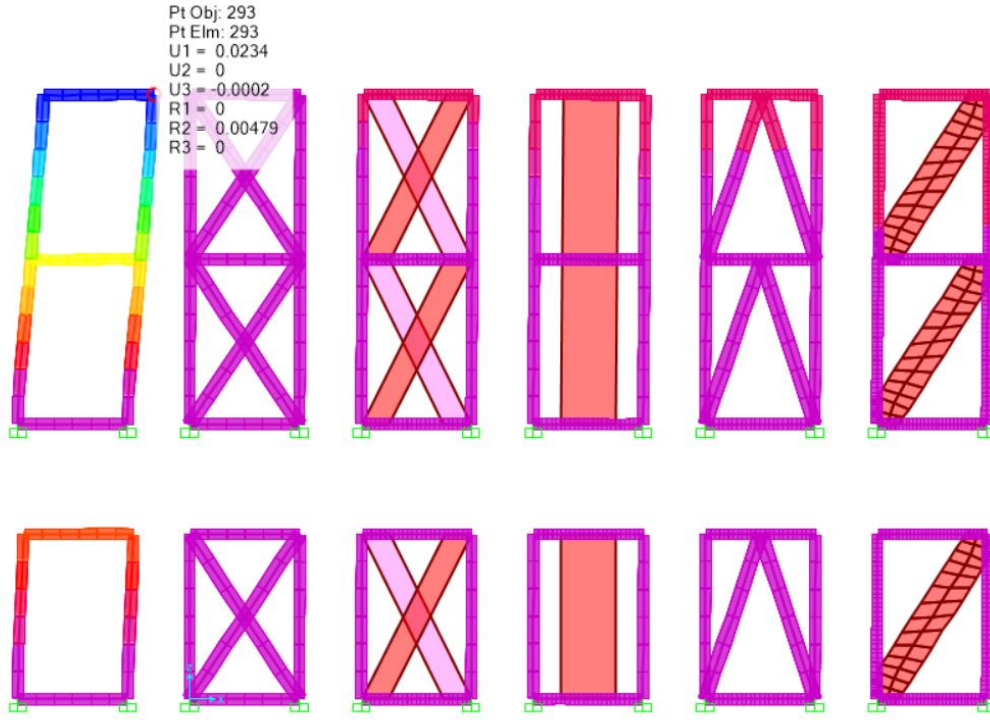
Model 4: Kolon-kiriş ebatları 8x8 cm, çerçeve yüksekliği 1m ve genişliği 1 metredir.

### 3.1.2.1 Model 1

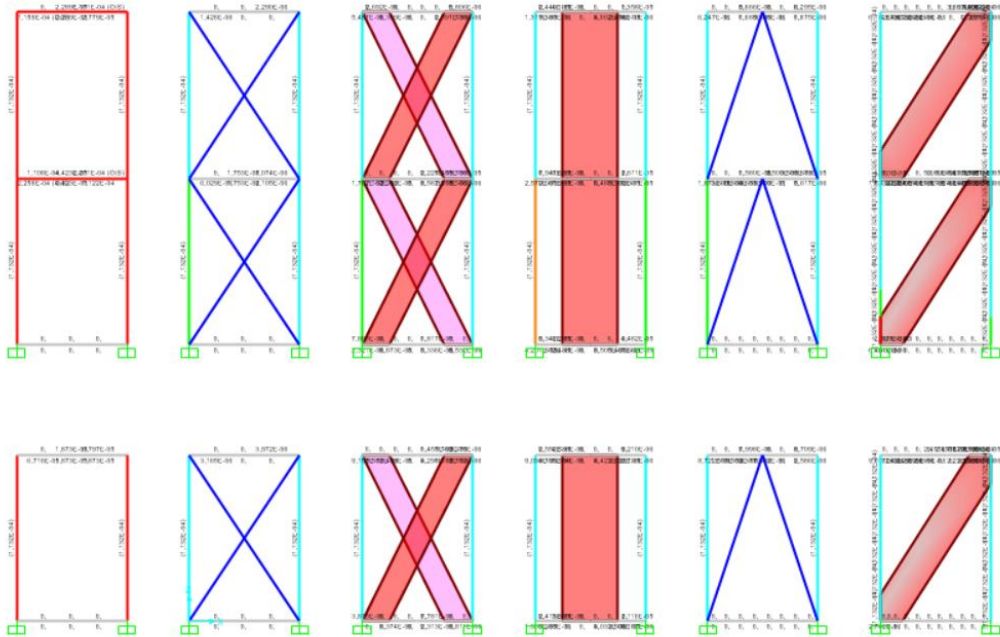
0.8m genişliğinde ve 1.2 metre yüksekliğinde olup, kolon kiriş kesit ölçüleri 8x8 cm'dir. Bu model tek katlı ve iki katlı olarak türetilmiştir. Bu modele 5 farklı tipte güçlendirme uygulanmıştır. Modelde C16/20 beton ve S420 donatı sınıfı kullanılmıştır. Kolonlarda ve kirişlerde 4 adet  $\phi 6$  boyuna donatı ve 15 cm aralıklar ile  $\phi 6$  etriyeler kullanılmıştır. Modellerdeki GFRP kutu kesitler 100x100x4 mm ebatlarında ölçülere sahiptir. FRP plakalar ise 4 mm kalınlığında ve 25 cm genişliğindedirler. Model 1'e ait tek katlı ve iki katlı çerçevelere uygulanan GFRP kompozit güçlendirme türleri Şekil 3.12'de verilmektedir.



Şekil 3.12 Model 1 ve güçlendirme şekilleri.



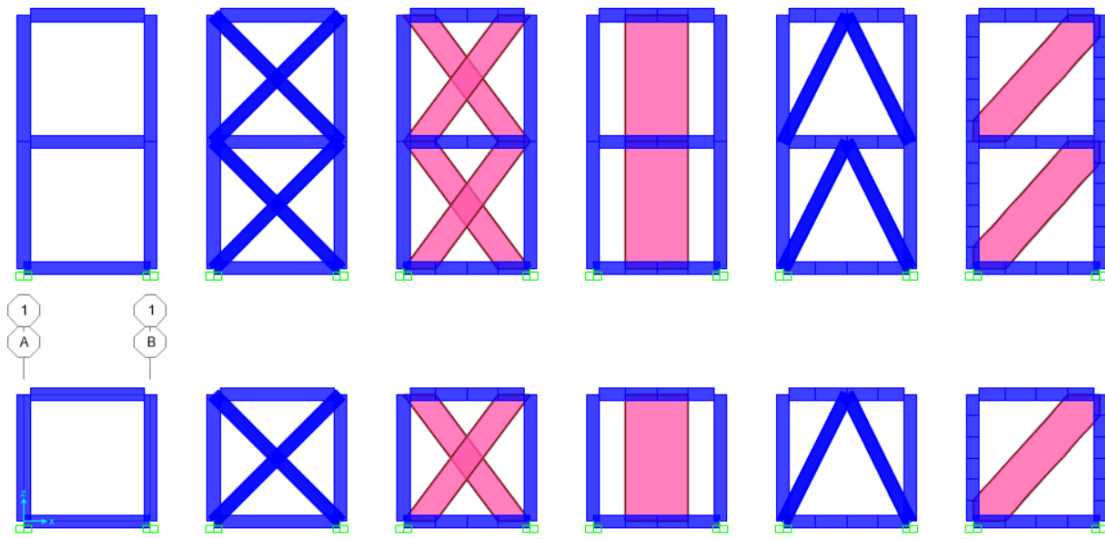
Şekil 3.13 Model 1 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğistirmeler.



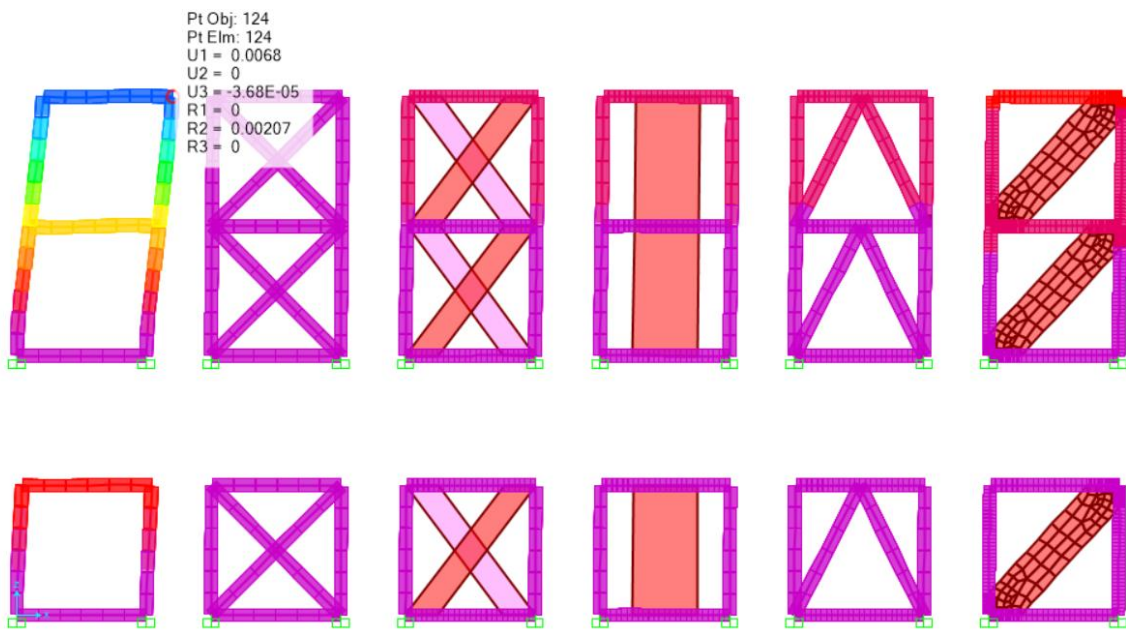
Şekil 3.14 Model 1 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri (TS500-2000R 2018 yön. göre).

### 3.1.2.2 Model 2

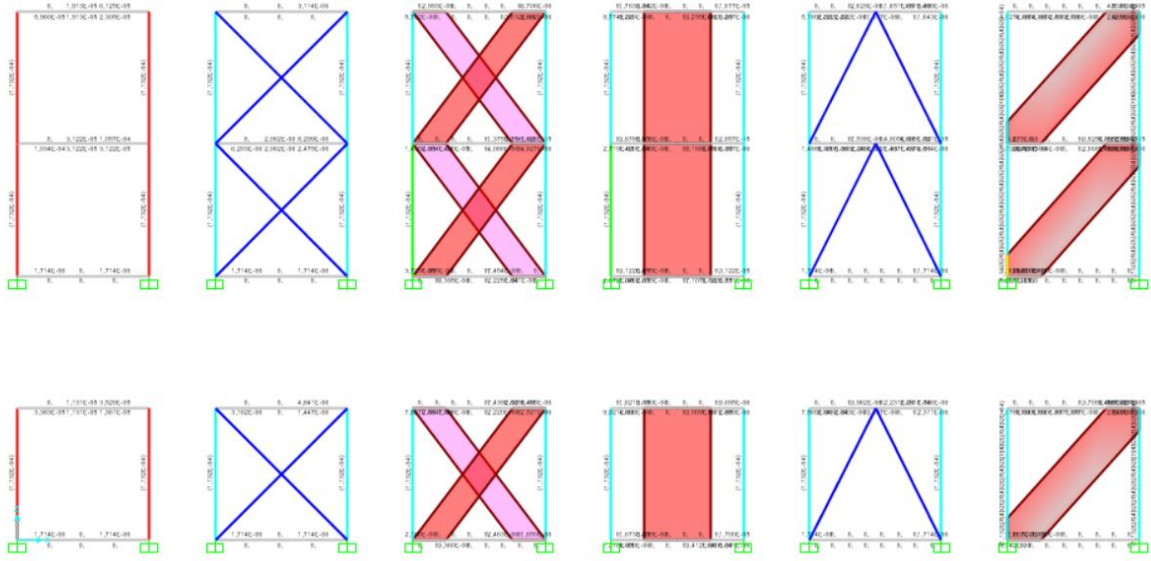
1 m genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde olup, kolon kiriş kesit ölçüleri 10x10 cm'dir. Bu model tek katlı ve iki katlı olarak türetilmiştir. Bu modele 5 farklı tipte güçlendirme uygulanmıştır. Modelde C16/20 beton ve S420 donatı sınıfı kullanılmıştır. Kolonlarda ve kirişlerde 4 adet  $\phi 6$  boyuna donatı ve 15 cm aralıklar ile  $\phi 6$  etriyeler kullanılmıştır. Modellerdeki GFRP kutu kesitler 100x100x4 mm ebatlarında ölçülere sahiptir. FRP plakalar ise 4 mm kalınlığında ve 25 cm genişliğindedirler. Model 2'e ait tek katlı ve iki katlı çerçevelere uygulanan GFRP kompozit güçlendirme türleri Şekil 3.15'de verilmektedir.



Şekil 3.15 Model 2 ve güçlendirme şekilleri.



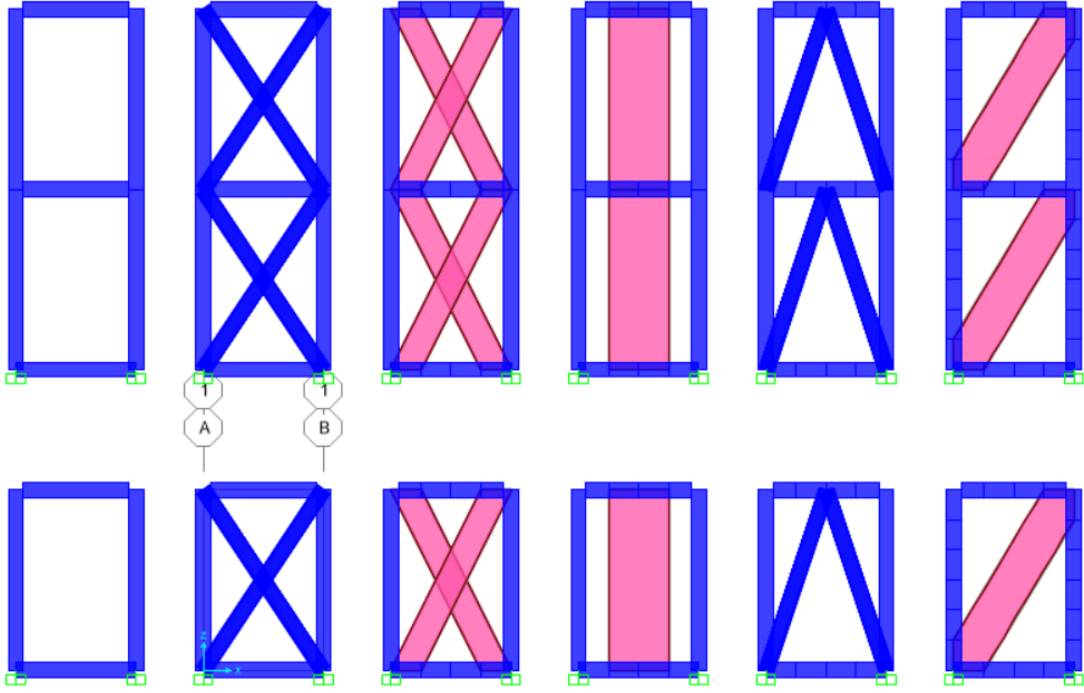
Şekil 3.16 Model 2 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğiştirmeler.



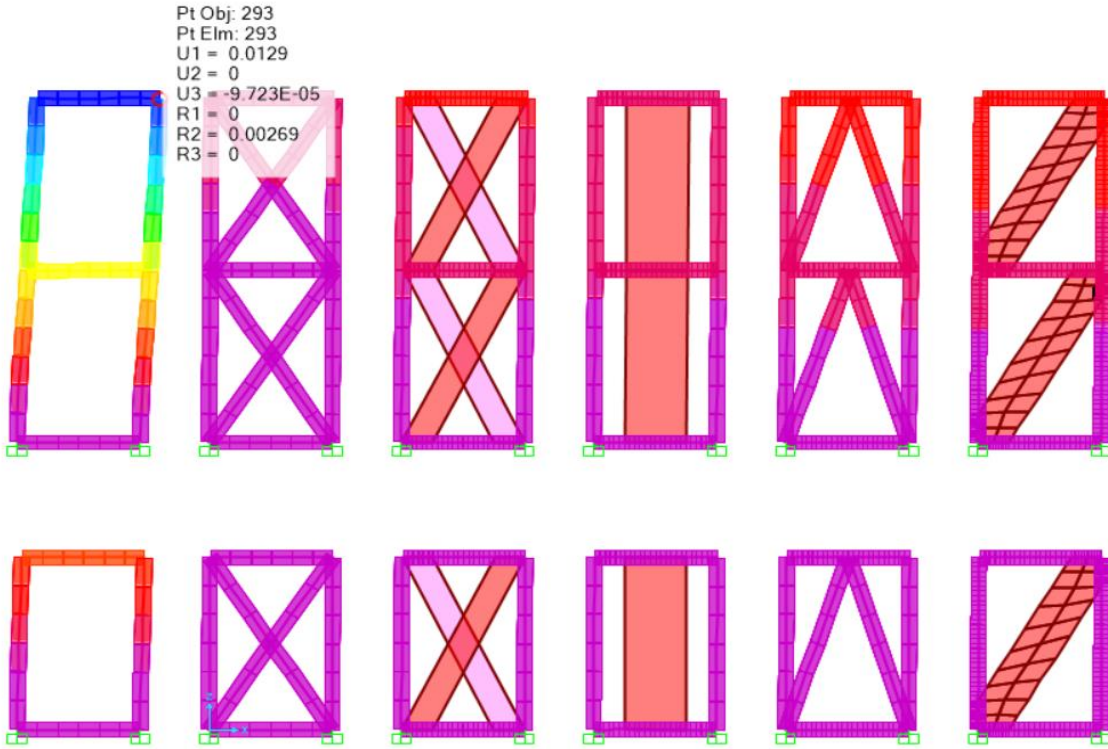
**Şekil 3.17** Model 2 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri (TS500-2000R 2018 yön. göre)

### 3.1.2.3 Model 3

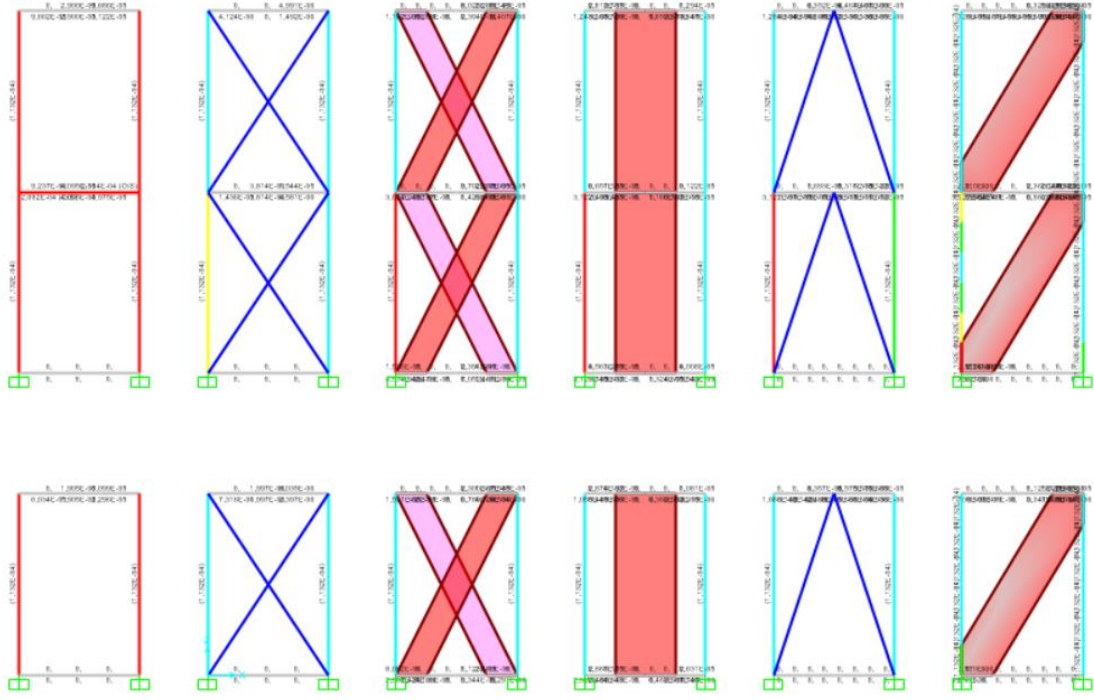
0.8m genişliğinde ve 1.2 metre yüksekliğinde olup, kolon kiriş kesit ölçüleri 10x10 cm'dir. Bu model tek katlı ve iki katlı olarak türetilmiştir. Bu modele 5 farklı tipte güçlendirme uygulanmıştır. Modelde C16/20 beton ve S420 donatı sınıfı kullanılmıştır. Kolonlarda ve kirişlerde 4 adet  $\phi 6$  boyuna donatı ve 15 cm aralıklar ile  $\phi 6$  etriyeler kullanılmıştır. Modellerdeki GFRP kutu kesitler 100x100x4 mm ebatlarında ölçülere sahiptir. FRP plakalar ise 4 mm kalınlığında ve 25 cm genişliğindedirler. Model 3'e ait tek katlı ve iki katlı çerçevelere uygulanan GFRP kompozit güçlendirme türleri Şekil 3.18'de verilmektedir.



Şekil 3.18 Model 3 ve güçlendirme şekilleri



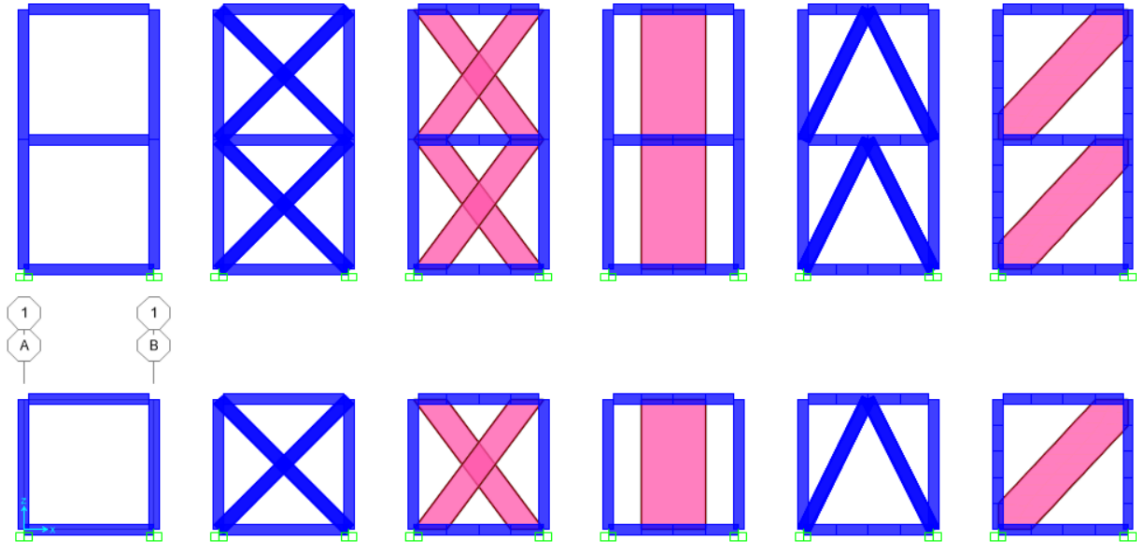
Şekil 3.19 Model 3 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğistirmeler.



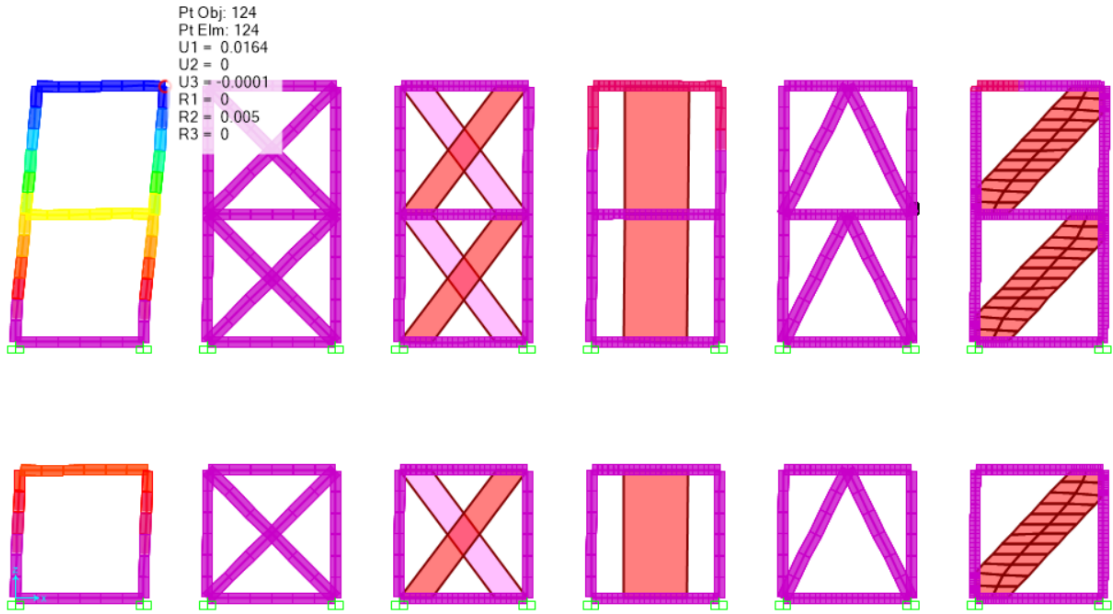
Şekil 3.20 Model 3 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri (TS500-2000R 2018 yön. göre)

### 3.1.2.4 Model 4

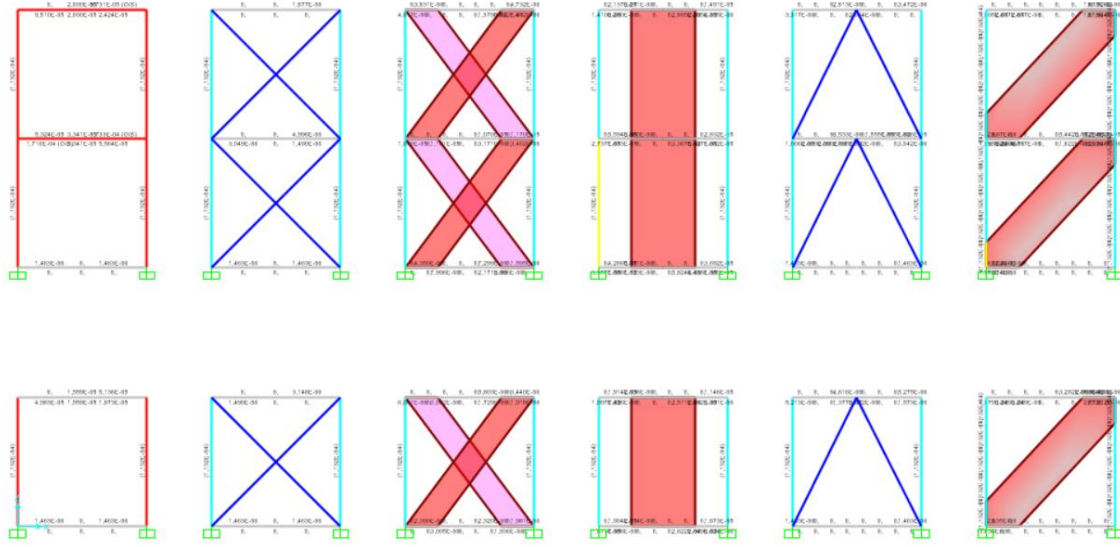
1 m genişliğinde ve 1 metre yüksekliğinde olup, kolon kiriş kesit ölçüleri 8x8 cm'dir. Bu model tek katlı ve iki katlı olarak türetilmiştir. Bu modele 5 farklı tipte güçlendirme uygulanmıştır. Modelde C16/20 beton ve S420 donatı sınıfı kullanılmıştır. Kolonlarda ve kirişlerde 4 adet  $\phi 6$  boyuna donatı ve 15 cm aralıklar ile  $\phi 6$  etriyeler kullanılmıştır. Modellerdeki GFRP kutu kesitler 100x100x4 mm ebatlarında ölçülere sahiptir. FRP plakalar ise 4 mm kalınlığında ve 25 cm genişliğindedirler. Model 2'e ait tek katlı ve iki katlı çerçevelere uygulanan GFRP kompozit güçlendirme türleri Şekil 3.21'de verilmektedir.



Şekil 3.21 Model 4 ve güçlendirme şekilleri.



Şekil 3.22 Model 4 yanal itme sonucunda oluşan yatay yerdeğistirmeler.



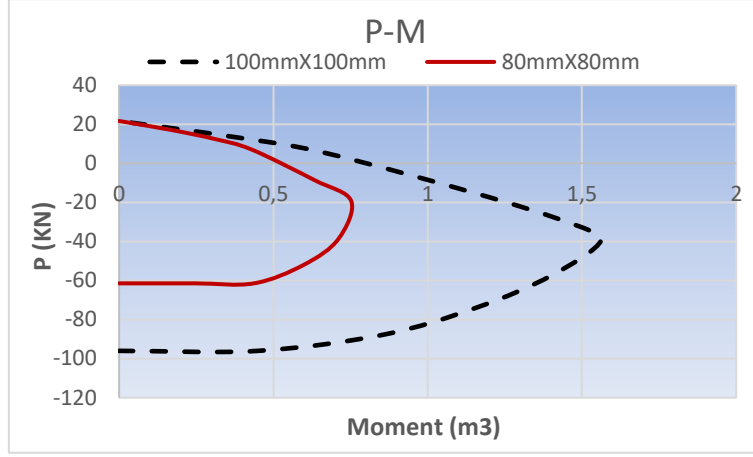
**Şekil 3.23** Model 4 güçlendirme sonucunda kesit kontrolleri (TS500-2000R 2018 yön. göre)

Oluşturulan bütün modellerin detayı ve Pmax ile Ux değerleri Çizelge 3.5’de verilmektedir.

**Çizelge 3.5** Farklı tip güçlendirme şekillerinden elde edilen değerler.

Kesit Detay	Kat Sayısı	Referans Betonarme Çerçeve		X-Kutu- Profil-BÇ		X-Plaka-BÇ		Panel-BÇ		Ters V-BÇ		Geniş-Çapraz-Plaka-BÇ		Ebat	
		Pmax (kN)	Ux (mm)	Pmax (kN)	Ux (mm)	Pmax (kN)	Ux (mm)	Pmax (kN)	Ux (mm)	Pmax (kN)	Ux (mm)	Pmax (kN)	Ux (m)		
kol-kir-kesit: 100mmX100mm	1 kat BÇ	4	2.9	4	0.3	4	0.5	4	0.4	4	0.6	4	0.7	0,8 m (en) X 1,2 m (boy)	
	2 kat BÇ	4	12.9	4	1.1	4	1.9	4	1.7	4	2.1	4	2.4		
kol-kir-kesit: 80mmX80 mm	1 kat BÇ	3	5.2	3	0.2	3	0.5	3	0.5	3	0.5	3	0.7	1 m (en) X 1 m (boy)	
	2 kat BÇ	3	23.4	3	1	3	1.7	3	2	3	1.8	3	2.3		
kol-kir-kesit: 100mmX100mm	1 kat BÇ	3	1.4	3	0.1	3	0.2	3	0.2	3	0.2	3	0.3		
	2 kat BÇ	3	6.8	3	0.5	3	0.8	3	0.8	3	0.8	3	1		
kol-kir-kesit: 80mmX80 mm	1 kat BÇ	3	3.4	3	0.1	3	0.2	3	0.3	3	0.4	3	0.3		
	2 kat BÇ	3	16.4	3	0.5	3	0.9	3	1.4	3	0.8	3	1.1		

Oluşturulan iki farklı kesitli betonarme kolon modellerin kuvvet-moment eğrileri şekil 3.24’de verilmiştir.

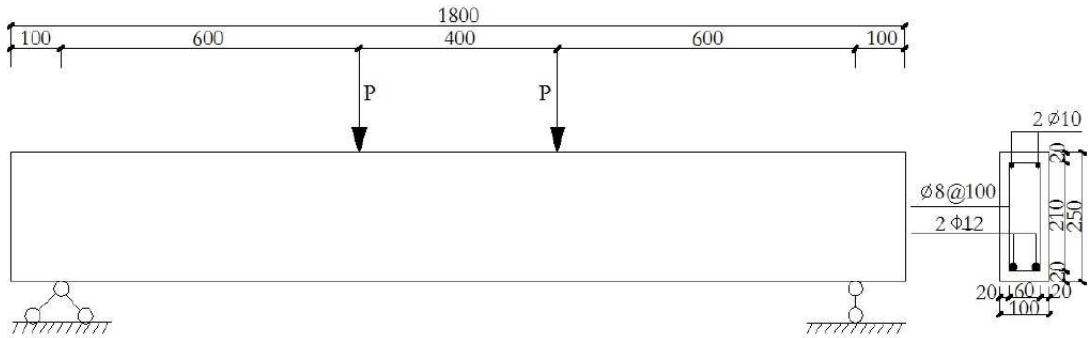


Şekil 3.24 Farklı kesitlerdeki kolonların P-M diyagramları.

### 3.2 ANSYS'DE ELEMAN DÜZEYİNDE OLUŞTURULAN BETONARME SONLU ELEMAN DOĞRULAMA MODELİ

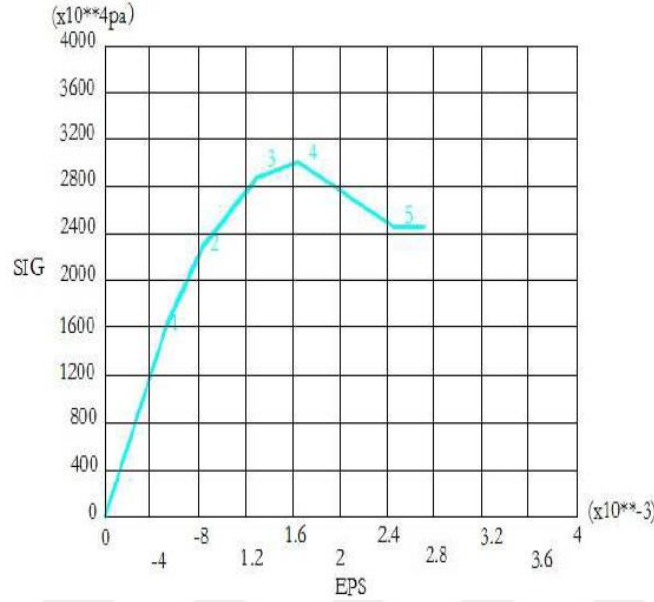
#### 3.2.1 Eleman Bazında Oluşturulan Betonarme Kiriş Sonlu Eleman Modeli

Oluşturulan üç boyutlu betonarme kirişi doğrulamak için deneysel ve nümerik olarak analiz edilen bir literatür çalışması ile karşılaştırma yapılmıştır (Zhang vd. 2013). Zhang ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışmada betonarme bir kirişin nonlinear analizlerini ANSYS programını kullanarak nümerik olarak gerçekleştirirken ayrıca deneysel sonuçlarla elde edilen nümerik sonuçları kıyaslamışlardır. Zhang ve diğ. (2013) yapmış oldukları çalışmayı incelediğimizde boyuna donatı ve etriye elemanlar için ANSYS eleman kütüphanesinden LINK 8 elemanını kullanırlarken, beton için SOLID65 elemanını kullandıkları görülmektedir. Oluşturdukları kiriş modelinin geometrik özellikleri, uygulanan yük ve donatı detayı aşağıda şekil 3.25'de verilmektedir ve uzunluk birimleri mm cinsindedir.



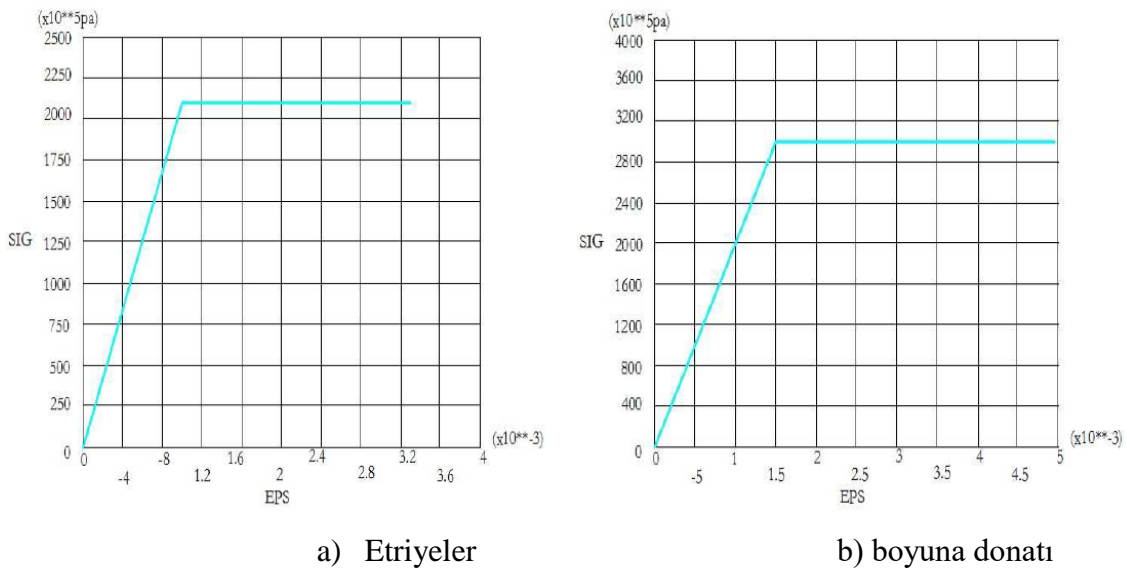
Şekil 3.25 Betonarme kiriş detayı (Zhang vd. 2013).

Bu makalede, beton, Mises gerinim plastisite analizine uymak için geçerli olan Bauschinger etkisi dikkate alınarak, gerilme-şekildeğiştirme eğrisi kinematik pekleşme etkisi (yani MKIN) ile simüle edilmiştir. Şekil 3.26’ da bu çalışmada kullanılan beton stres-şekildeğiştirme eğrisi verilmiştir.



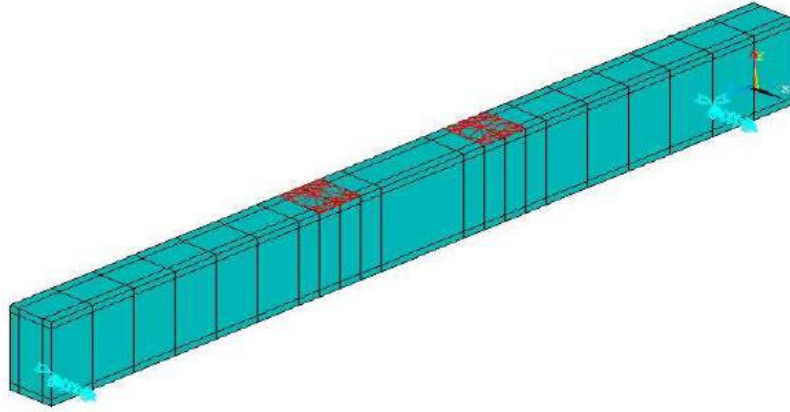
Şekil 3.26 Betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi (Zhang vd. 2013).

Donatı gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi çift doğrusal izotropik pekleşme modeli (BISO) ile simüle edilmiştir. Şekil 3.27 a) etriyeler ve 3.27 b)boyuna donatılar için kullanılan stres şekildeğiştirme grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.27 Etriye ve donatı stres-uzama grafikleri (Zhang vd. 2013)

Oluşturulan kiriş sonlu eleman modeli aşağıda şekil 3.28 de verilmektedir (Zhang vd. 2013).



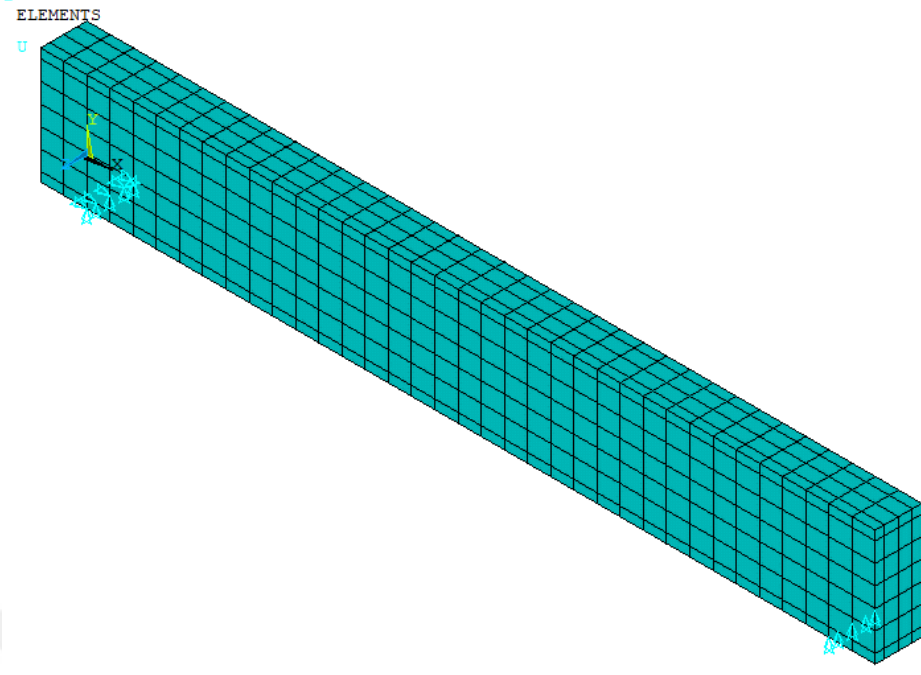
**Şekil 3.28** Sonlu eleman kiriş modeli (Zhang vd. 2013).

Bu kiriş sonlu eleman modelinden ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda şekil 3.29 da kıyaslanmıştır.

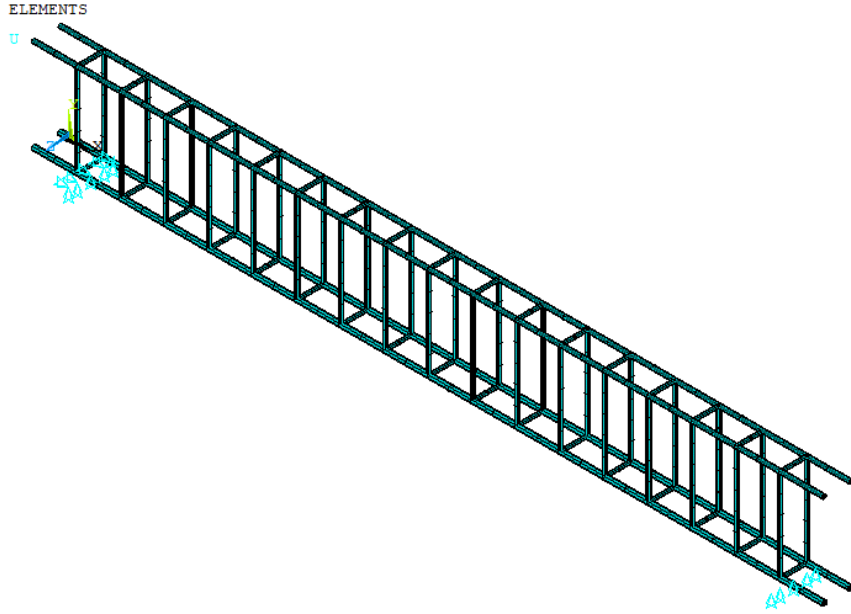


**Şekil 3.29** Betonarme kirişin orta noktasındaki sehimin yük altında davranış verilmektedir (Zhang vd. 2013).

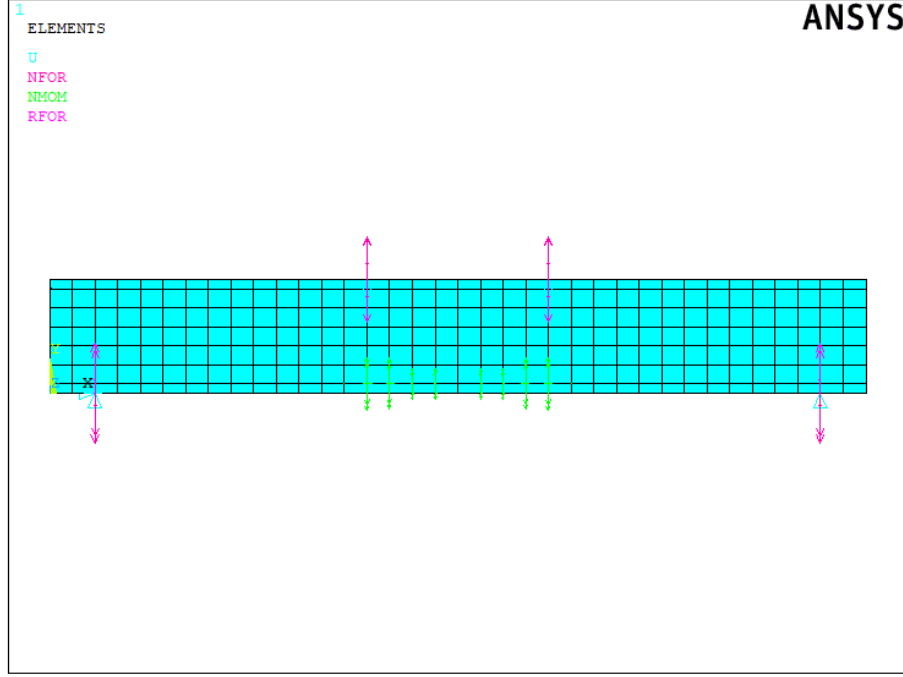
Burada mavi renkle gösterilen değerler literatürde betonarme kiriş için ANSYS programı ile oluşturulan modelden elde edilen sonuçları temsil etmektedir. Doktora tez çalışmam doğrultusunda yazdığımız kodlarla oluşturduğumuz sonlu eleman kiriş modeli ve analiz sonuçları aşağıda şekillerde 3.30-3.42 verilmektedir.



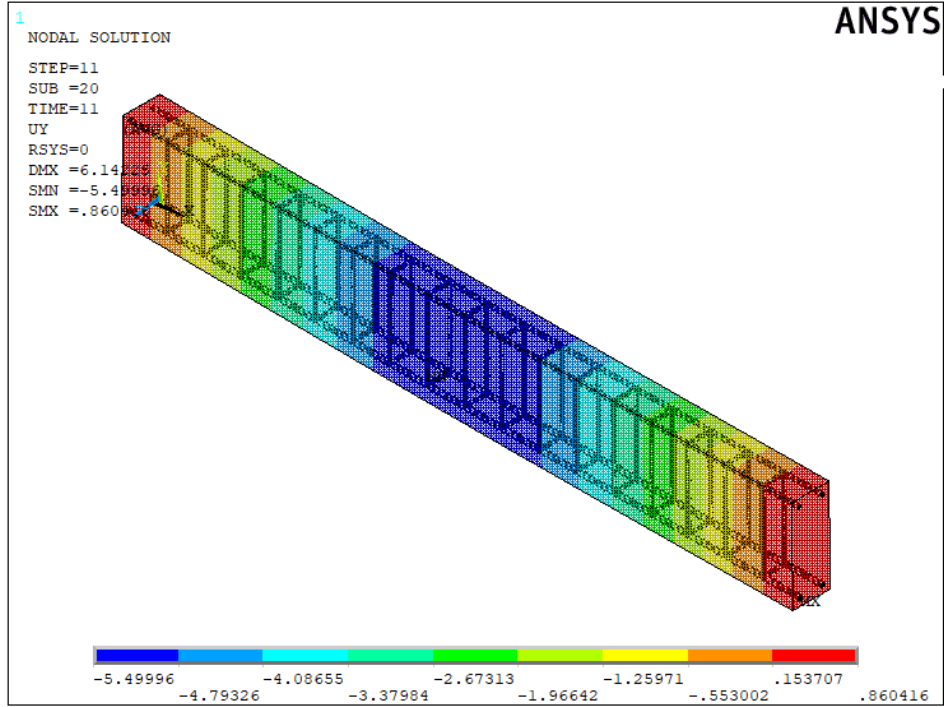
Şekil 3.30. Üç boyutlu sonlu elaman kiriş model



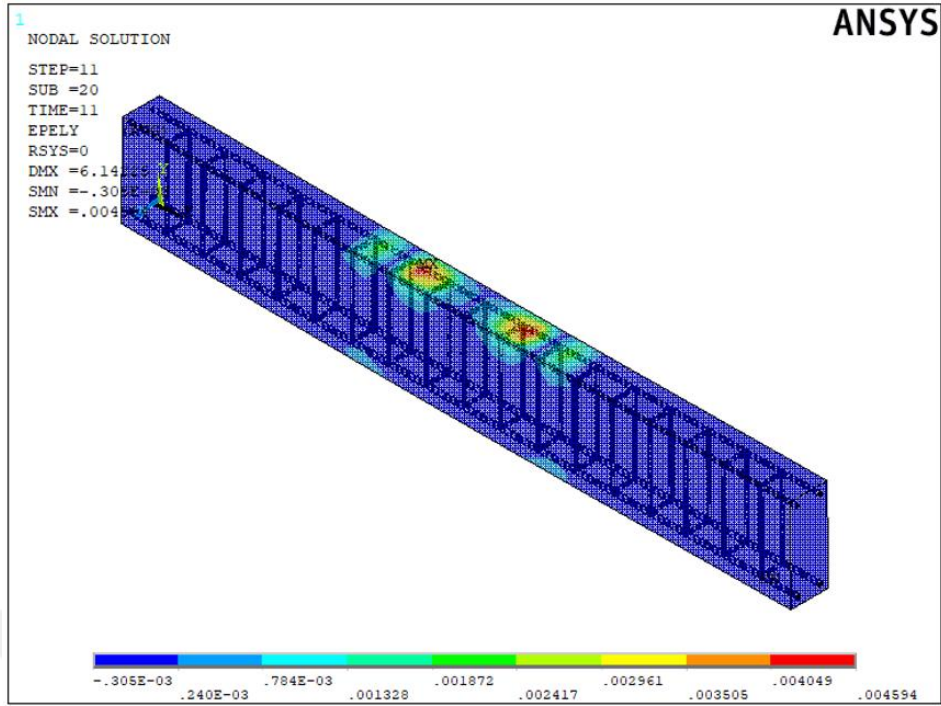
Şekil 3.31 Boyuna donatı ve etriye detay görünümü



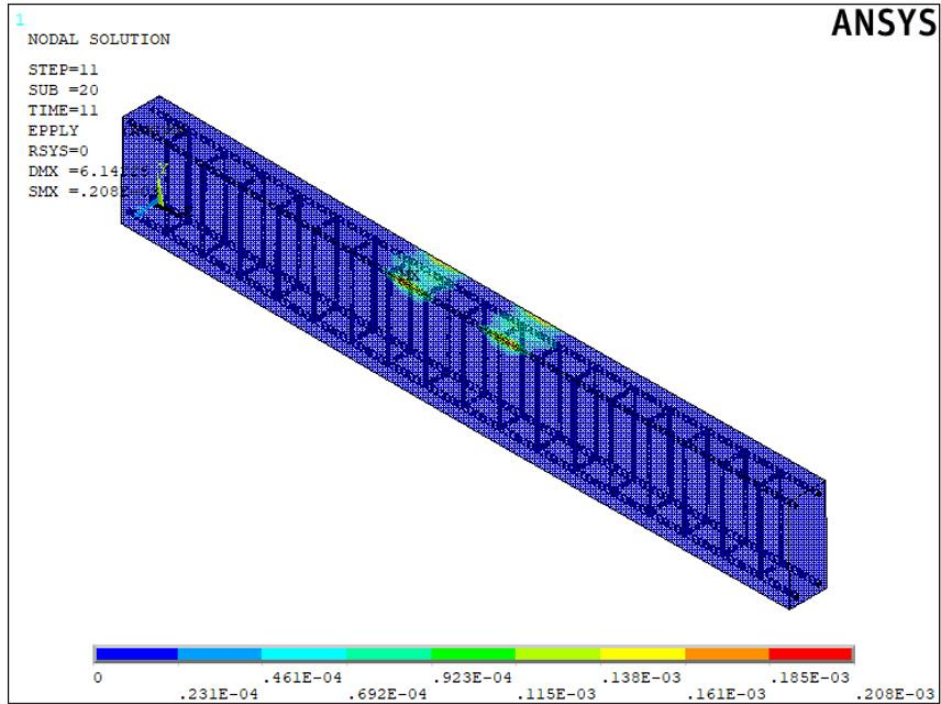
Şekil 3.32 Kiriş sonlu eleman modeli üzerinde oluşan mesnet reaksiyonları



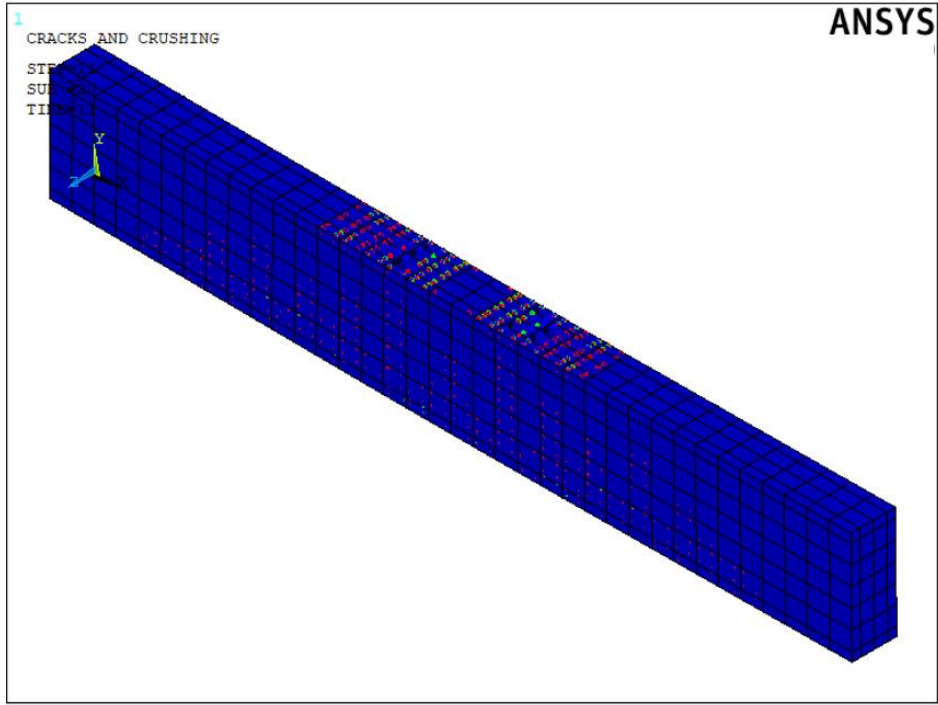
Şekil 3.33 Düşey doğrultuda oluşan yerdeğiştirme



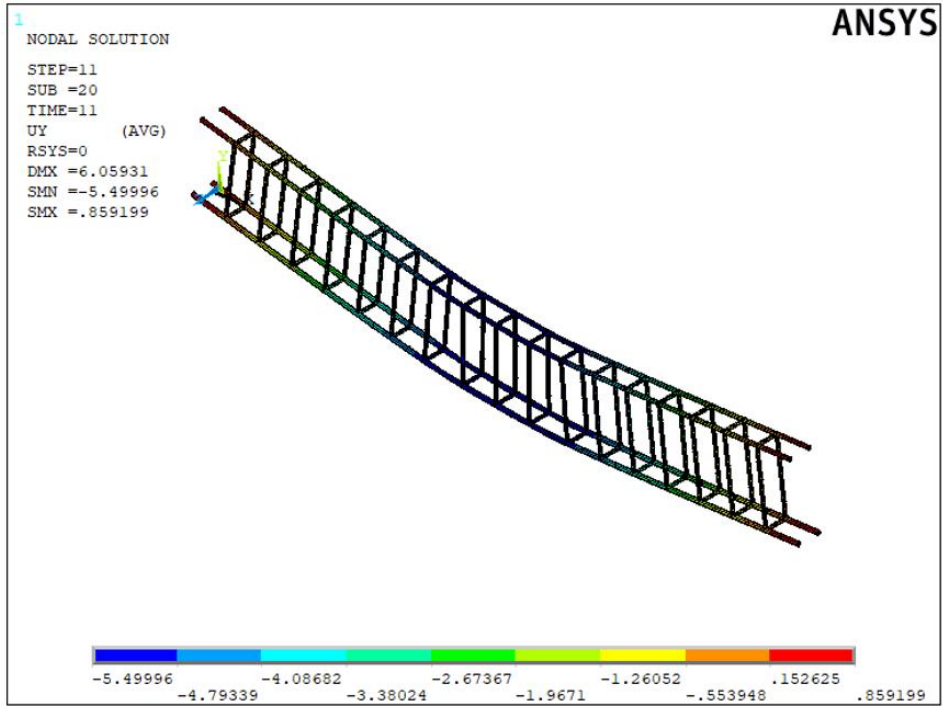
Şekil 3.34 Düşey doğrultuda oluşan elastik deformasyon.



Şekil 3.35 Düşey doğrultuda oluşan plastik deformasyon.



Şekil 3.36 Kirişte meydana gelen çatlaklar.



Şekil 3.37 Donatılarda meydana gelen düşey yerdeğiştirme.



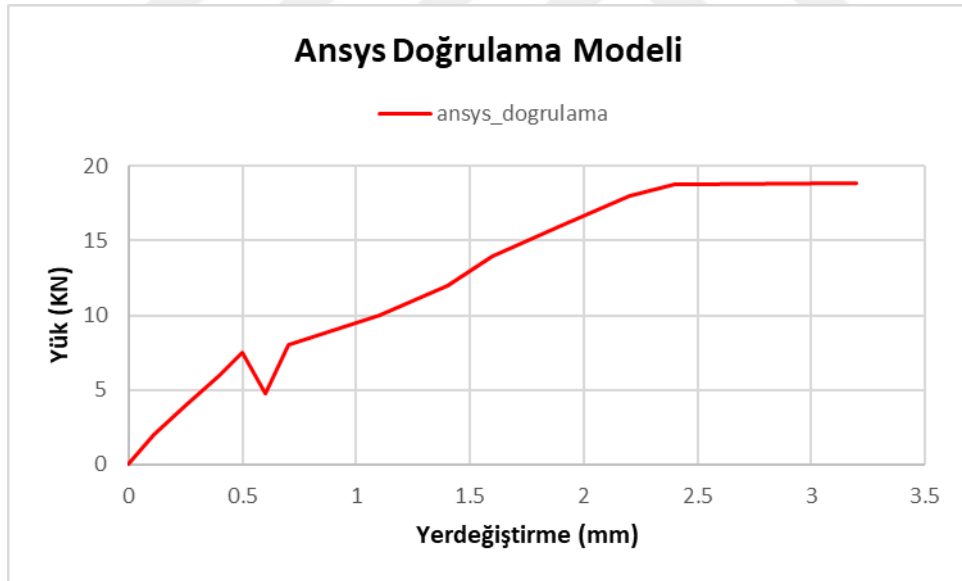
Şekil 3.38 Donatılarda meydana gelen birincil asal gerilmeler.



Şekil 3.39 Donatılarda meydana gelen plastik eşdeğer stres.

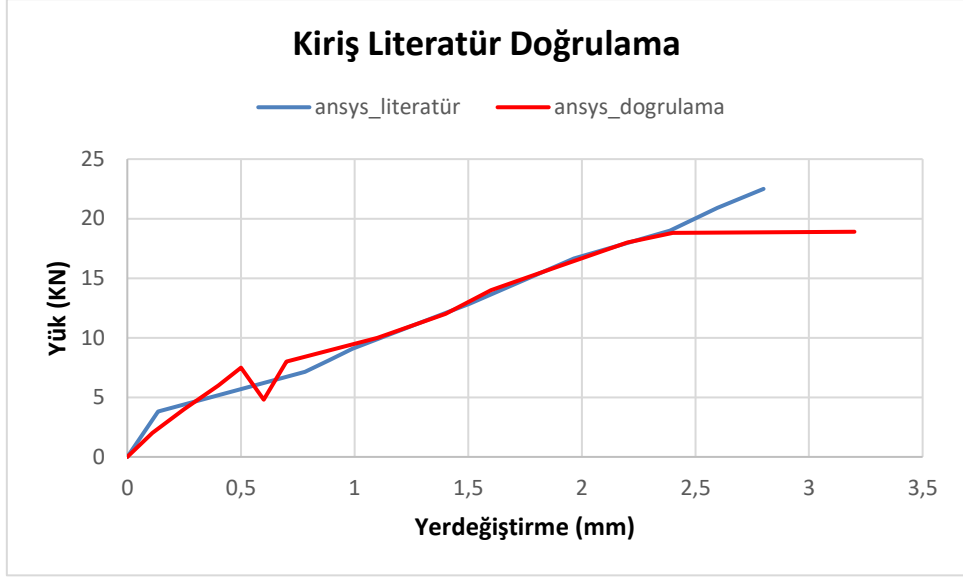


Şekil 3.40 Donatılarda meydana gelen plastik deformasyon.



Şekil 3.41 Ansys doğrulama modelinde kiriş yükleme sonrasında elde edilen kiriş orta noktası yerdeğiştirme.

Literatürde yayınlanmış bir makalede elde edilen ansys sonuçları ve bu tez çalışması kapsamında betonarme kiriş elemanın sonuçları aşağıda şekil 3.42’de kıyaslanmıştır.



Şekil 3.42 Elde edilen sonuçların literatürdeki deney ve nümerik analizlerle kıyaslanması.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 4.1 BETONARME ÇERÇEVELERİN İMALATI VE BETON BASINÇ TESTLERİ

İki adet eş betonarme çerçeve imal edilmesi planlanmış ve kesit geometri özellikleri belirlendikten sonra laboratuvarında gerekli işlemlere başlanılmıştır. Bunlar birincisi referans çerçeve olup diğer çerçeve GFRP plaka ile güçlendirilmesi planlanan 8 cm x 8 cm' lik kolon ve kiriş en kesitlerine sahip, eni 88 cm, boyu 128 cm olan betonarme çerçevelerdir.

Kolon ve kirişlerde 4 adet  $\Phi 5$  boyuna donatı yerleştirilmiştir. Etriyeler ise  $\Phi 5$  kesitinde olup 15cm aralıklar ile yerleştirilmiştir. Kolon ve kirişlerdeki donatı oranı TS500 de tanımlı minimum donatı oranı şartını sağlamaktadır. İlk olarak kalıpları hazırlanan çerçevelerin daha sonra demir bağlama, kalıpların yağlanması ve beton döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1'de iki adet çerçeve için kalıplar hazırlanıp yağ sürülmüş ve donatıları yerleştirildiği görülmektedir.



a) Kalıpların hazırlanması

b) yağlanması ve donatıların yerleştirilmesi

Şekil 4.1 Betonarme çerçeve kalıp ve donatı hazırlıkları.

Kalıp ve donatılar tamamlandıktan sonra beton hazırlama ve yerleştirme işlemi Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı malzemesi laboratuvarında yürütülmüştür. Betonarme çerçevelerin beton hazırlık aşaması Şekil 4.2’de verilmektedir. Beton karışımın hazırlandığı mikser Şekil 4.2a’da ve kalıplara yerleştirilen beton Şekil 4.2b’de verilmektedir.



a) beton hazırlanması

b) beton dökümü

**Şekil 4.2** Betonarme çerçevelerin beton hazırlık aşaması.

Beton basınç dayanımının belirlenmesi için üç adet küp numune yağlanıp şişleme yöntemi ile beton numune test kaplarına doldurulmuştur. Hazırlanan beton karışımından 3 adet küp numune alınmış ve Şekil 4.3a’da görüldüğü gibi kür havuzuna yerleştirilmiştir. Hazırlanan beton karışımı şişleme yöntemi ile kalıplara yerleştirilmiş ve beton priz almasıyla beraber kalıplar Şekil 4.3b’de görüldüğü gibi sökülüp düzenli olarak beton çerçeveler sulanmıştır.



a)Kür işlemi

b) Kalıpların sökümü

**Şekil 4.3** Beton test numunelerin kür havuzuna yerleştirilmesi ve kalıpları sökülen çerçeveler

Beton basınç dayanımlarının 28 gün sonra belirlenmesi planlanmış ve bu süre sonunda Şekil 4.4'de gösterildiği üzere beton basınç dayanım testleri yapılmıştır.

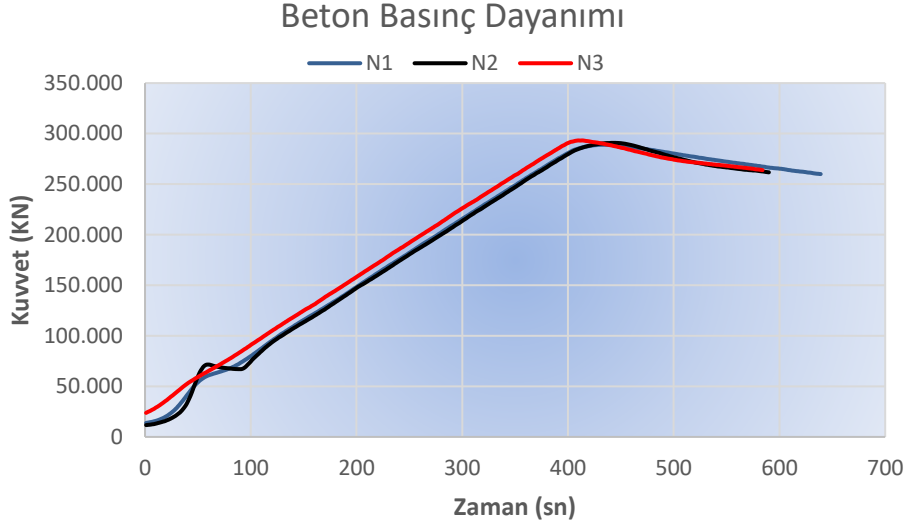


a) Küp numuneler

b) beton basınç dayanım testi

**Şekil 4.4** Beton test numunelerin basınç dayanımının belirlenmesi.

Kür havuzunda 28 bekleyen küp numunelerin beton basınç testlerinden elde edilen kuvvet-zaman eğrileri Şekil 4.5'te verilmiştir.



**Şekil 4.5** Beton basınç testlerinden elde edilen kuvvet-zaman grafiği.

Numune 1 (N1), numune 2 (N2) ve numune 3 (N3)'den elde edilen küp numune basınç dayanımları ortalama 13.04 MPa olarak elde edilmiştir. Beton küplerin tamamına ait elde edilen maksimum basınç dayanımları ise Çizelge 4.1'de yer almaktadır.

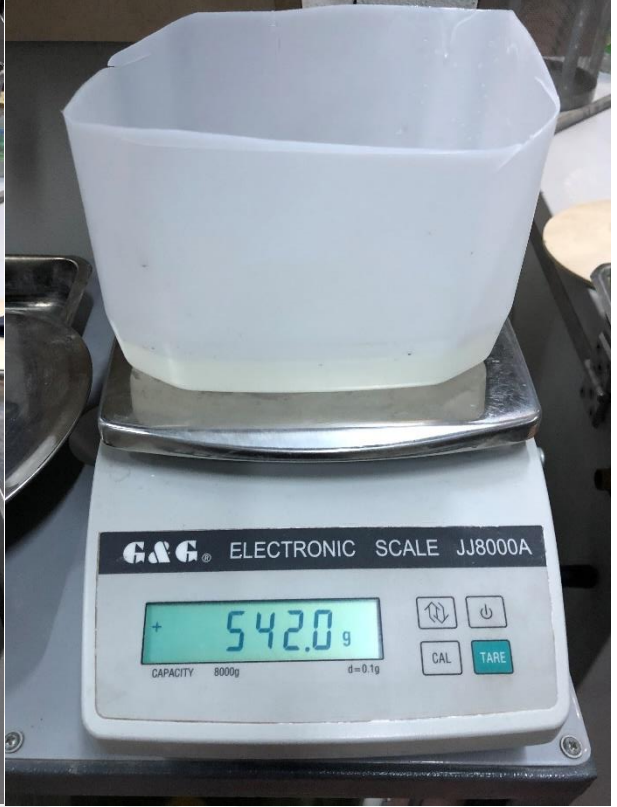
**Çizelge 4.1** Beton basınç deneyi sonuçları

Numune Nu.	Beton Basınç Dayanımı (MPa)
1	12.85
2	12.96
3	13.30
Ortalama	13.04

GFRP kompozit plakalar betonarme çerçeveye her köşeye üç civata eklenerek ve laboratuvarında hazırlanan epoxy yardımı ile tatbik edilmiştir. Epoksi ve reçine miktarları ölçülerek tavsiye edilen belirli oranlarda tartılıp karışım yapılmıştır. Elde edilen epoksi betonarme çerçevede plakaların yerleştirileceği yüzeylere tatbik edilmiştir. Aşağıdaki şekil 4.6'da kabın darası alınarak sırasıyla epoksi reçinesi ve epoksi miktarları verilmiştir bunlar 85 gram darası, 457 gram reçine ve 121 gram epoksi eklenerek bağlayıcı özelliğe sahip malzeme elde edilmiştir. Epoxy bileşenleri hassas terazi kullanılarak 1:3.78 oranın karşılık gelecek bir birleşimle esas yapıştırıcıyı oluşturmuştur. Oluşturulan bu karışımda dara (85 gr) hariç 457 gr birinci bileşenden ve 121 gram ikinci bileşenden kullanılmıştır. Karışımların hazırlanışı Şekil 4.6 da verilmiştir. Hazırlanan karışım homojen bir dağılım alıncaya kadar yaklaşık 5-10 dk arası karıştırılmıştır.



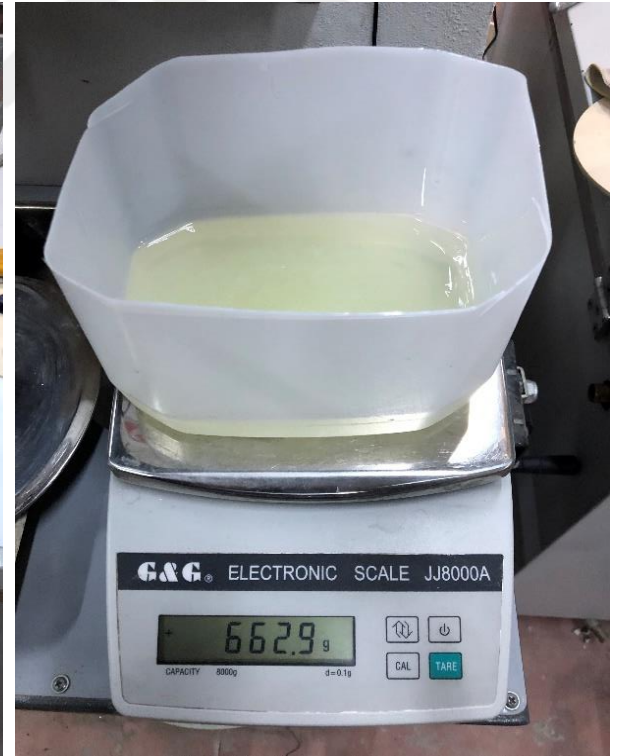
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.6 Epoksinin hazırlanması ve tatbiki.

Şekil 4.6 (devam ediyor)



e)

f)

GFRP plakaların epoksi sürülen yüzeylere bulonlarla tatbiki aşağıda Şekil 4.7’de verilmektedir.



a)

b)



c)

Şekil 4.7 GFRP plakaların çerçeveye tatbiki



a)



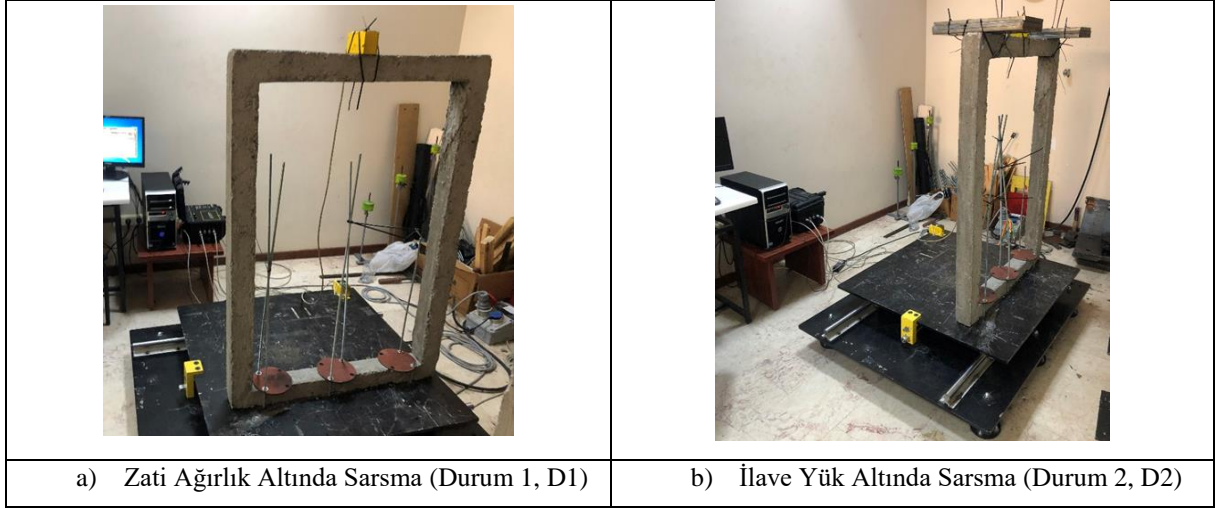
b)

Şekil 4.8 Mesnetleri tatbik edilmiş ve teste hazır çerçeveler.

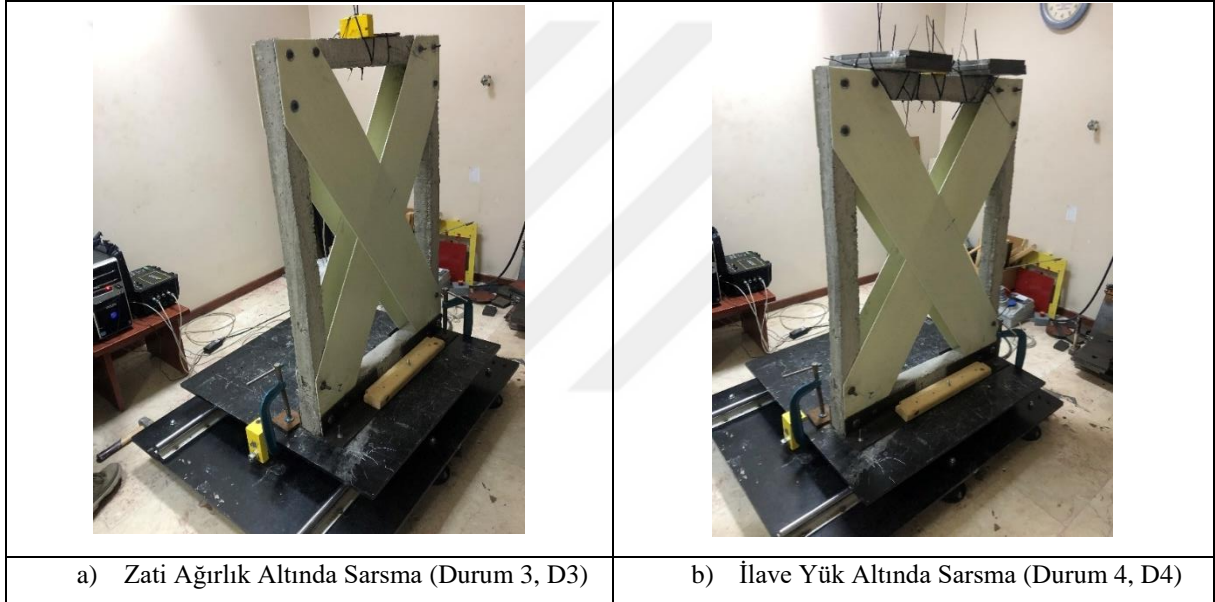
## 4.2 DEPREM DENEYLERİ

### 4.2.1 Dört Farklı Durum için Sarsma Test Düzenekleri

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Yapı Laboratuvarında imal ettiğimiz 2 adet betonarme çerçevelerin sismik deneysel analizleri Sakarya Üniversitesinde sarsma tablasında yürütülmüştür. Çerçeve zati ağırlığı ve yaklaşık çerçeve ağırlığının %64'i (45 kg) kat seviyesinde (üst kiriş üzeri) sabitlenerek ilave kütle ile dinamik karakteristik özellikleri incelenmiştir. Referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeveler, betonarme çerçevenin zati ağırlığı altında ve 45 kg dış yük altında olacak şekilde 4 farklı durum için sismik analizler gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9-4.10'da 4 durum sismik sarsma test düzeneği verilmektedir.



**Şekil 4.9** Referans (güçlendirilmemiş) Çerçevenin Sarsma Test Düzeni

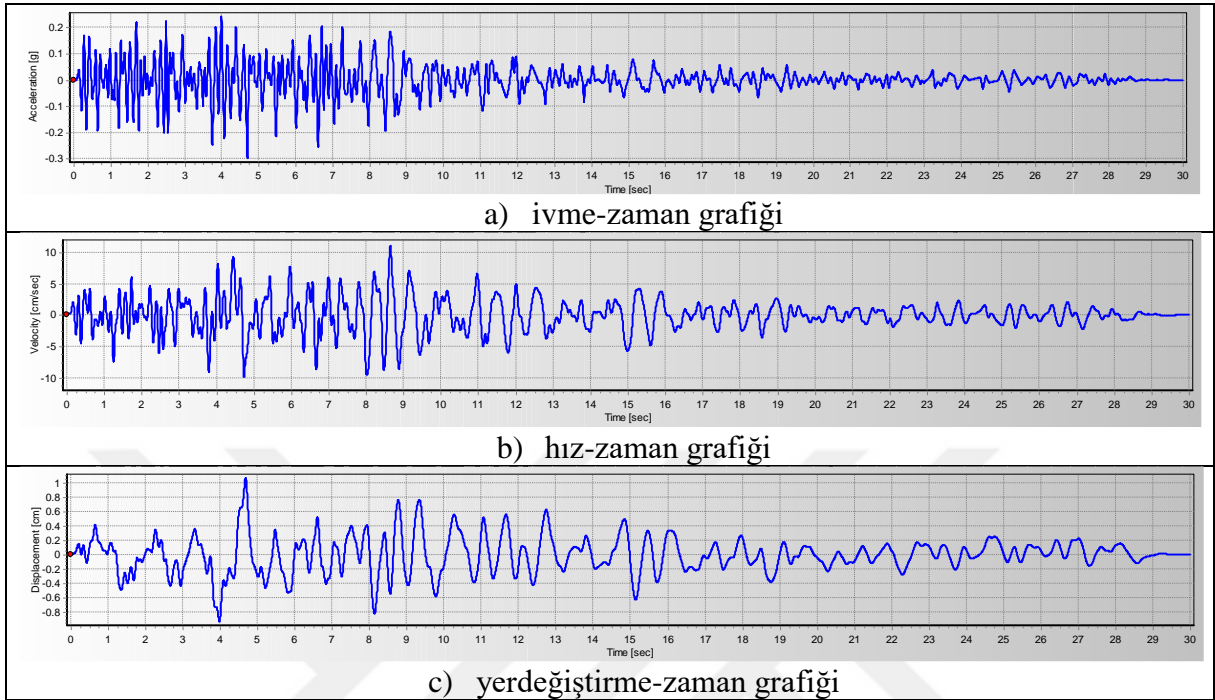


**Şekil 4.10** Çaprazlarla Güçlendirilmiş Çerçevenin Sarsma Test Düzeni.

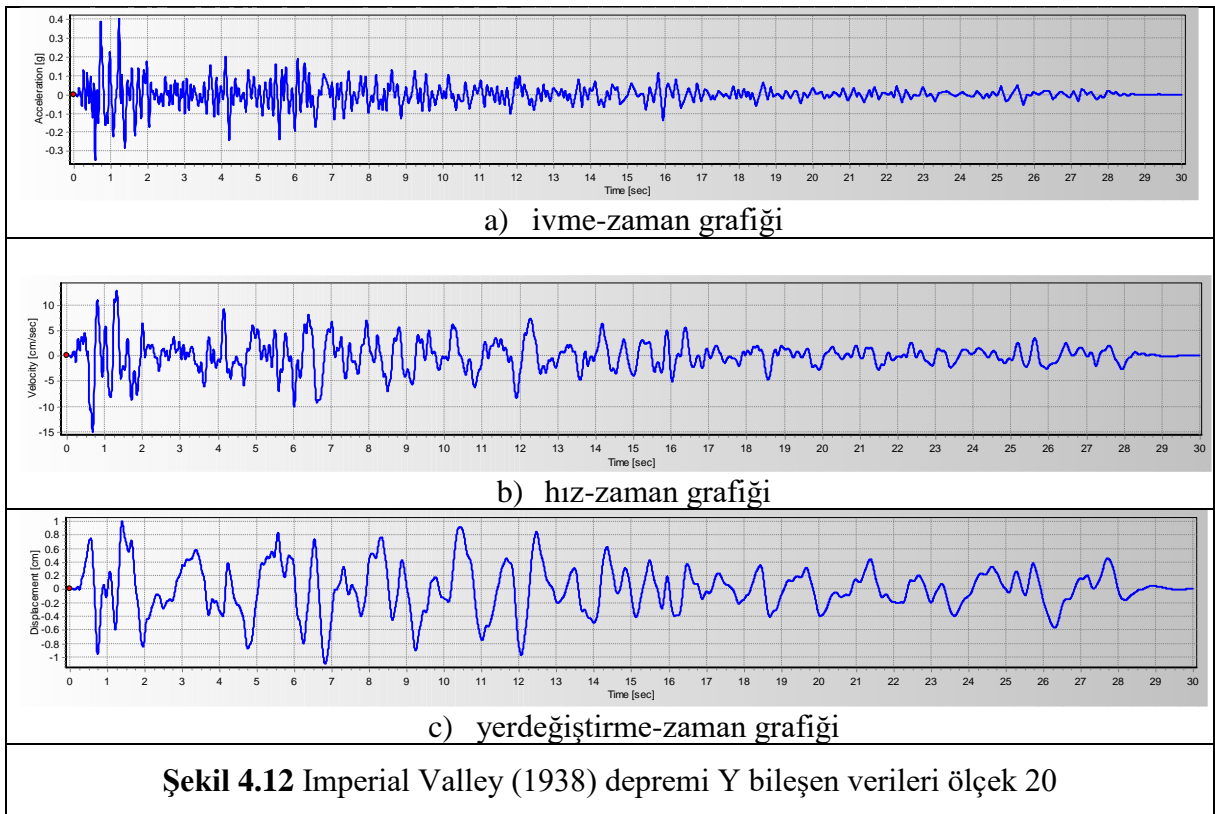
#### 4.2.2 Sarsma Tablası Testlerinde Kullanılan Depremler

7 farklı depremin farklı ölçeklerdeki ivme kayıtları altında toplam 124 adet dinamik test sarsma tablasında yapılmıştır. Kullanılan depremler 1938 Imperial Valley, 1995 Kobe, 1999 Chi-Chi, 1999 Düzce, 2019 DASK1, 2019 DASK2 ve 2019 DASK3'tür (DASK 2019). Deprem kayıtları PEER Ground Motion Database (PEER) internet adresinden ve DASK Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Yarışması'ndan temin edilmiştir ve deprem kayıtlarının betonarme çerçeveler üzerinde yıkıcı etkisi olmayacak düzeyde deprem yer ivme hareketlerine maruz bırakılmışlardır. Kat yüksekliğine yerleştiren bir diğer ivme ölçerle çerçevenin yapmış olduğu rölatif yer hareketleri hesaplanmıştır.

Deprem analizlerinde kullanılan ivme kayıtları aşağıda şekillerde verilmektedir. Şekil 4.11-4.12’de Imperial Valley (1938) depremi verileri sunulmuştur.

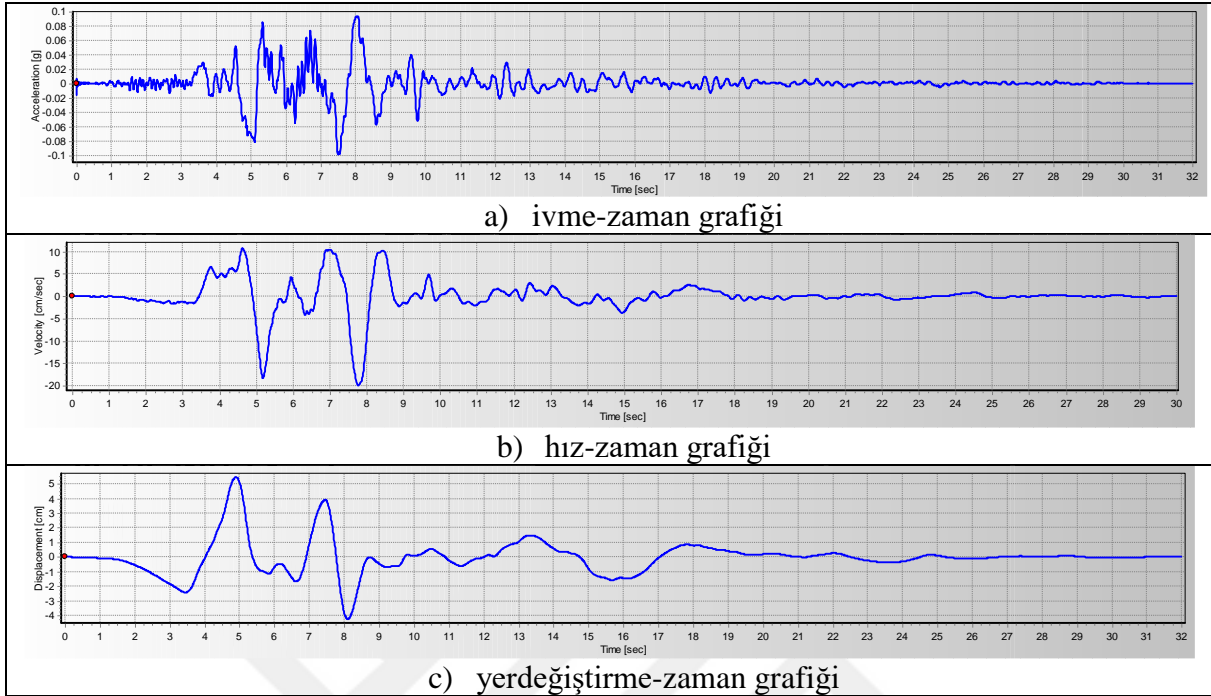


Şekil 4.11 Imperial Valley (1938) depremi X bileşen verileri ölçek 20

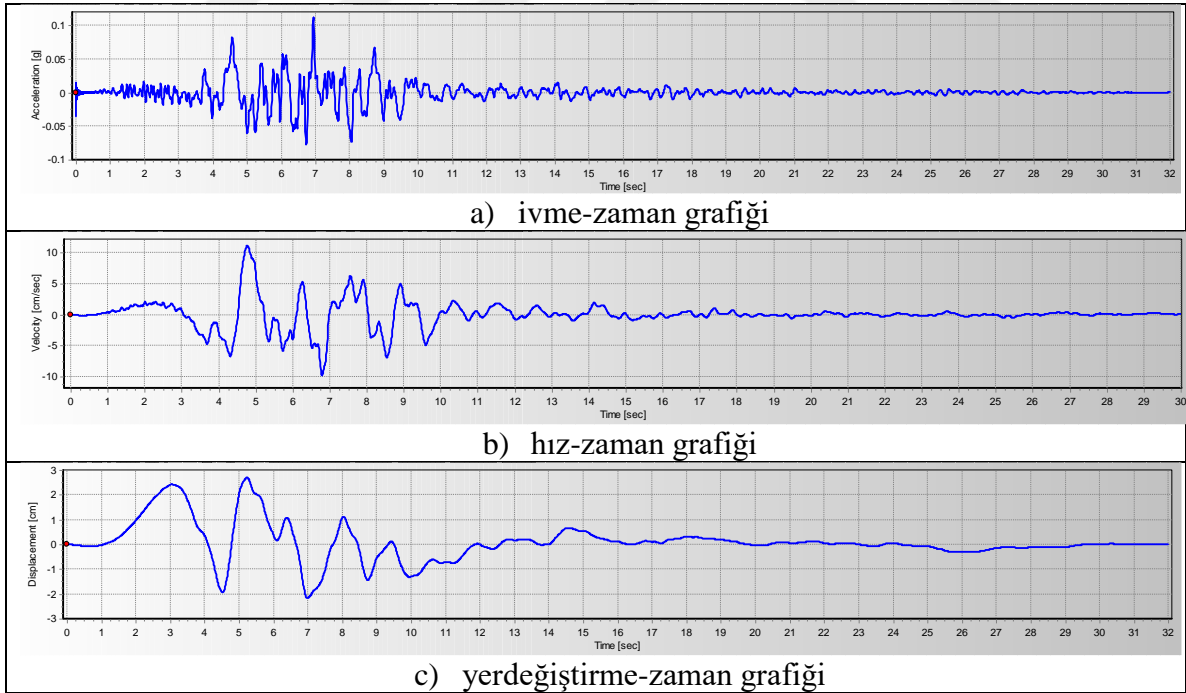


Şekil 4.12 Imperial Valley (1938) depremi Y bileşen verileri ölçek 20

Şekil 4.13-4.14’de Kobe (1995) depremi verileri sunulmuştur.

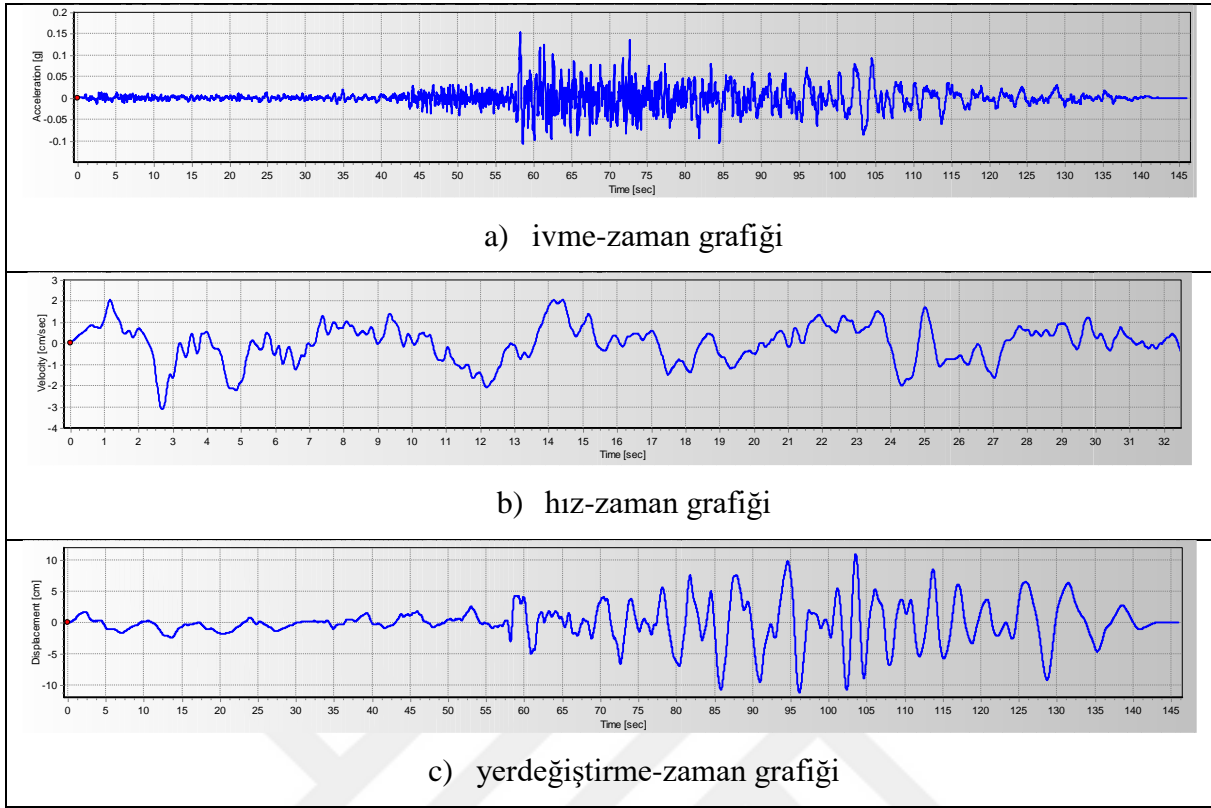


Şekil 4.13 Kobe (1995) depremi X bileşen verileri ölçek 0.36

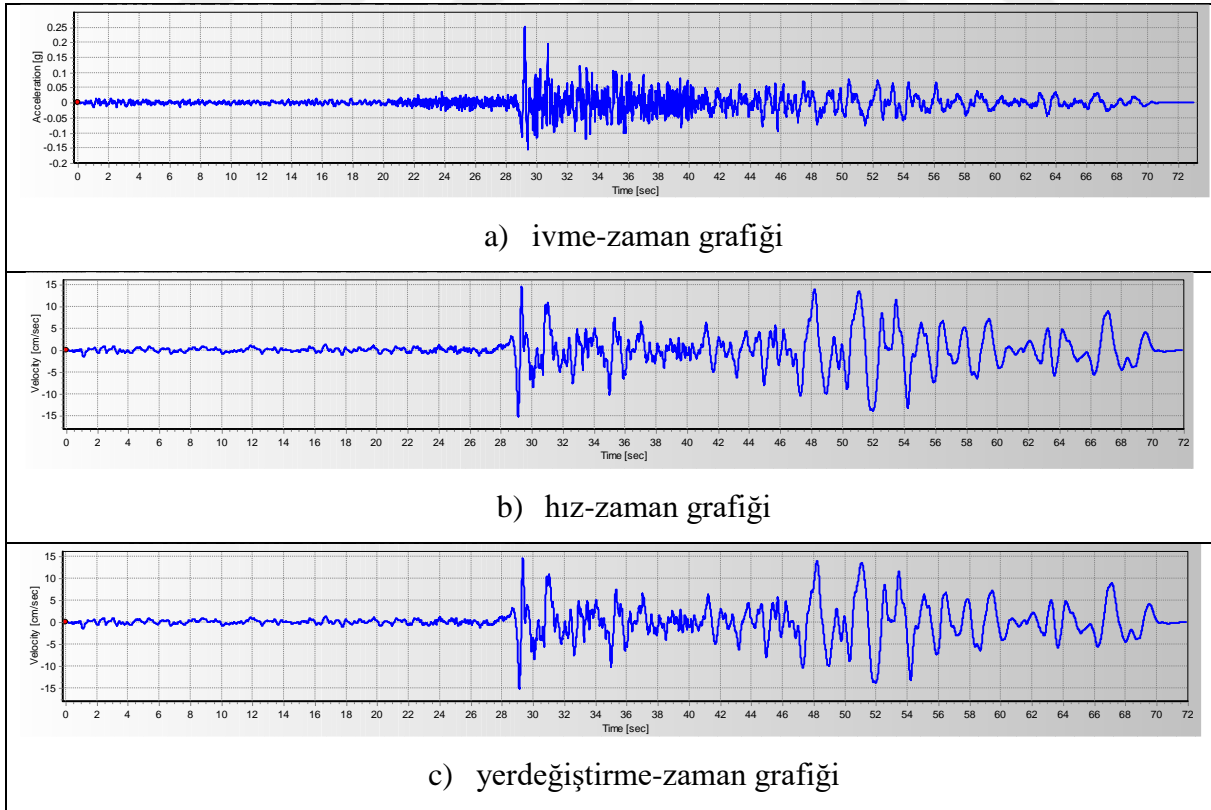


Şekil 4.14 Kobe (1995) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.36

Şekil 4.15-4.16'da Chi-Chi (1999) depremi verileri sunulmuştur.

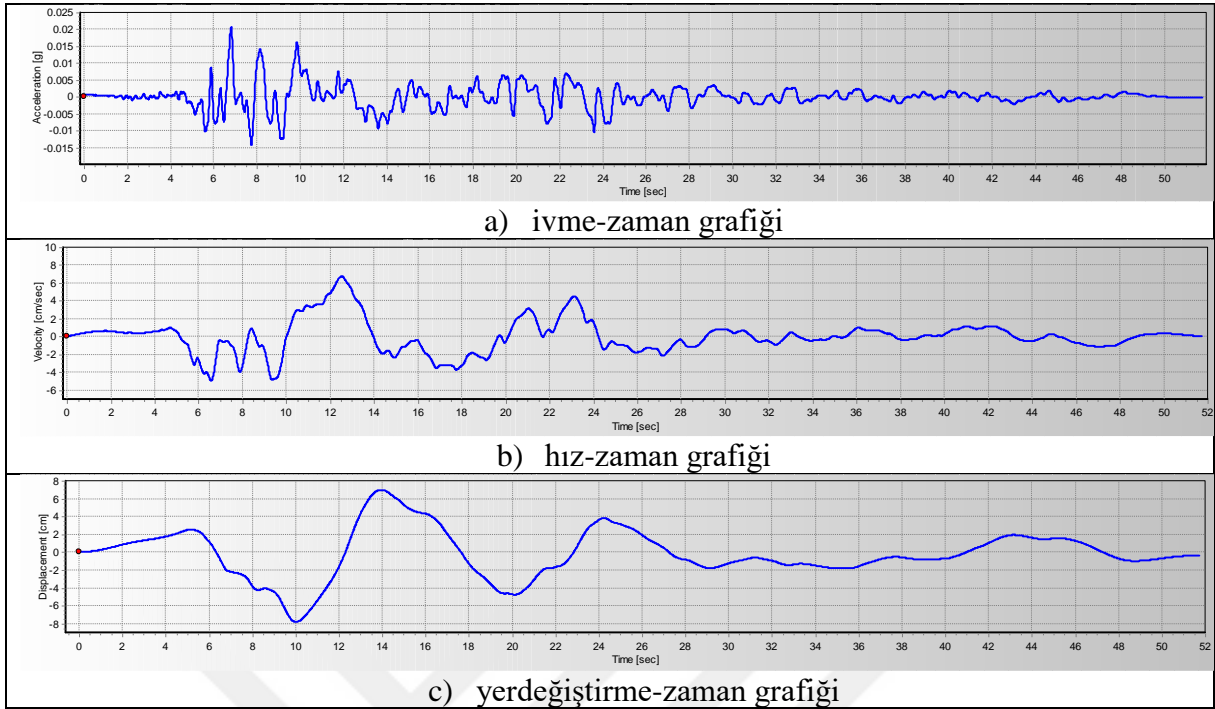


Şekil 4.15 Chi-Chi (1999) depremi X bileşen verileri ölçek 8



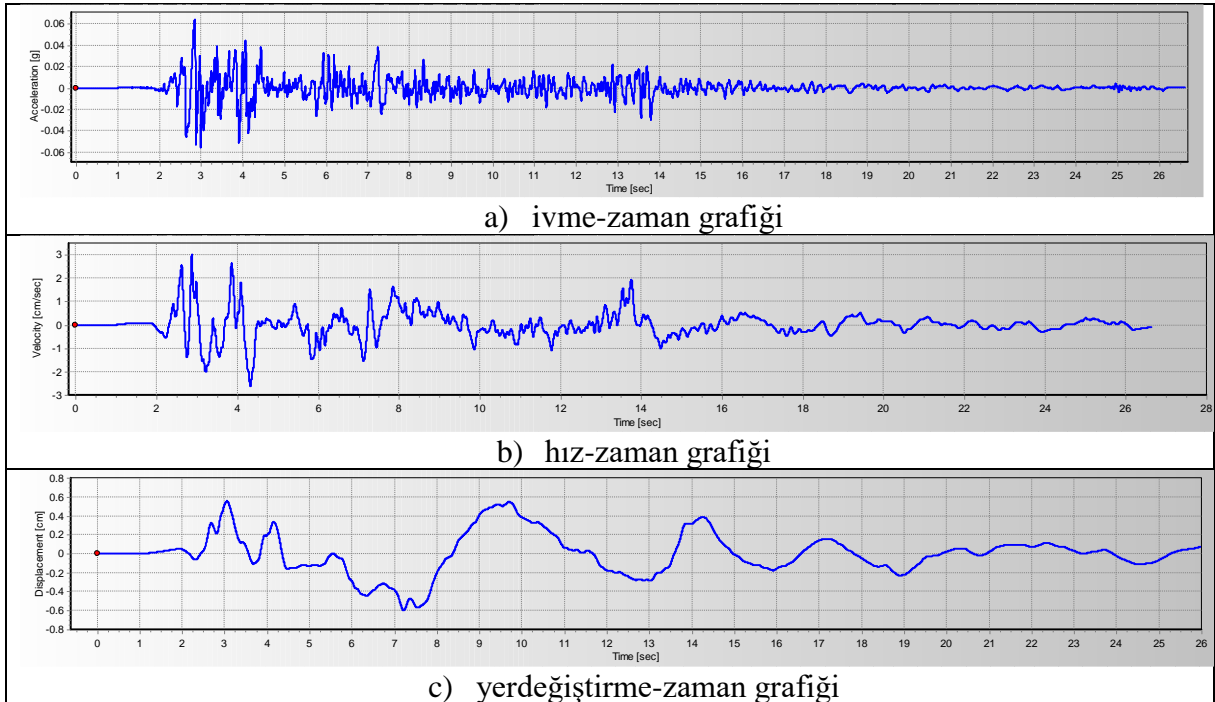
Şekil 4.16 Chi-Chi (1999) depremi Y bileşen verileri ölçek 8

Şekil 4.17’de Düzce (1999) depremi verileri sunulmuştur.



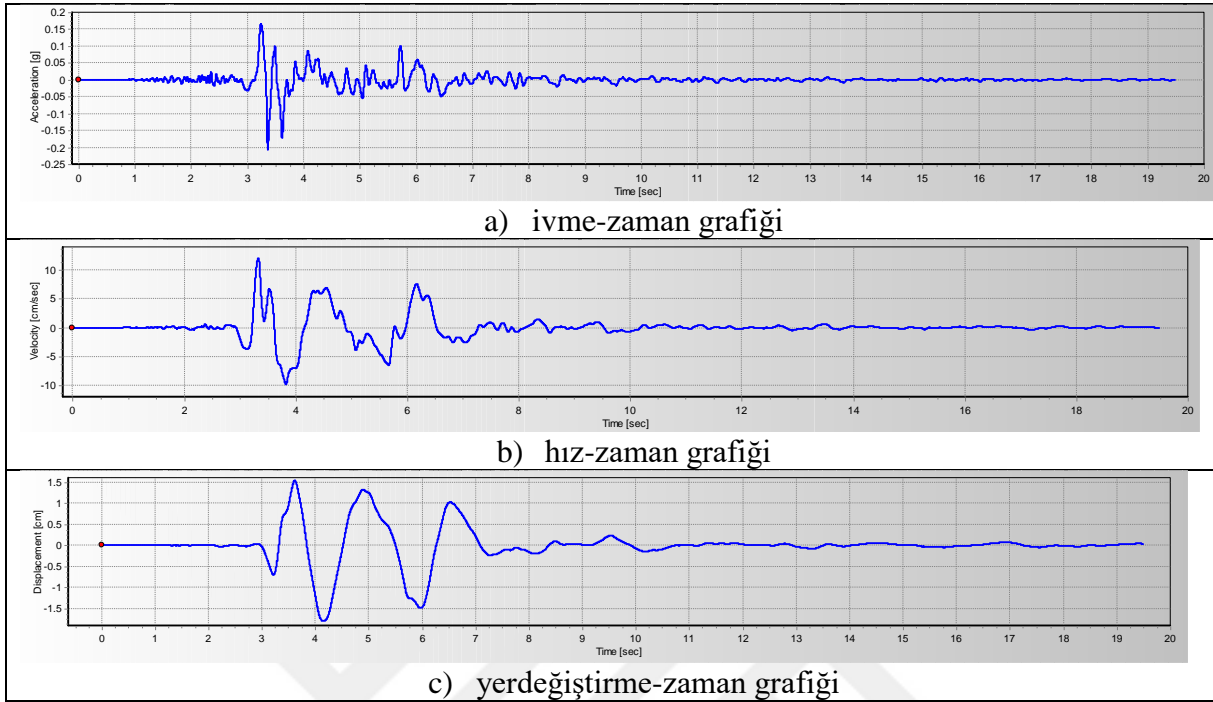
Şekil 4.17 Düzce (1999) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.04

DASK yarışmasında kullanılan 2019 DASK1 deprem kaydına ait datalar aşağıda Şekil 4.18’de verilmektedir.



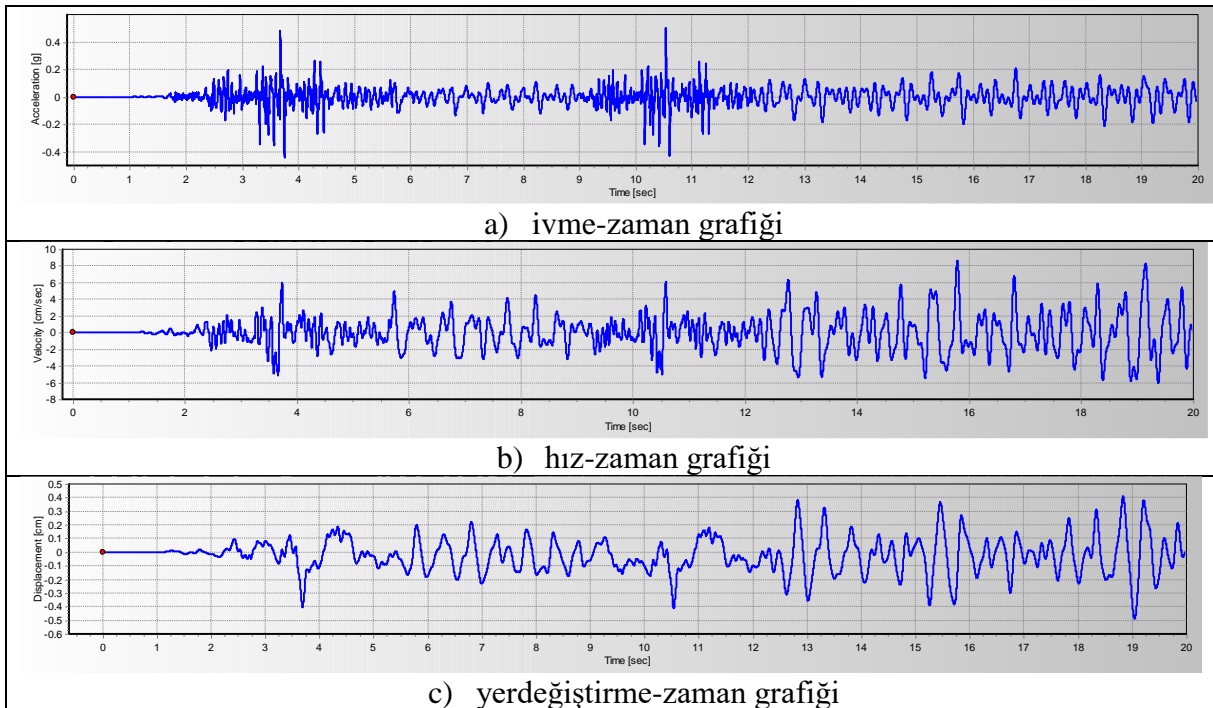
Şekil 4.18 DASK1 (2019) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.02

DASK yarışmasında kullanılan 2019 DASK2 deprem kaydına ait datalar aşağıda Şekil 4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.19 DASK2 (2019) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.02

DASK yarışmasında kullanılan 2019 DASK3 deprem kaydına ait datalar aşağıda Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.20 DASK3 (2019) depremi Y bileşen verileri ölçek 0.02

### 4.2.3 Sarsma Testlerinden Betonarme Çerçevesinin Dinamik Özelliklerinin Belirlenmesi

Öncelikle dört farklı durum için ayrı ayrı betonarme çerçevenin ağırlık, periyot, frekans, sönüm oranı gibi dinamik karakteristik özellikleri yapılan testlerle belirlenmiştir. 4 durum için çerçevelere ait periyot frekans verileri aşağıda Çizelge 4.2’de verilmektedir.

**Çizelge 4.2** Çerçevelere ait dinamik parametreler

Çerçeve	Ağırlık (kg)	Periyot (sn)	Frekans (Hz)	Sönüm Oranı (%)
Referans	70	0.048	22.25	6.90
	115	0.129	7.75	5.40
Güçlendirilmiş	80	0.045	22.30	7.03
	125	0.100	10.10	6.90

Serbest titreşim yapılarak çerçevelere ait dinamik özellikler hesaplanmış ve Çizelge 4.2 de verilmiştir. Referans çerçevede ilave yüksüz durum için %6.90 sönüm oranı hesaplanmışken aynı çerçevede bu değer yüksüz çaprazlı çerçeve için %7.03 oranında hesap edilmiştir. Bu durumda güçlendirilmiş çerçevenin sönüm oranı referans çerçeveye göre %1.9 oranında daha fazla bir sönüm oranına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Her iki çerçeveye ilave yük eklenmesi durumunda ise referans çerçevenin sönüm oranı %5.40, güçlendirilmiş çerçevede ise bu oran %6.90 olarak hesap edilmiştir. İlave yük olmadan elde edilen sönüm oranında olduğu gibi çaprazla güçlendirilmiş ve ilave ağırlıklılar dikkate alındığında %27.7 oranında bir sönüm oranında artış meydana gelmiştir. Bu durumda betonarme çerçevede çaprazlı sistemler sönüm oranı artışı meydana getirmektedir. Serbest titreşim esnasında ardışık tepe ivme noktalarında meydana gelen logaritmik azalım oranı dikkate alınarak sönüm oranları hesaplanmıştır.

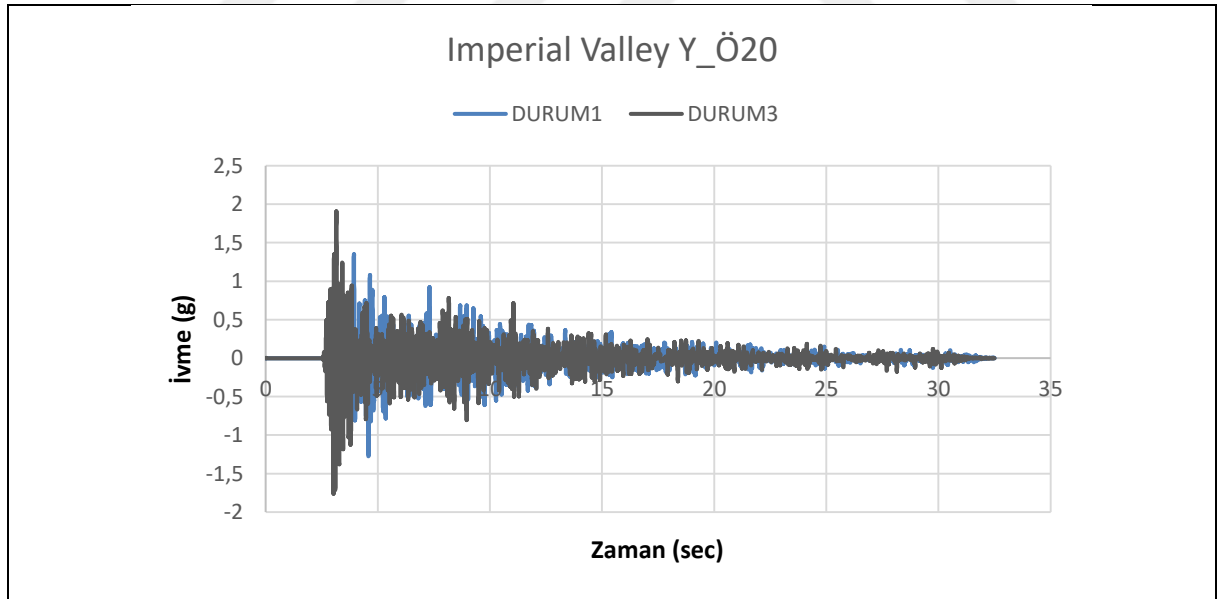
### 4.2.4 Sarsma Test Sonuçları

Bu kısımda çerçevelerin seçilen deprem hareketleri altında kat yer değiştirmeleri güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş çerçeveler için elde edilmiştir. Yapılan sarsma testlerinin yıkıcı olmaması göz önüne alınarak betonarme çerçevelere verilecek ivme değerleri türetilmiştir. 7 farklı deprem için üç ayrı ölçekli sismik veriler sarsma tablası testlerinde kullanılmıştır. Kullanılan depremler ve farklı ölçekleri aşağıda Çizelge 4.3’de verilmektedir

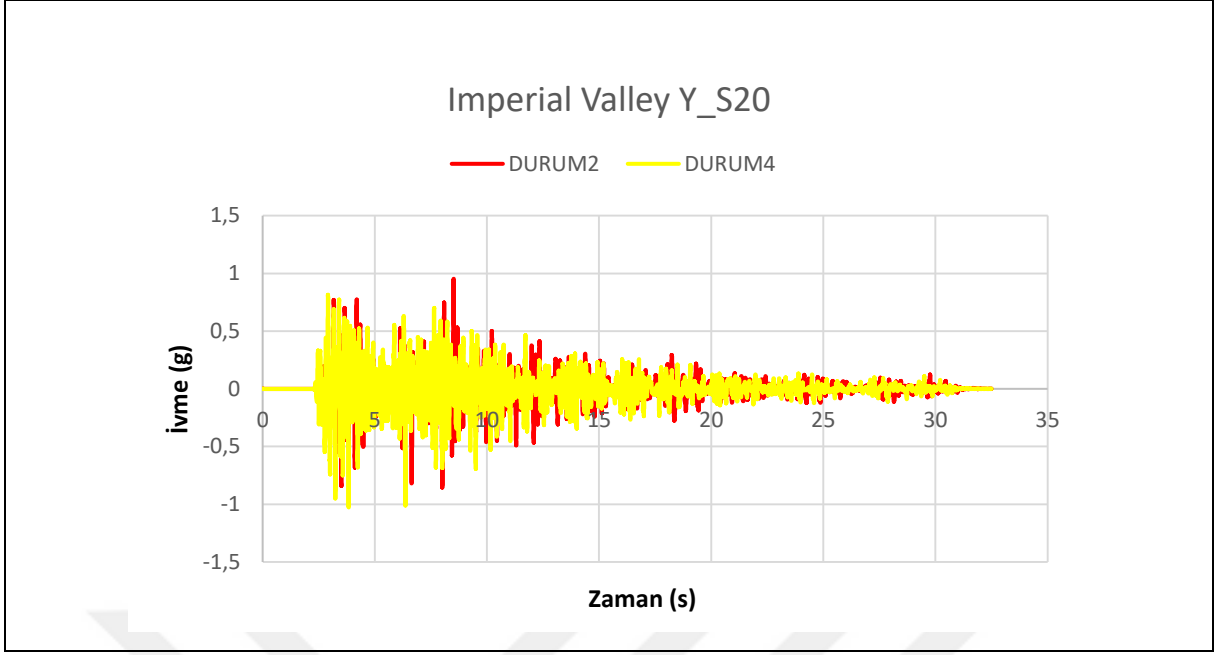
**Çizelge 4.3** Sismik analizlerde kullanılan depremler ve ölçekleri.

Depremler	Ölçek 1	Ölçek 2	Ölçek 3
1938 Imperial Valley	10	15	20
1995 Kobe	0.04	0.12	0.36
1999 Chi-Chi	1	4	8
1999 Düzce	0.015	0.03	0.04
2019 DASK 1	0.005	0.01	0.02
2019 DASK 2	0.005	0.01	0.02
2019 DASK 3	0.005	0.01	0.02

Yapılan analizlerde kullanılan ivme değerleri ölçeklendirmesinin hasarsız durum olacak şekilde dikkate alınarak seçilmesinden dolayı elde edilen yerdeğiştirme değerleri de oldukça küçüktür. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş (referans) çerçevelerde yapılan deprem deneyleri sonucunda elde edilen yerdeğiştirme değerleri oldukça yakın olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bundan dolayı sadece en büyük ölçekli sismik analiz sonuçları bu kısımda sunulmaktadır. Şekil 4.21-4.22'de 1938 Impreail Valley depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme zaman sonuçları sunulmaktadır.

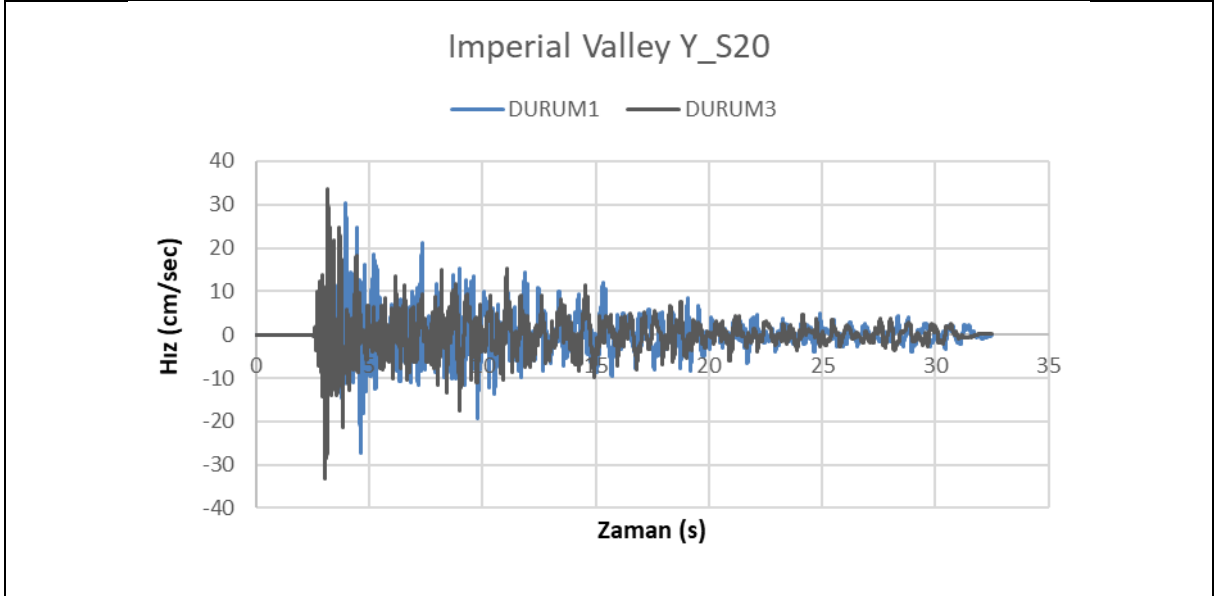


**Şekil 4.21** 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek: 20/1)

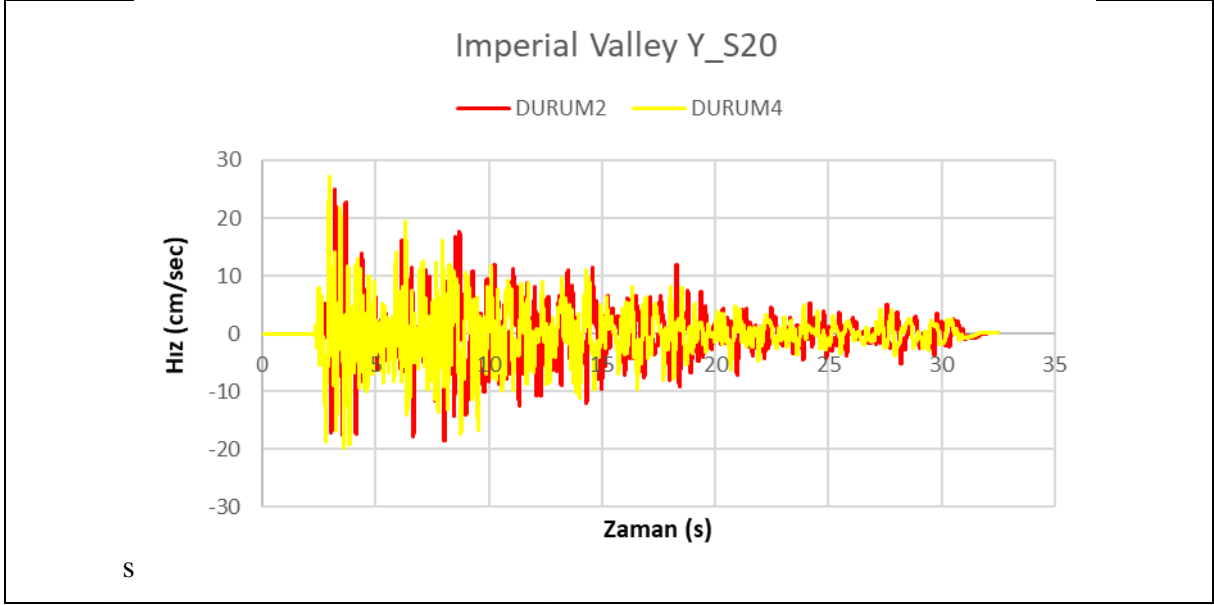


**Şekil 4.22** 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 20/1)

Aşağıda şekil 4.23-4.24’de 1938 Imperial Valley depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız zaman sonuçları sunulmaktadır.

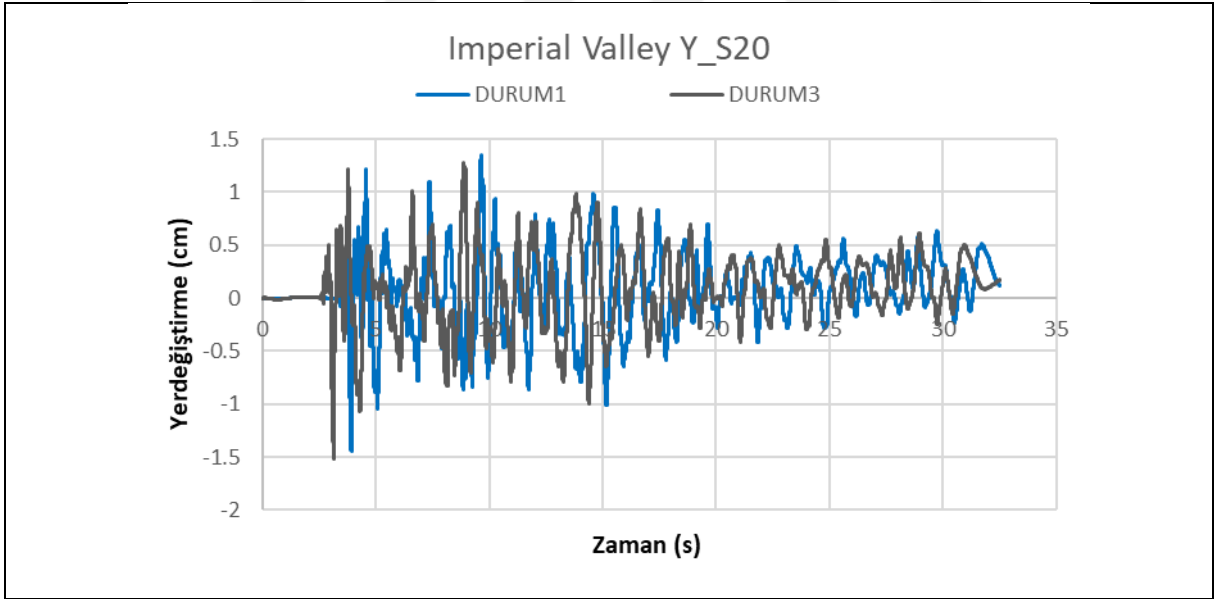


**Şekil 4.23** 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek: 20/1)

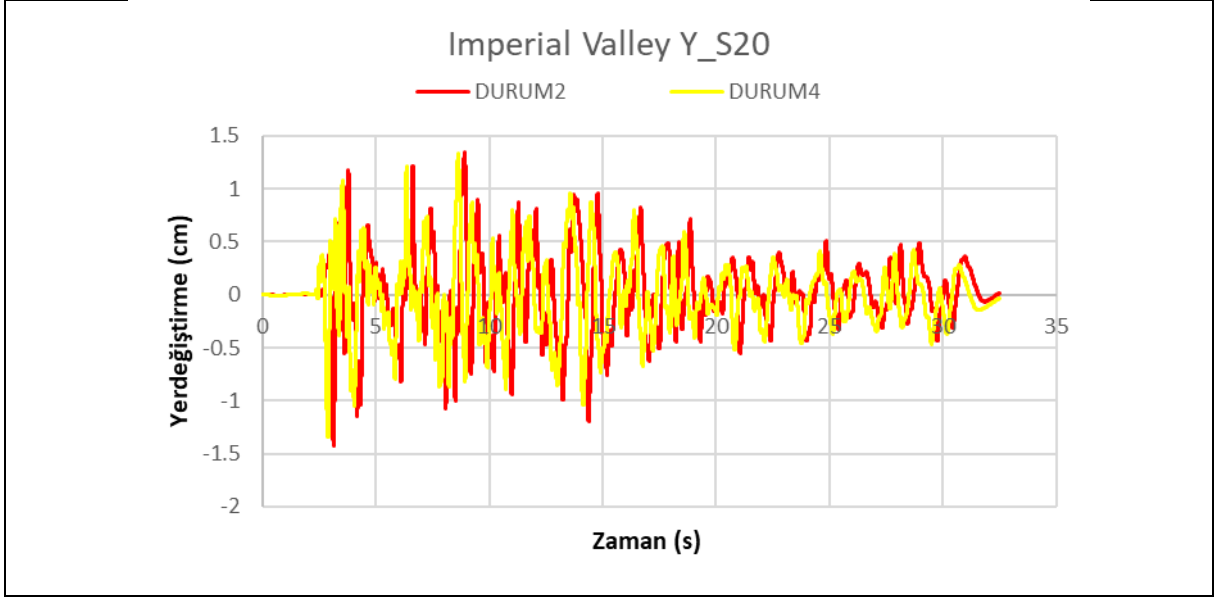


Şekil 4.24 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 20/1)

Aşağıda şekil 4.25-4.26'da 1938 Imperial Valley depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen kat ötelemelerine ait yerdeğiştirme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

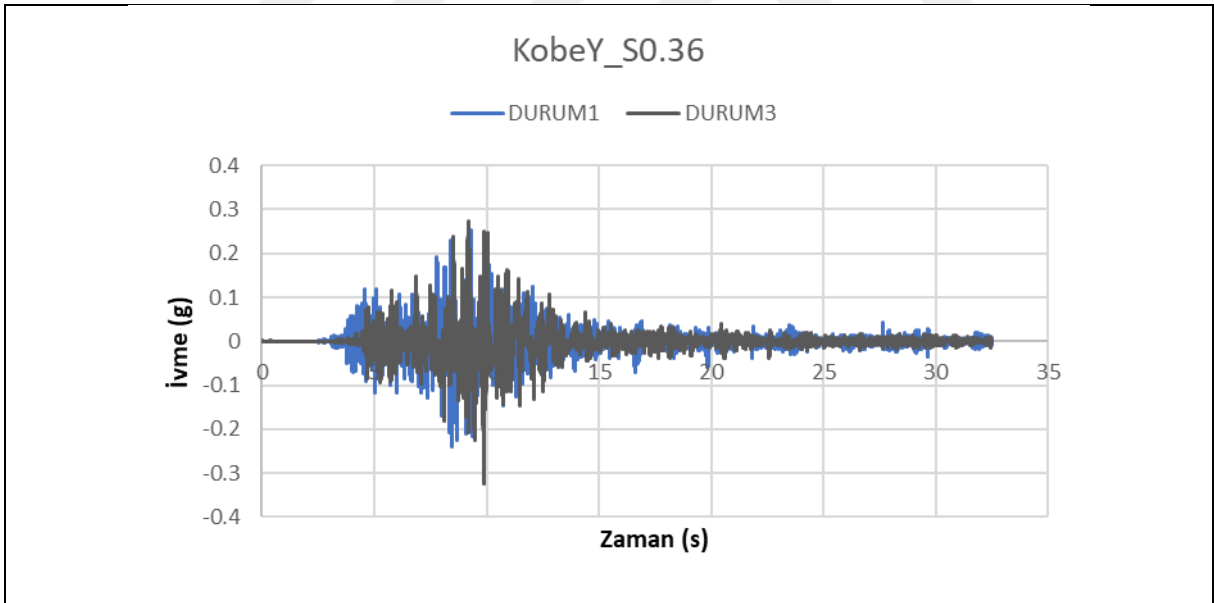


Şekil 4.25 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 20/1)

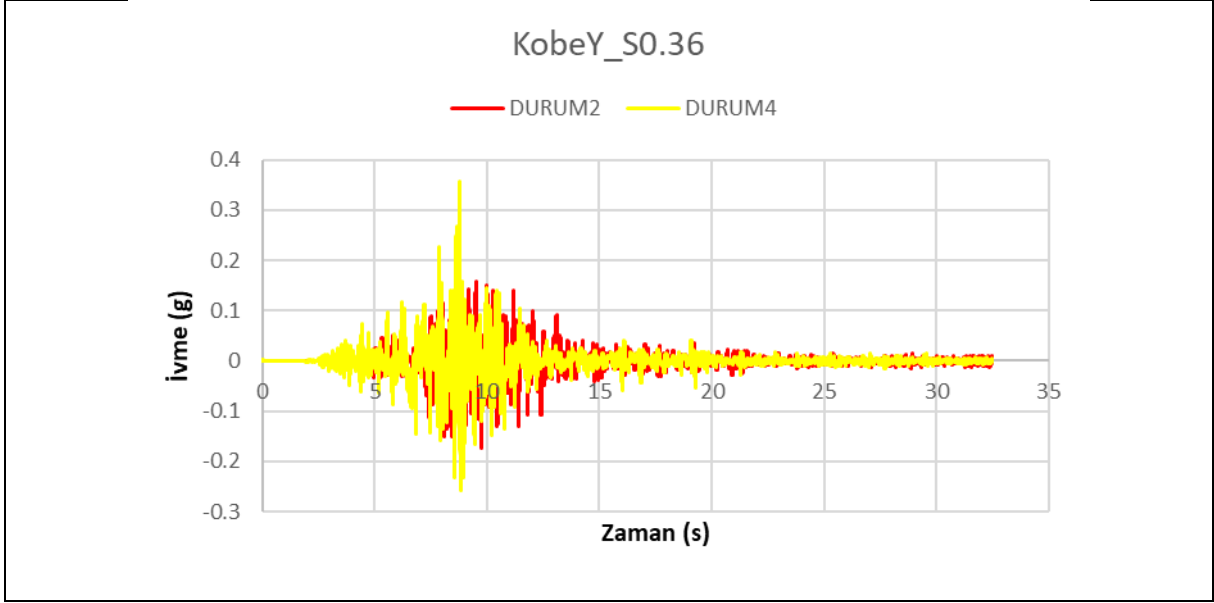


Şekil 4.26 1938 Imperial Valley Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 20/1)

Aşağıda şekil 4.27-4.28’de 1995 Kobe depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme zaman sonuçları sunulmaktadır.

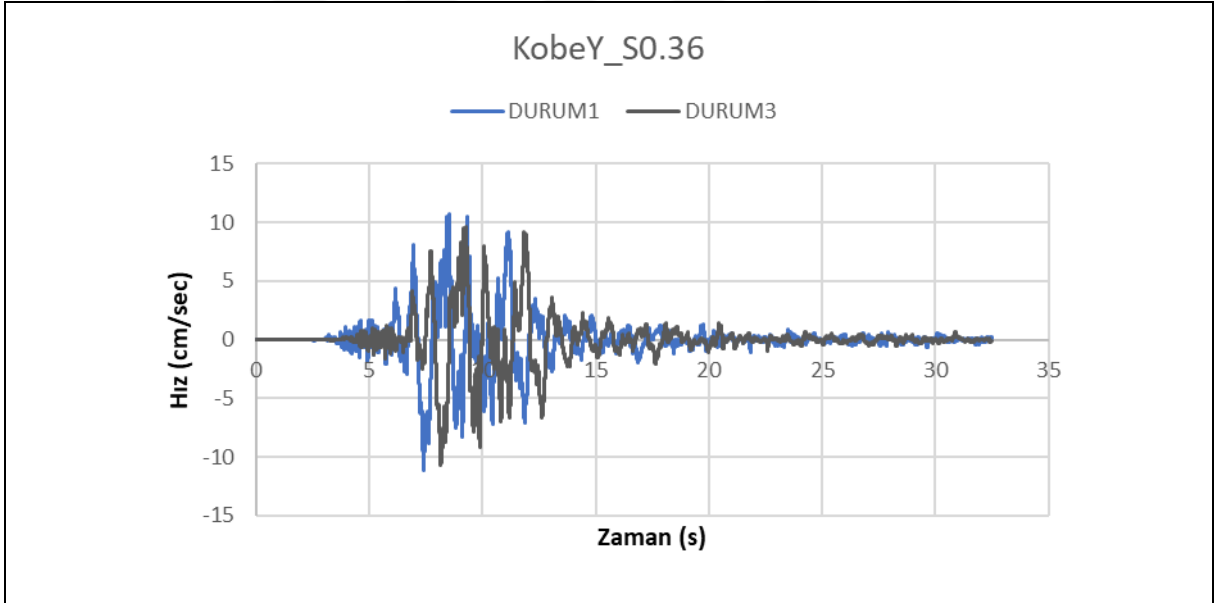


Şekil 4.27 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.36)

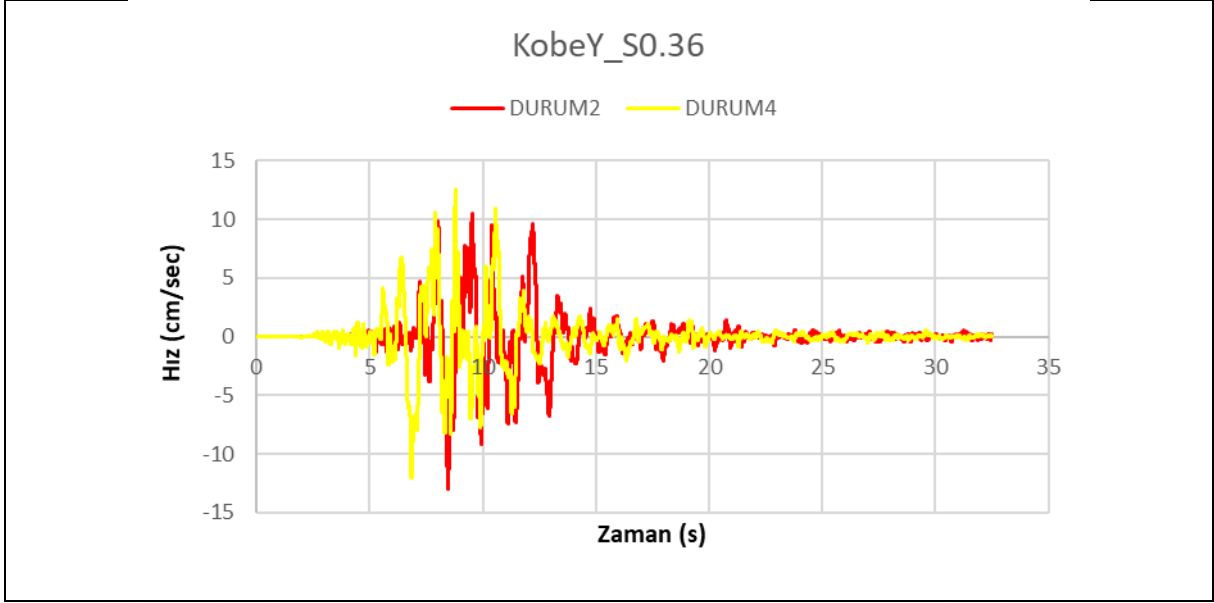


Şekil 4.28 1995 Kobe Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.36)

Aşağıda şekil 4.29-4.30'da 1995 Kobe depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız zaman sonuçları sunulmaktadır.

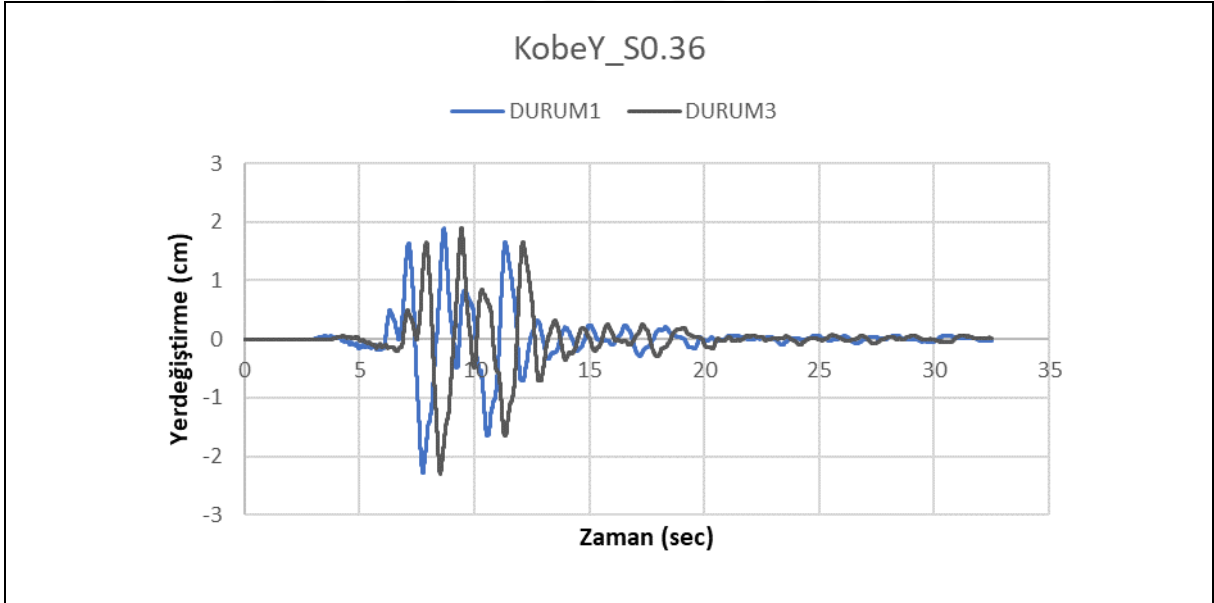


Şekil 4.29 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.36)

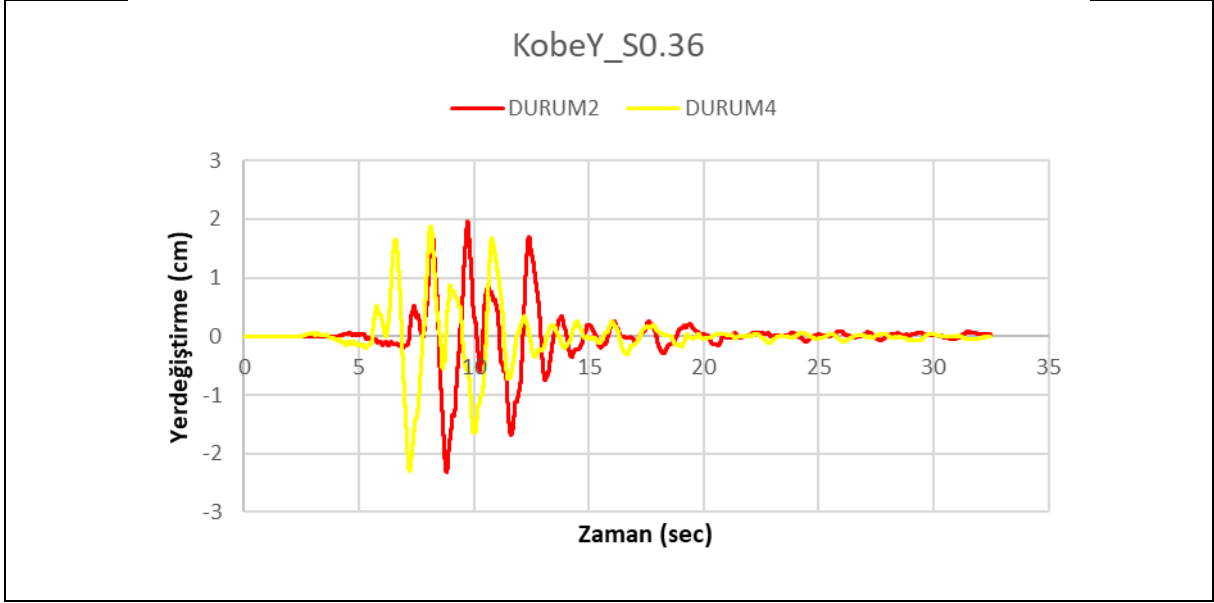


Şekil 4.30 1995 Kobe Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.36)

Aşağıda şekil 4.31-4.32’de 1995 Kobe depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme zaman sonuçları sunulmaktadır.

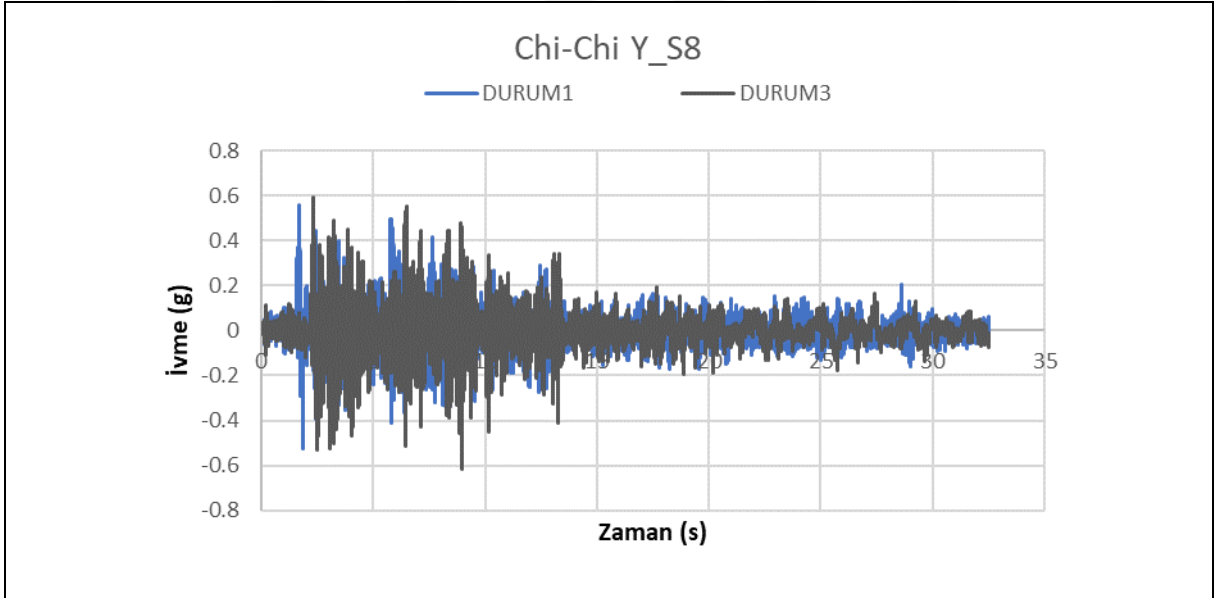


Şekil 4.31 1995 Kobe Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.36)

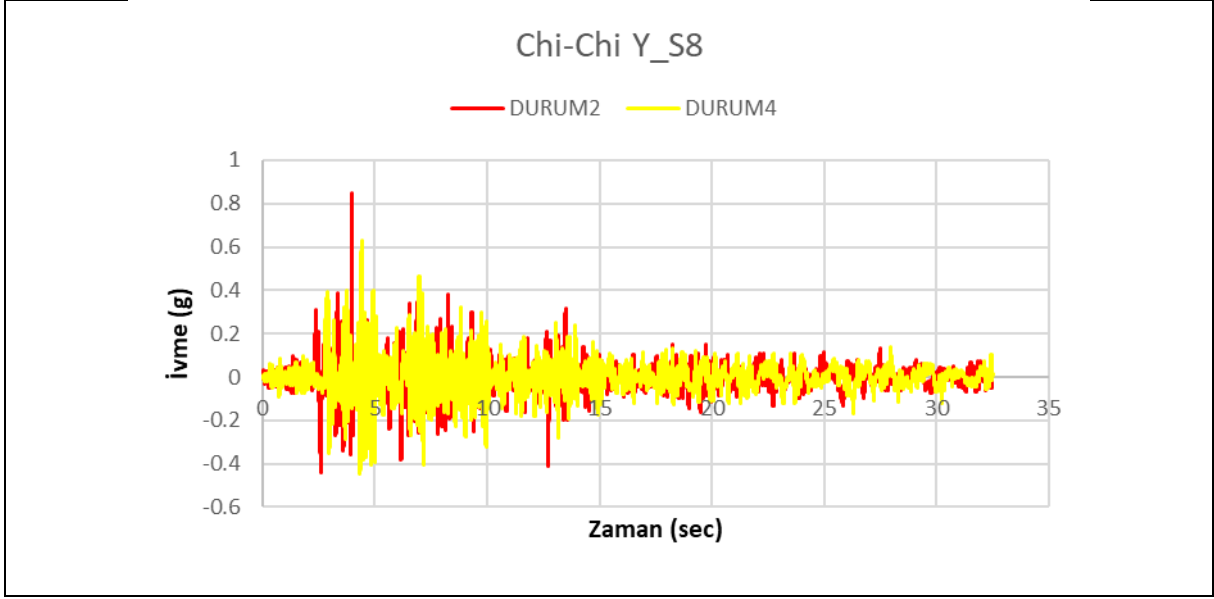


Şekil 4.32 1995 Kobe Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.36)

Aşağıda şekil 4.33-4.34'de 1999 Chi-Chi depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme zaman sonuçları sunulmaktadır.

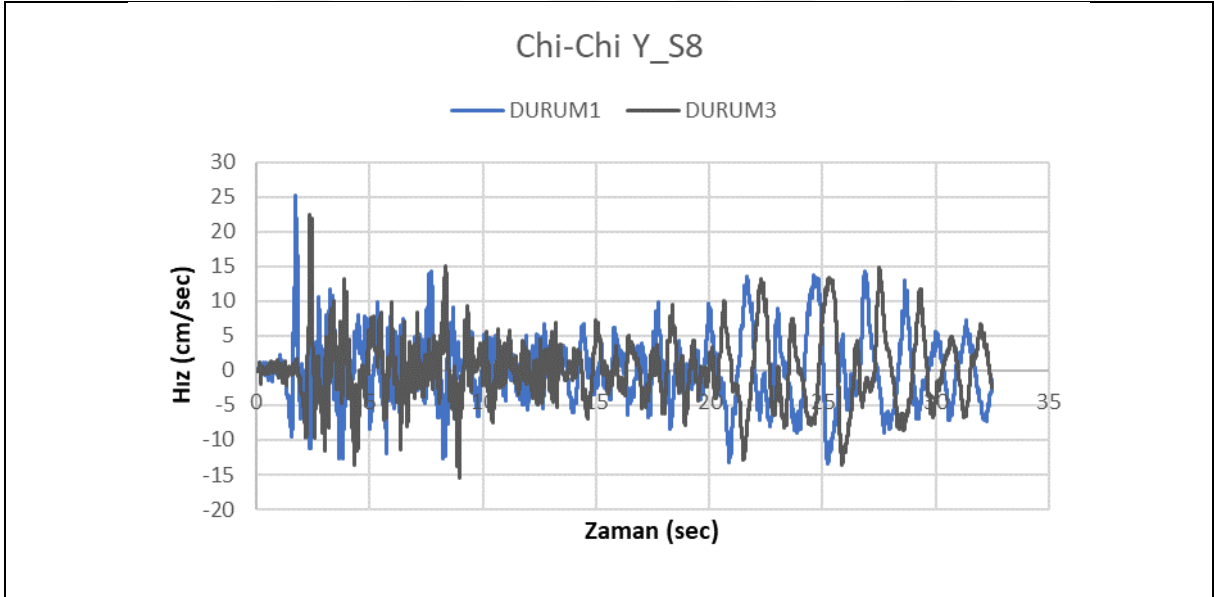


Şekil 4.33 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:8)

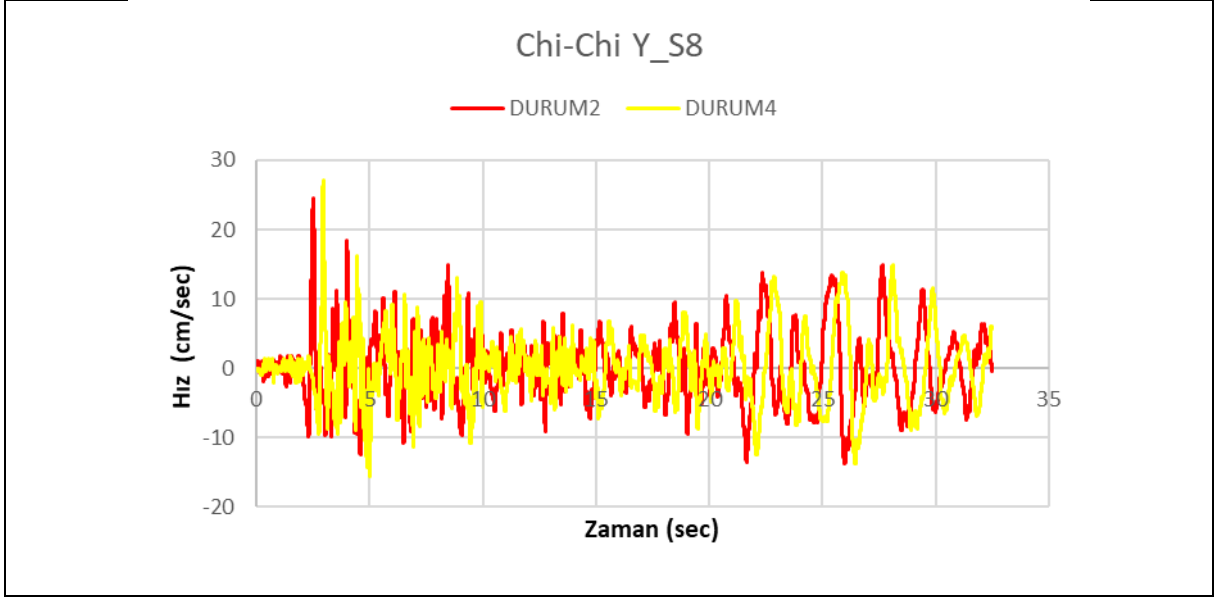


Şekil 4.34 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 8)

Aşağıda şekil 4.35-4.36'da 1999 Chi-Chi depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız zaman sonuçları sunulmaktadır.

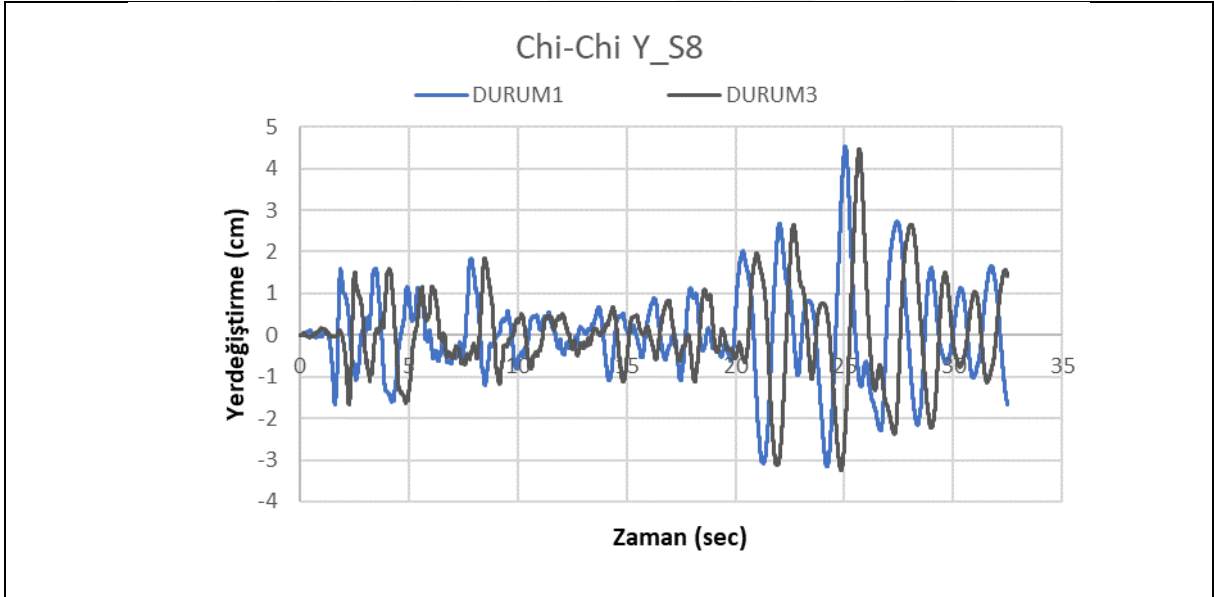


Şekil 4.35 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:8)

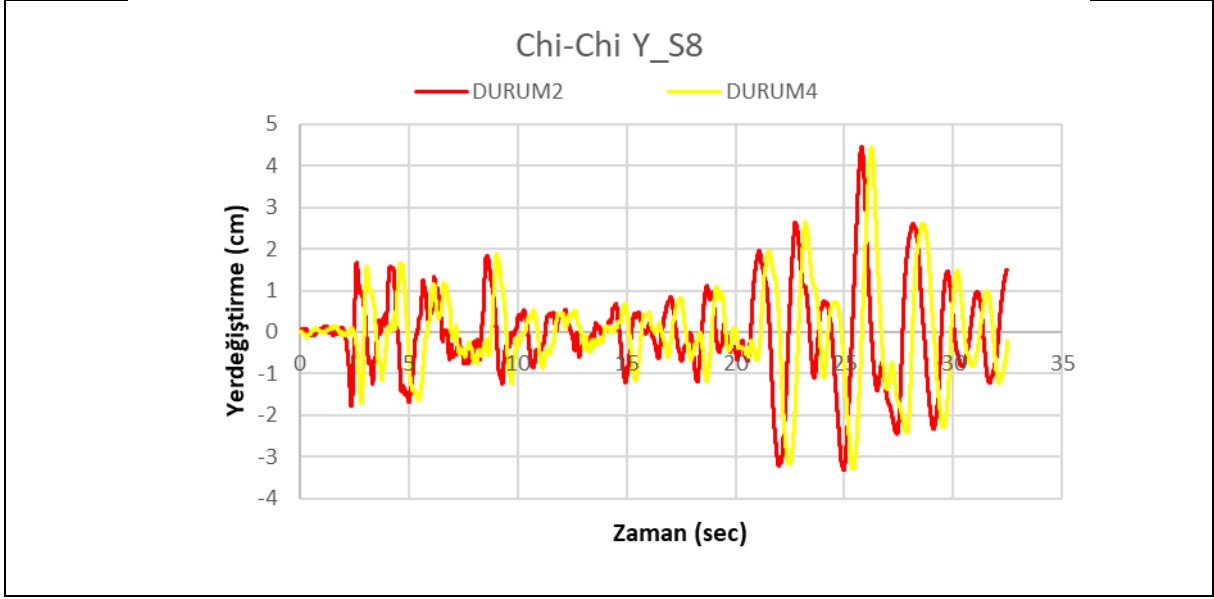


Şekil 4.36 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 8)

Aşağıda şekil 4.37-4.38'de 1999 Chi-Chi depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme zaman sonuçları sunulmaktadır.

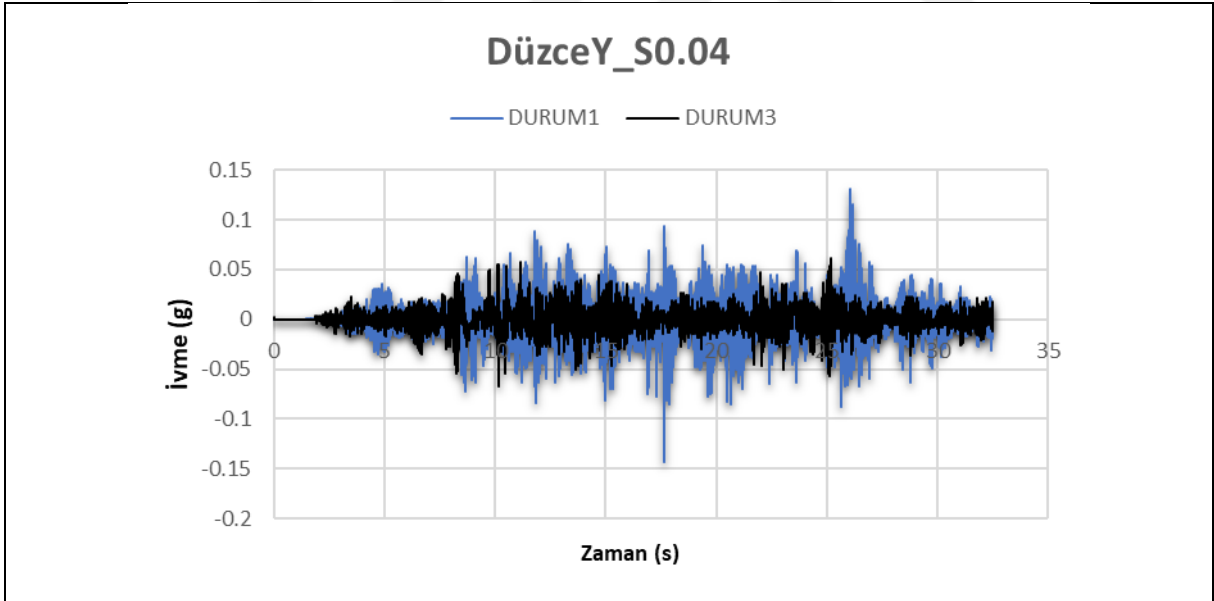


Şekil 4.37 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:8)

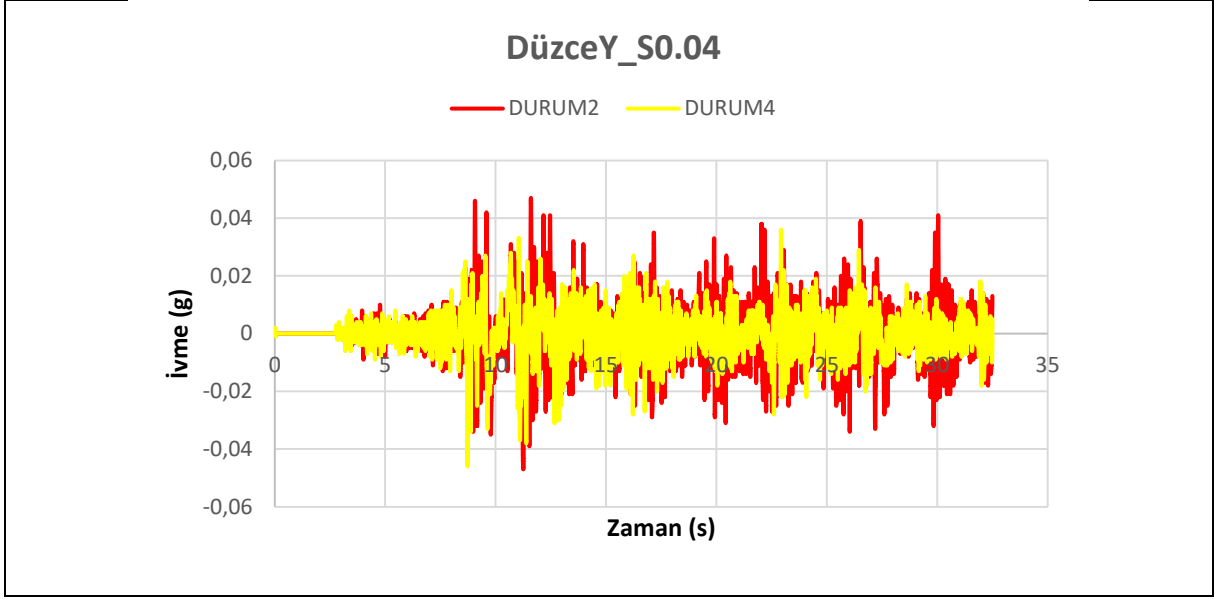


**Şekil 4.38** 1999 Chi-Chi Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 8)

Aşağıda şekil 4.39-4.40'da 1999 Düzce depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

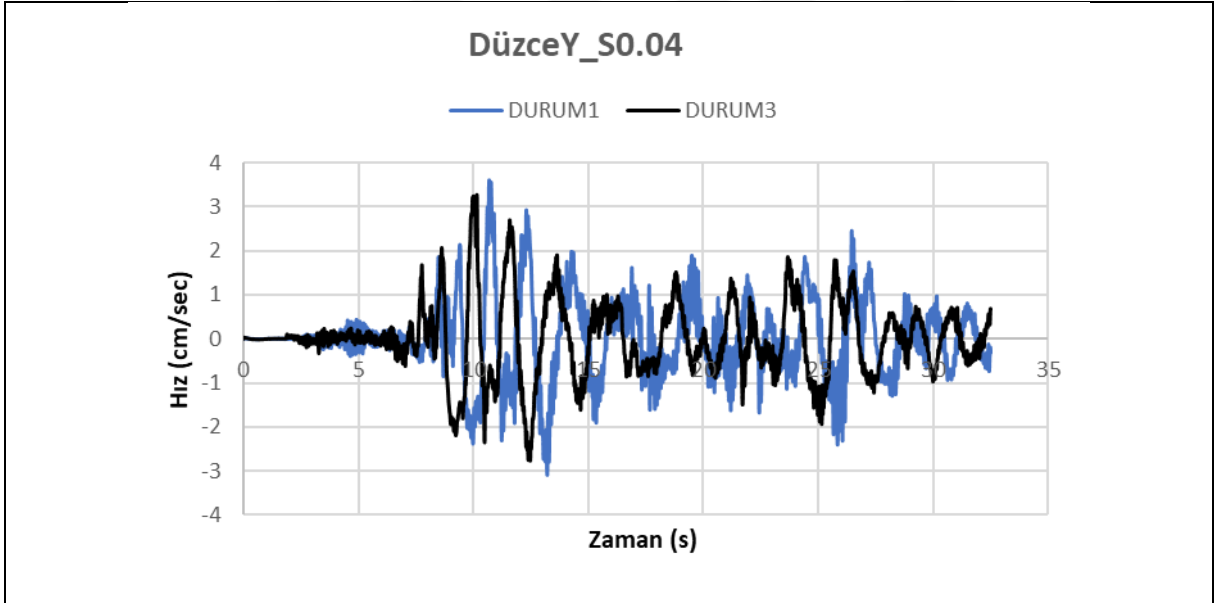


**Şekil 4.39** 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.04)

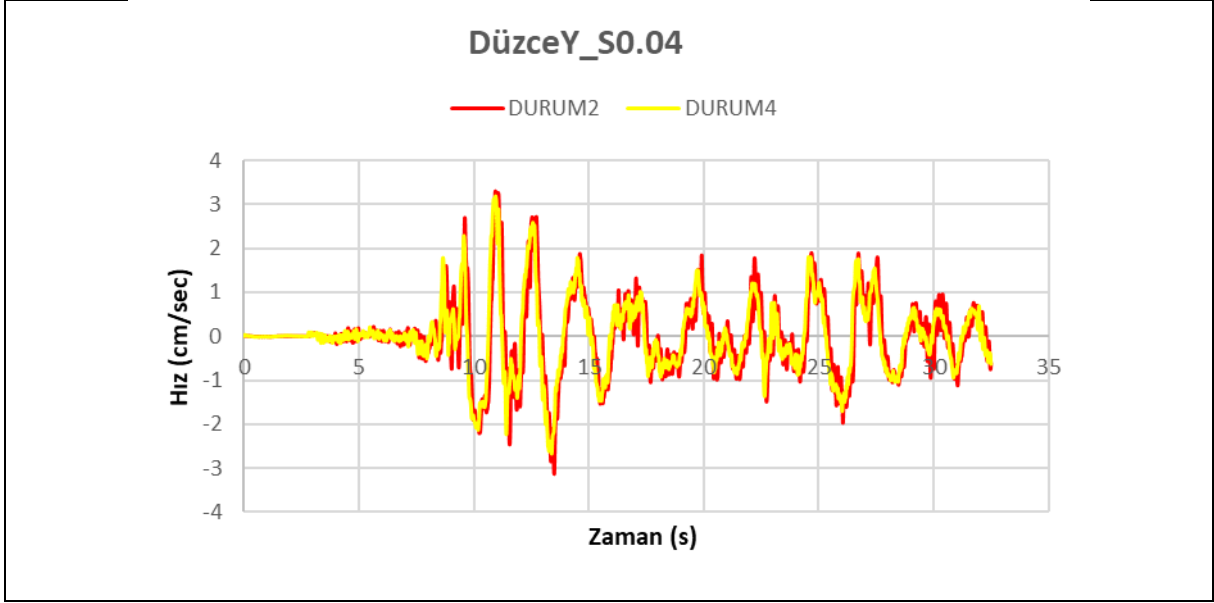


Şekil 4.40 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.04)

Aşağıda şekil 4.41-4.42’de 1999 Düzce depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız-zaman sonuçları sunulmaktadır.

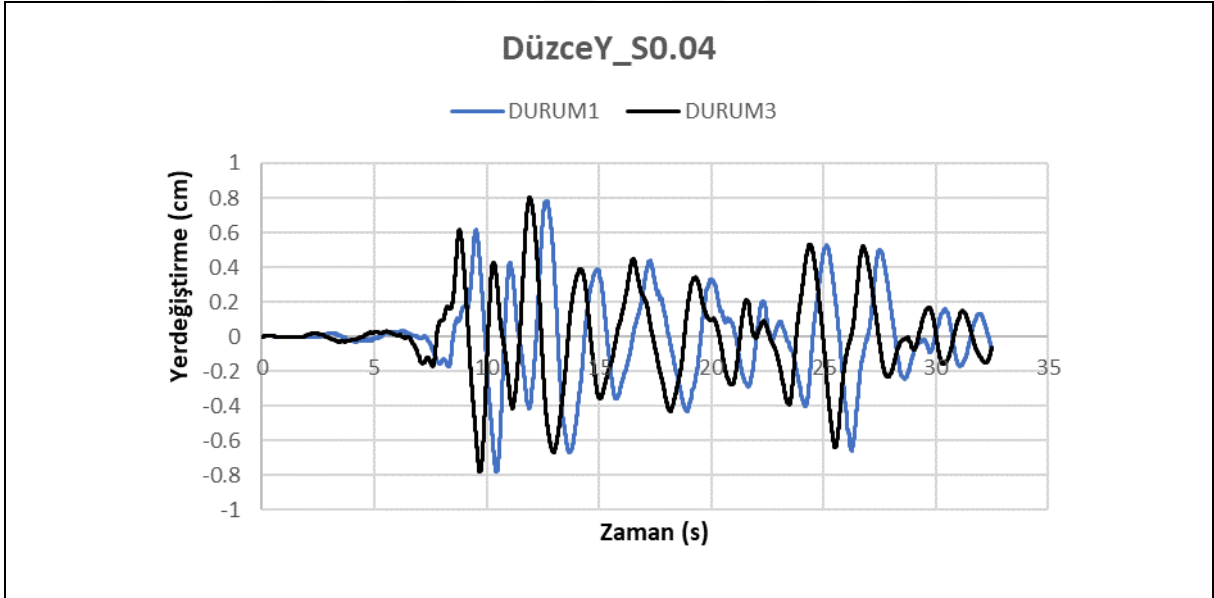


Şekil 4.41 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.04)

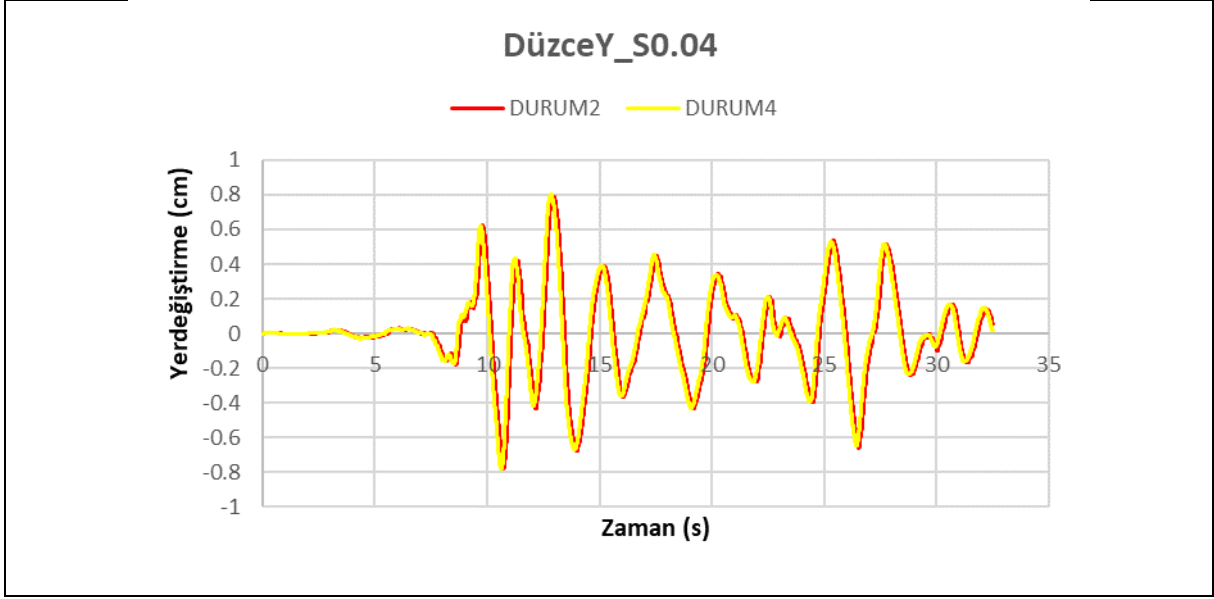


Şekil 4.42 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.04)

Aşağıda şekil 4.43-4.44’de 1999 Düzce depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

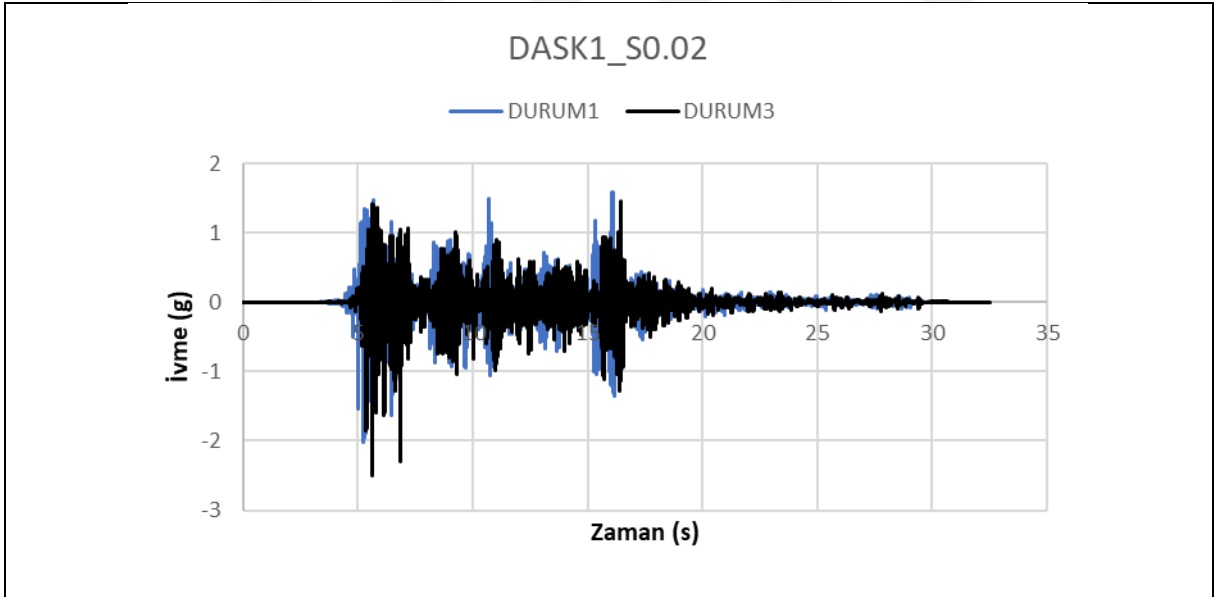


Şekil 4.43 1999 Düzce Y-Doğrultusu Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.04)

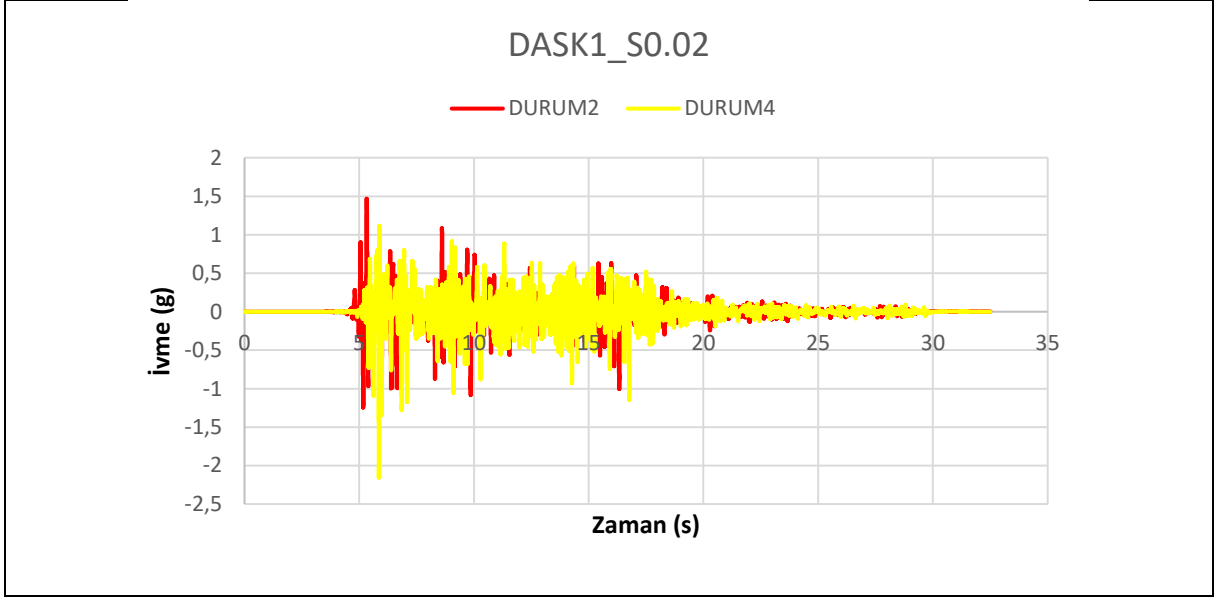


**Şekil 4.44** 1999 Düzce Y-Doğrultusu Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.04)

Aşağıda şekil 4.45-4.46'da 1999 DASK1 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

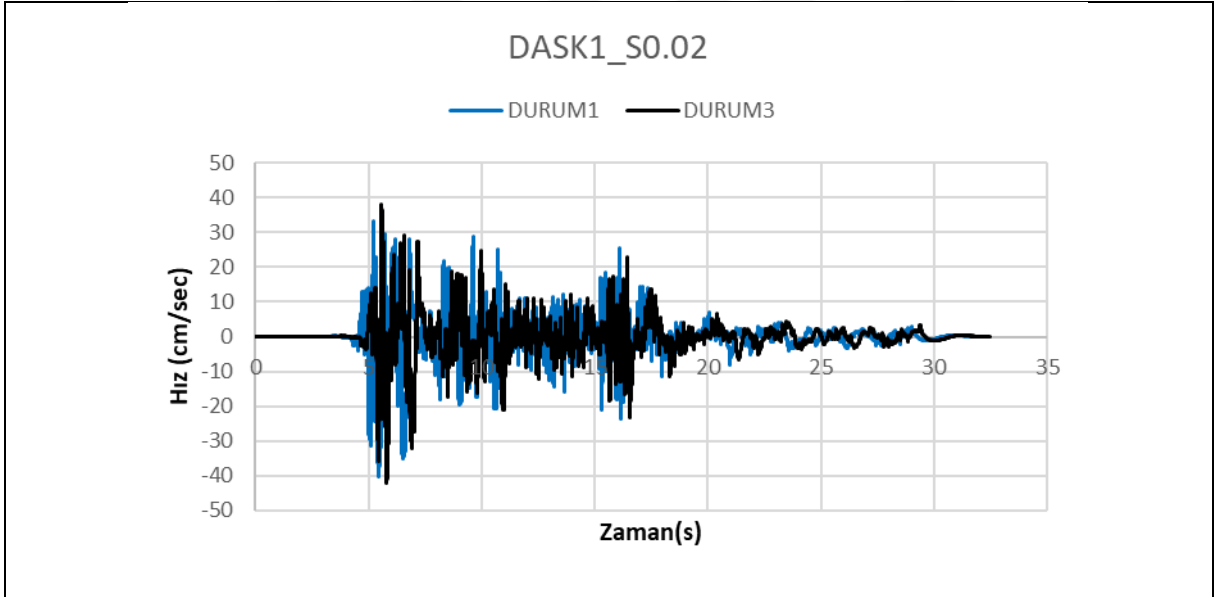


**Şekil 4.45** 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02)

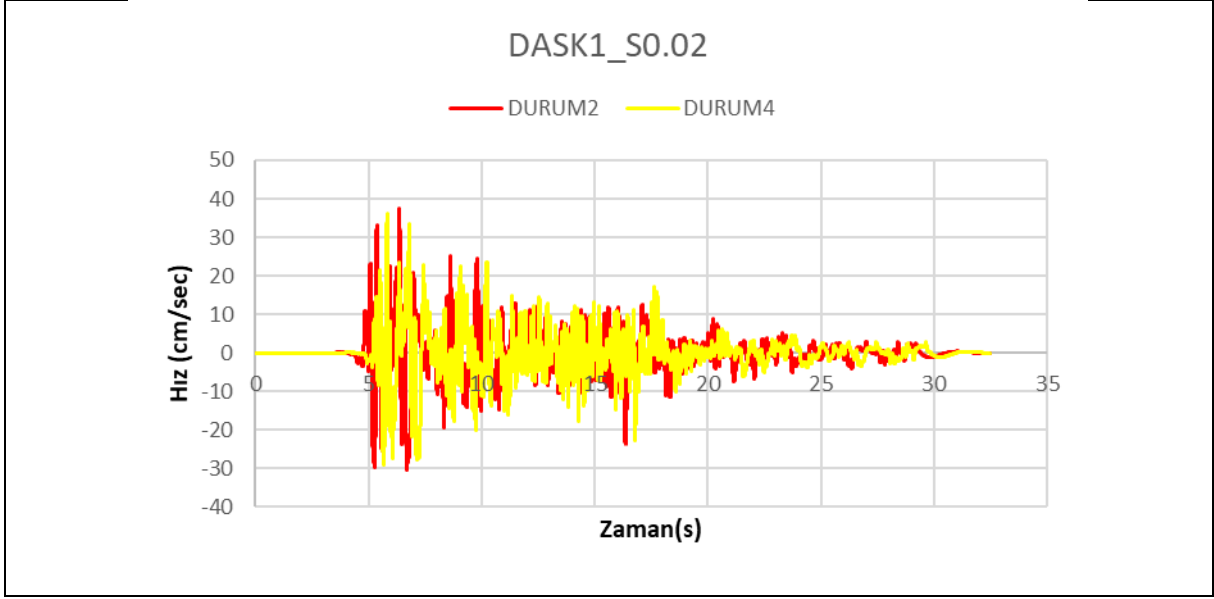


**Şekil 4.46** 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02S)

Aşağıda şekil 4.47-4.48’de 1999 DASK1 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız- zaman sonuçları sunulmaktadır.

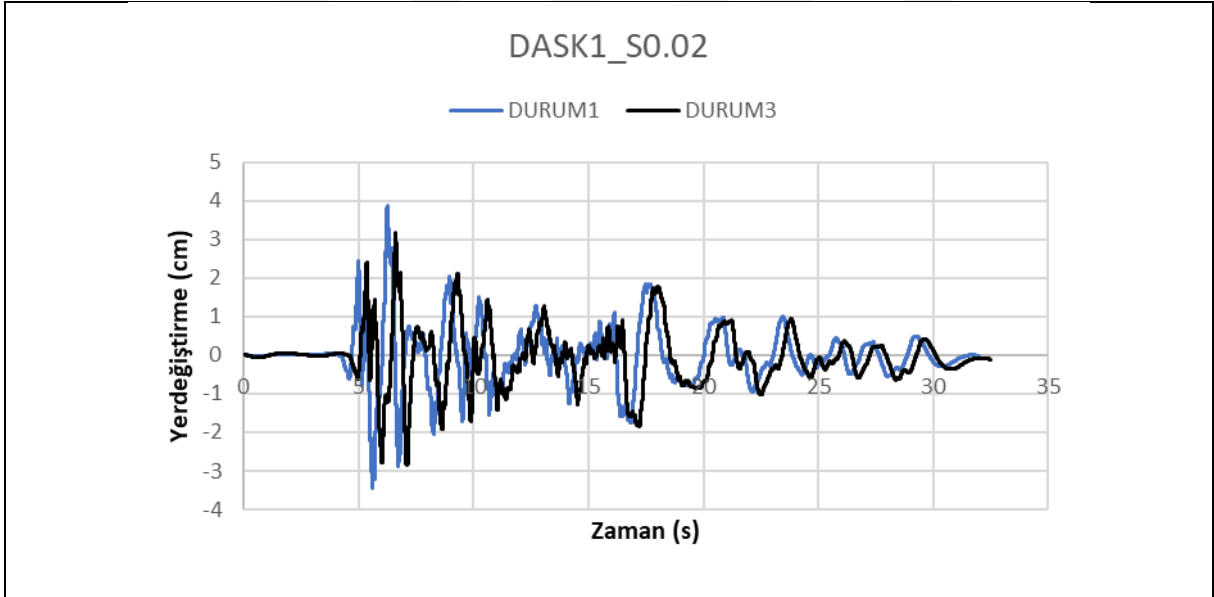


**Şekil 4.47** 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02)

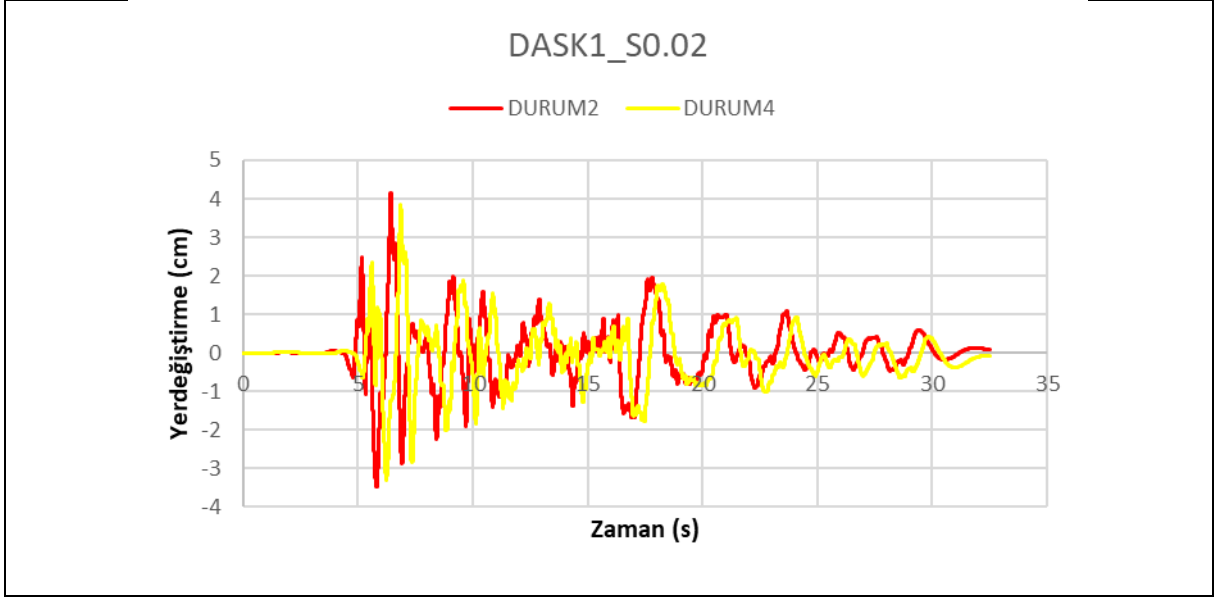


**Şekil 4.48** 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.49-4.50'de 1999 DASK1 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

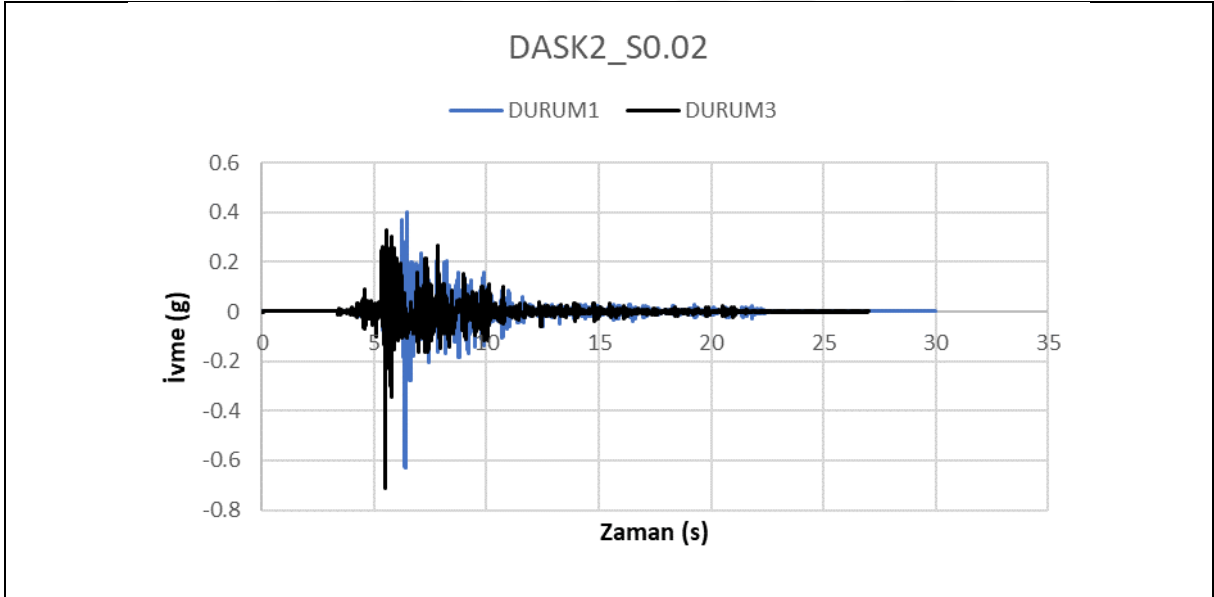


**Şekil 4.49** 1999 DASK1 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02)

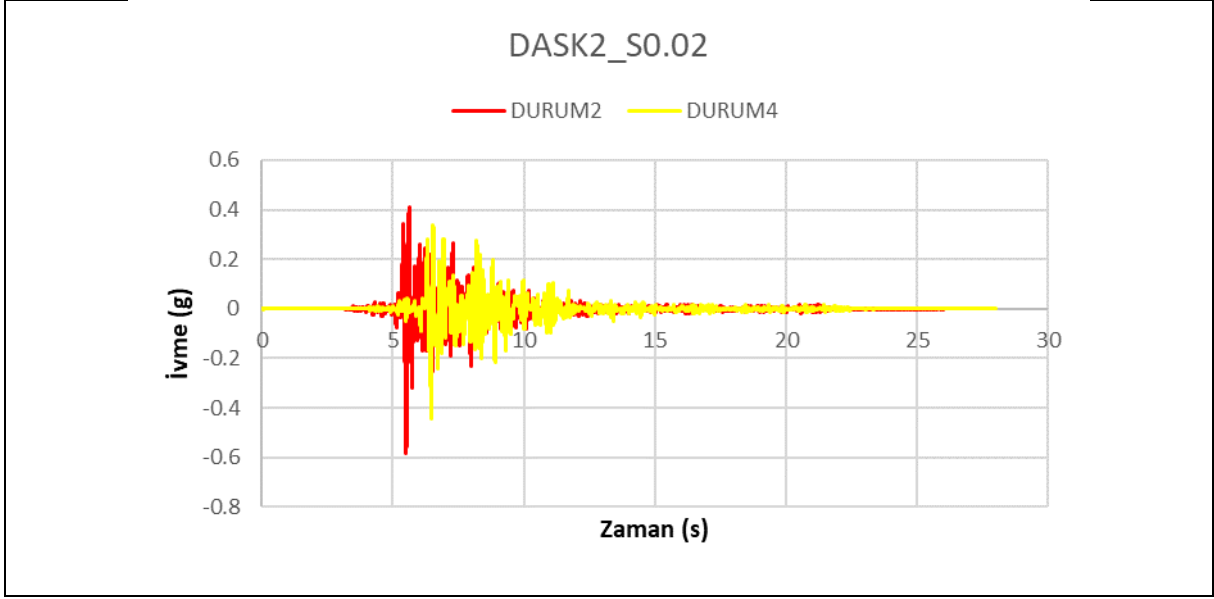


Şekil 4.50 1999 DASK1 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.51-4.52'de 1999 DASK2 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

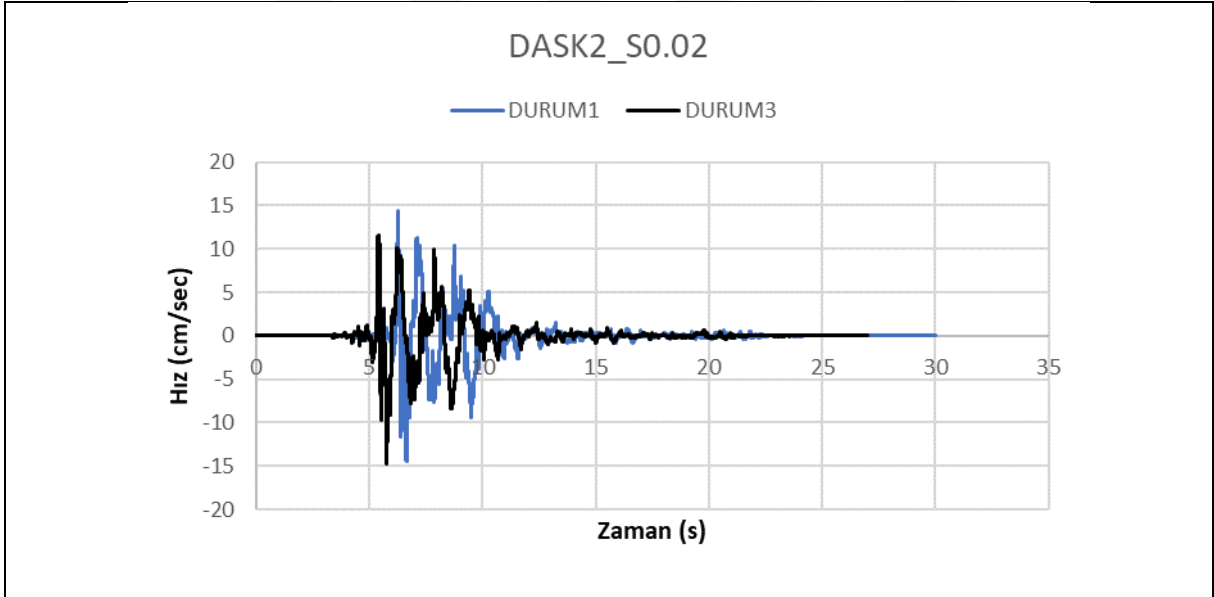


Şekil 4.51 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02)

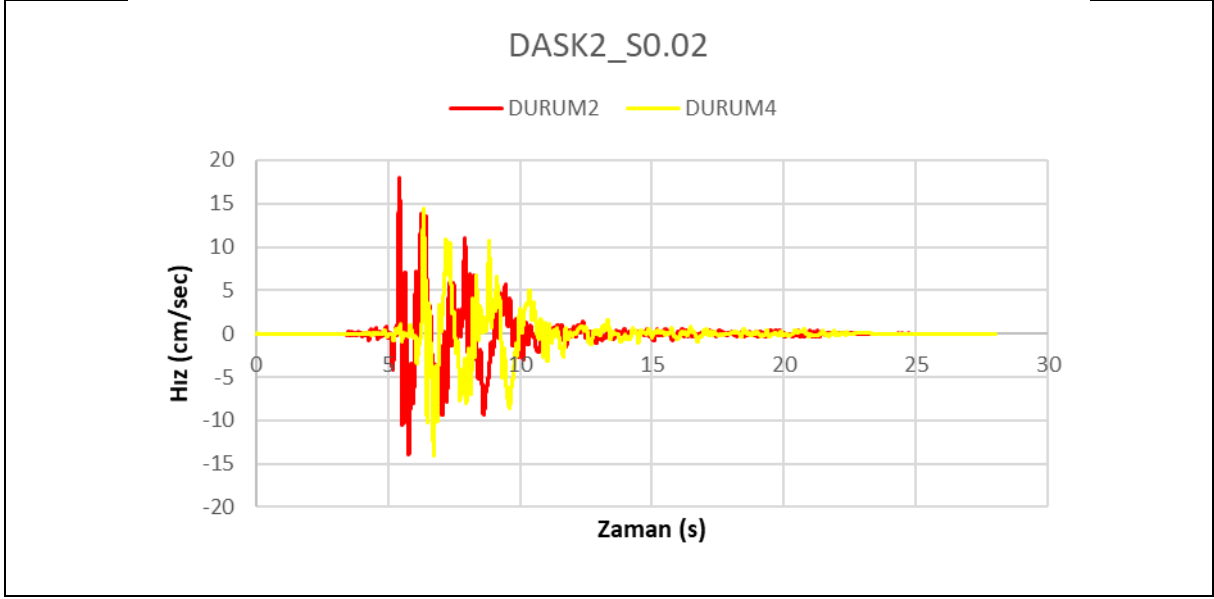


Şekil 4.52 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.53-4.54'de 1999 DASK2 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız- zaman sonuçları sunulmaktadır.

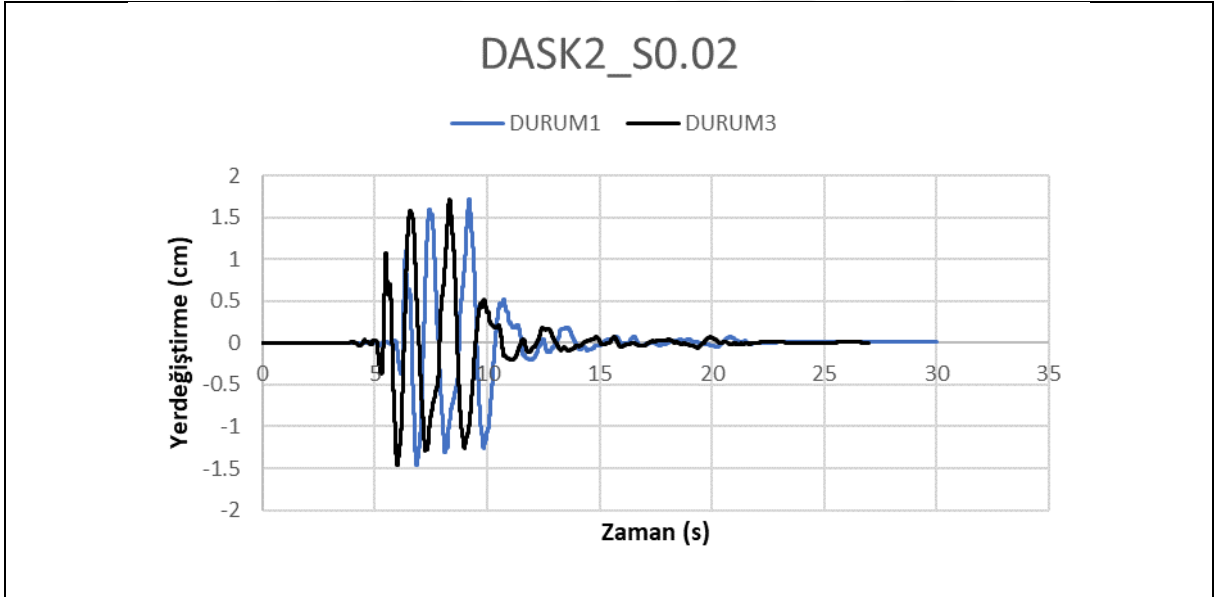


Şekil 4.53 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02)

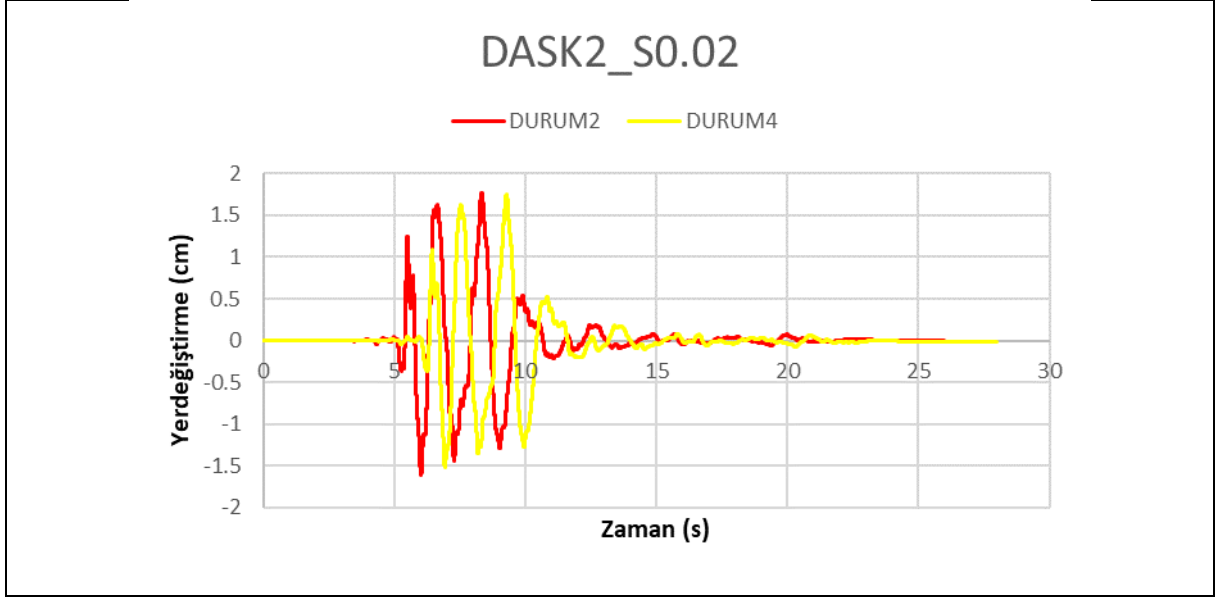


Şekil 4.54 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.55-4.56'da 1999 DASK2 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

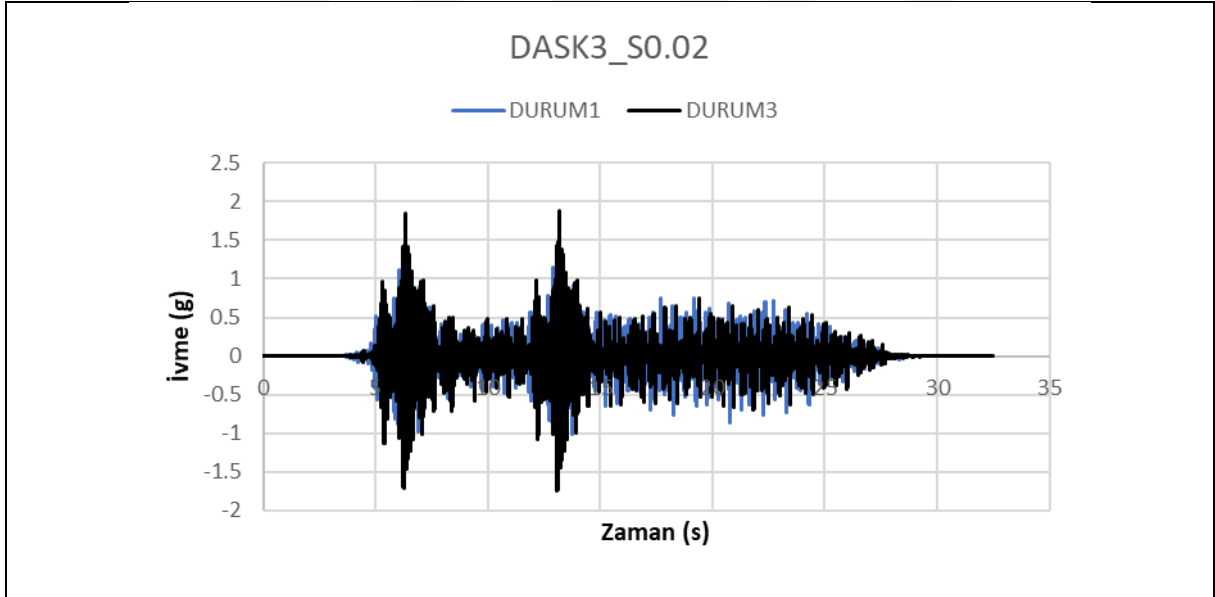


Şekil 4.55 1999 DASK2 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02)

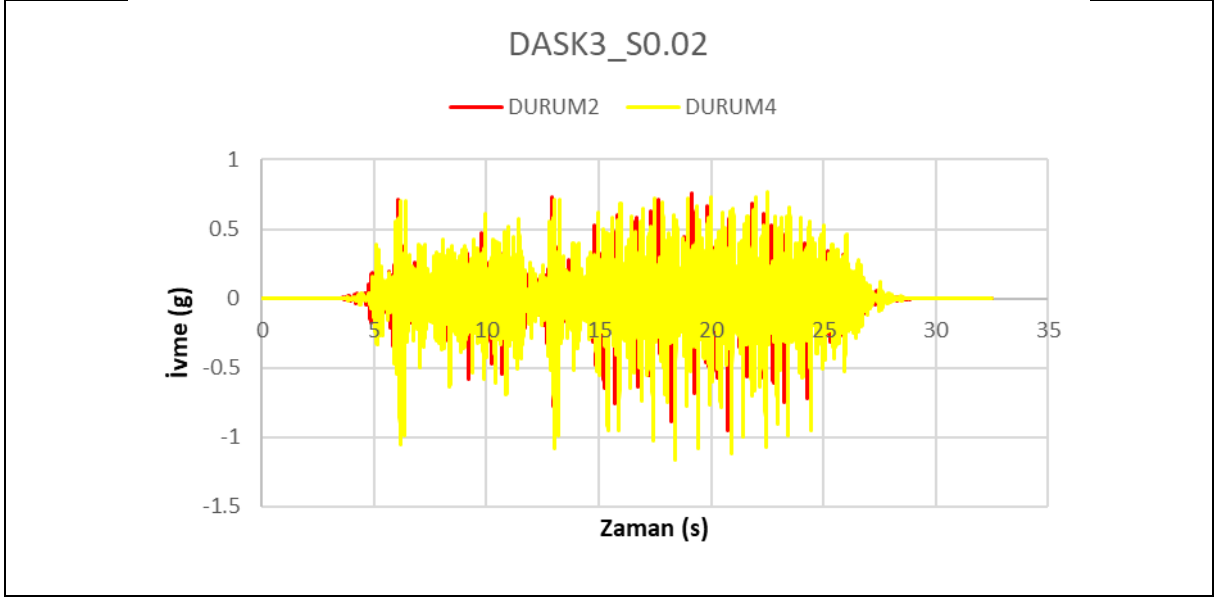


**Şekil 4.56** 1999 DASK2 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.57-4.58'de 1999 DASK3 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen ivme- zaman sonuçları sunulmaktadır.

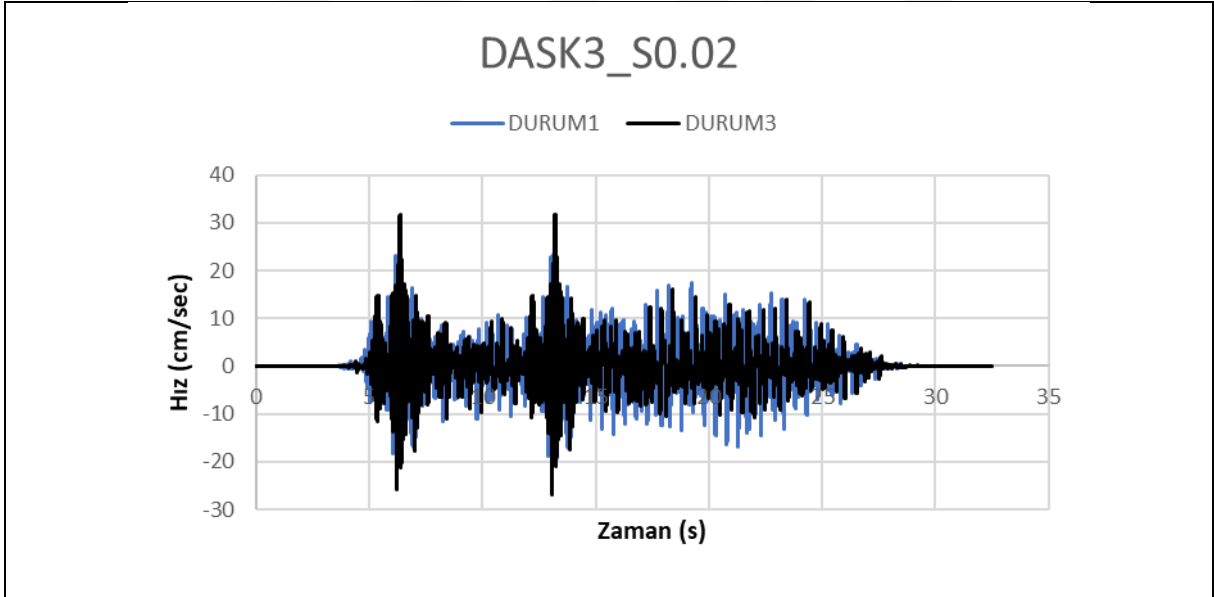


**Şekil 4.57** 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) ivme-zaman (Ölçek:0.02)

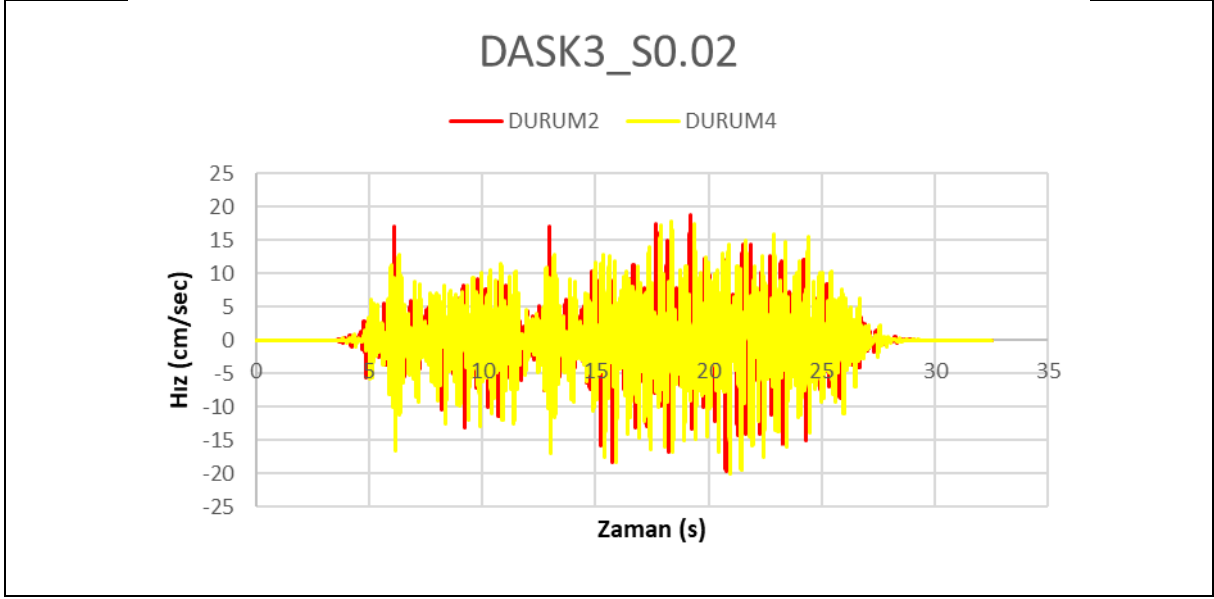


Şekil 4.58 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) ivme-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.59-4.60'da 1999 DASK3 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen hız- zaman sonuçları sunulmaktadır.

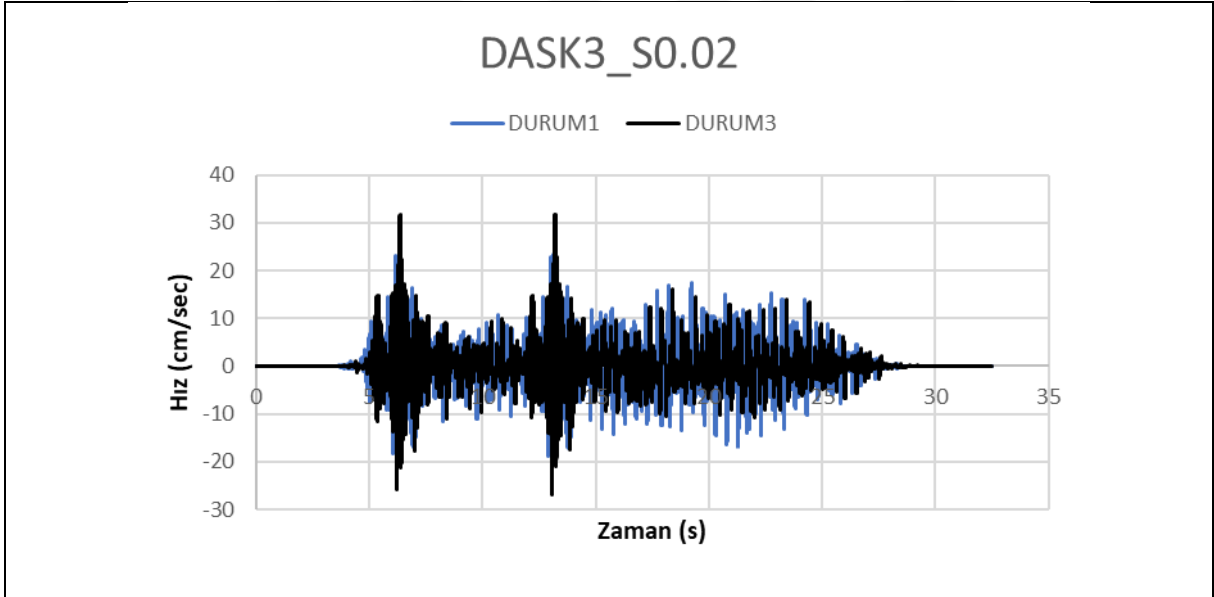


Şekil 4.59 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) hız-zaman (Ölçek:0.02)

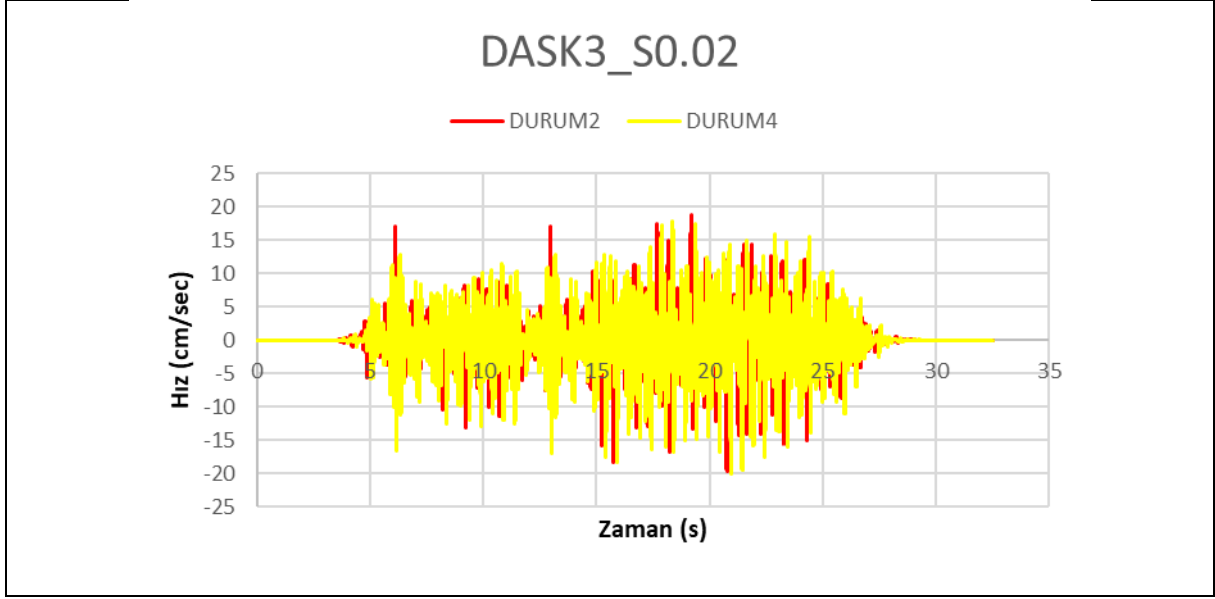


Şekil 4.60 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) hız-zaman (Ölçek: 0.02)

Aşağıda şekil 4.61-4.62'de 1999 DASK3 depremi için betonarme çerçevelerden elde edilen yerdeğiştirme- zaman sonuçları sunulmaktadır.



Şekil 4.61 1999 DASK3 Zati Ağırlık (70 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek:0.02)



**Şekil 4.62** 1999 DASK3 Ek Ağırlık Altında (115 kg) yerdeğiştirme-zaman (Ölçek: 0.02)

Betonarme çerçevelerin seçilen deprem hareketleri altında kat yer değiştirmeleri güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş çerçeveler için Şekil 4.21-4.62’ de verilmiştir. Ölçülen yer değiştirmelerden de anlaşılacağı üzere hasarsız test sonuçları referans ve güçlendirilmiş çerçevede önemli ölçüde farklı yer değiştirme değerleri vermemiştir.

Bu nedenle GFRP plakaların küçük yer değiştirme hareketlerine karşın etkin bir rol almadığı sarsma test çalışmalarından anlaşılmaktadır.

#### **4.2.5 Statik İtme (Pushover) Test Sonuçları**

Statik yükleme deneyi üst kiriş hizasından uygulanan yatay yük ive bu yüke karşılık gelen yatay yer değiştirme kayıtları kaydedilerek yapılmıştır. Çerçevelere ait statik yükleme deneyleri Şekil 4.63-4.66’da referans ve güçlendirilmiş çerçeveler için sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.63 Referans betonarme çerçeve statik itme analizi öncesi



Şekil 4.64 Referans betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası



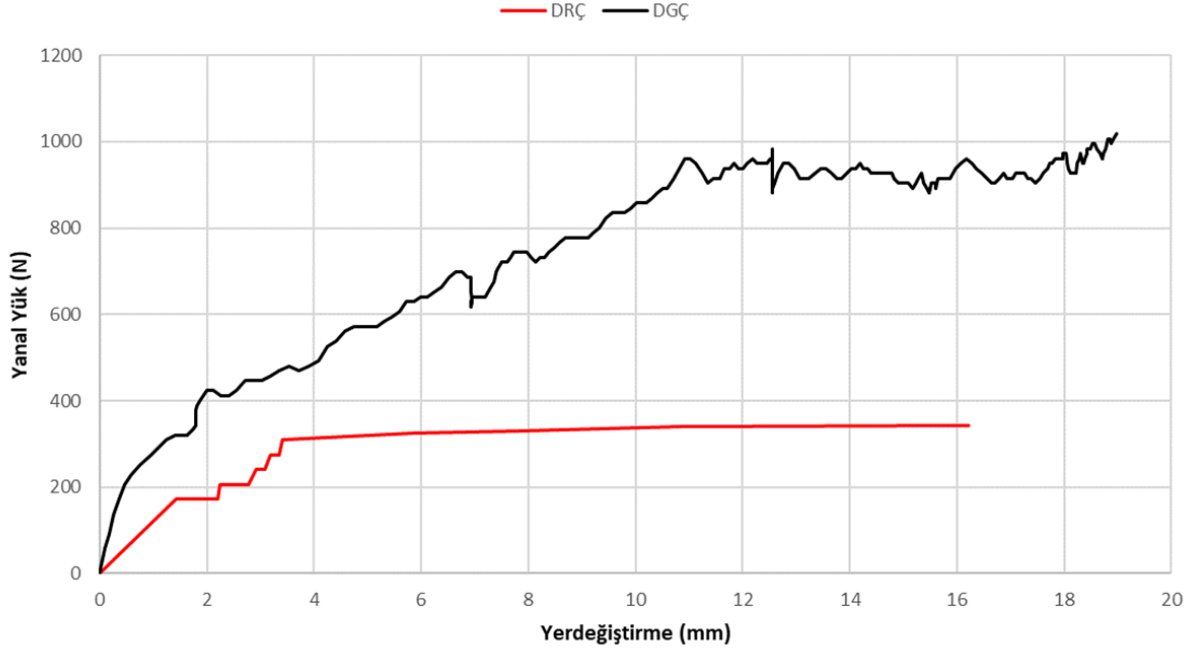
**Şekil 4.65** Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi öncesi



**Şekil 4.66** Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası

Güçlendirilmiş çerçevede teknik aksaklık nedeni ile çekme ve basınç çaprazlarına ayrı ayrı yerleştirilen gerinim değerleri kayıt altına alınamamıştır. Her iki çerçeveye ait deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri Şekil 4.67'de verilmiştir.

## Deneysel Statik İtme Testi Sonuçları



Şekil 4.67 Referans ve güçlendirilmiş çerçevelere ait deneysel yatay yük-yer değiştirme eğrileri

### Deneysel statik itme analizi sonuçlarına göre:

Referans çerçeve yaklaşık olarak 340 N yük taşıma kapasite ulaşmış ve noktada kolon kiriş birleşim noktalarında meydana gelen plastik mafsallaşmalarla birlikte taşıma kapasitesi sınırlanmıştır. Yatay yer değiştirme 50 mm olana kadar yük taşımaya devam ettiği Şekil 4.68’de görülmektedir. Sonrasında yük taşıma kapasitesi giderek azalmıştır. Güçlendirilmiş çerçevede ise yatay yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak en fazla 1040 N değerine ulaşmıştır. Bu sonuç uygulanan GFRP plaka çaprazların %200 oranında taşıma kapasitesinde artış meydana geldiğini göstermiştir.

Referans çerçeve 7.5 mm yatay yer değiştirme yaptığında çerçeve maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve yük taşıma kapasitesi yatay seyretmiştir. Güçlendirilmiş çerçevede ise 11.0 mm yatay yer değiştirmede yatay yük taşıma kapasitesi yatay seyretmiştir. Çerçevelerin başlangıçtaki doğrusal yatay rijitlikleri kıyaslandığında referans çerçeve için 183 N/mm ve güçlendirilmiş çerçeve için 460.8 N/mm değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 4.68** Referans betonarme çerçeve statik itme analizi sonrasında zayıf düğüm noktalarındaki mafsallaşmalar



**Şekil 4.69** Güçlendirilmiş betonarme çerçeve statik itme analizi sonrası plakalarda meydana gelen şekil değişimi.



**Şekil 4.70** Kirişin kolona bağlandığı yüzeylerde çaprazların kirişlerde oluşturduğu kesme etkisi.

Betonarme çerçevelerin GFRP kompozit eleman güçlendirmeleri ile yanal yük taşıma kapasitesi referans çerçeveye oranla 3 kat civarında yanal yük taşıma kapasitesinde artış olduğu deneysel olarak yapılan testler sonrasında Şekil 4.67’de görülmüştür.

Kullanılan çapraz GFRP plakaların aksenal rijitlikleri çerçevenin kolon kirişleri ile kıyaslandığında nispeten daha rijit olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle plakalarda yırtılma meydana gelmemiş, fakat betonarme çerçevelerin kolon-kiriş birleşimlerinde şekil 4.68’de oluşan plastik mafsallar oluşmamış ve şekil 4.70’de kesme kuvveti altında kirişlerde çapraz kırılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Çerçevelerin başlangıçtaki doğrusal yatay rijitlikleri kıyaslandığında referans çerçeveye göre güçlendirilmiş çerçeve 2.5 kat artış elde edilmiştir. Şekil 4.69’da GFRP plakalarda basınç altında meydana gelen deformasyonlar görülmektedir.

GFRP kompozit plakalarla güçlendirilmiş betonarme çerçevelerde, kolon kiriş birleşim düğüm noktaları donatı kenetlenmesi olmaması veya zayıf olan eski ve mevcut betonarme yapılarda düğüm noktalarında plastik mafsallaşmayı önleyebilecek veya geciktirebilecek bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır.



## BÖLÜM 5

### BETONARME ÇERÇEVE ANSYS STATİK İTME ANALİZLERİ (PUSHOVER)

Bu bölümde ilk olarak deneysel itme testleri gerçekleştirilen betonarme çerçevelerin sonuçları nümerik statik itme analizleri ile doğrulanması hedeflenmiştir. Buna ek olarak betonarme çerçevelerde 4 farklı durumu incelemek üzere ANSYS programı ile sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler neticesinde betonarme çerçevelerin özellikle yanal yük taşıma kapasitesi, aksenal ve toplam yerdeğiştirme düzeyleri, enerji yutma kapasiteleri ve rijitlikleri üzerine sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu beş farklı durum aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Deneysel İtme Testleri Nümerik Modellerle Doğrulama:** Deneysel referans betonarme çerçeve (DRÇ) ve güçlendirilmiş (DGÇ) betonarme çerçevenin statik itme test sonuçlarını nümerik referans çerçeve (NRÇ) ve güçlendirilmiş çerçeve (NGÇ) sonlu eleman betonarme çerçeve modellerle doğrulama durumu
- 2- Kolon Kiriş Dügüm Noktaları Kenetli-Kenetsiz Betonarme Çerçeve Kıyaslama:** Üretilen referans ve güçlendirilmiş çerçeve modellerin kolon kiriş düğüm noktalarında boyuna donatıların kenetlenme boylarının olmadığı veya zayıf olduğu durumları yansıtması için sonlu eleman modelleri oluşturulan betonarme çerçeveler ile kolon-kiriş düğüm noktalarında boyuna donatıların kenetlenmenin olduğu durumlar nümerik olarak kıyaslanmıştır.
- 3- Betonarme Çerçevelerde Açıklık/Yükseklik (L/H) Oranı Değişiminin İrdelenmesi:** Betonarme çerçevelerde açıklık/yükseklik (kiriş uzunluğunun (L) kolon yüksekliğine (H) oranı değişimi) (L/H) üç farklı değerde incelenmiştir. Bunlar sırasıyla L/H oranlarının 0.68, 1 ve 2 olması durumlarıdır.
- 4- Betonarme Çerçeve Kesit Alanların Değişiminin İncelenmesi:** Betonarme çerçevelerde güçlendirmenin kesit alan değişimi üzerindeki etkinliğini incelemek

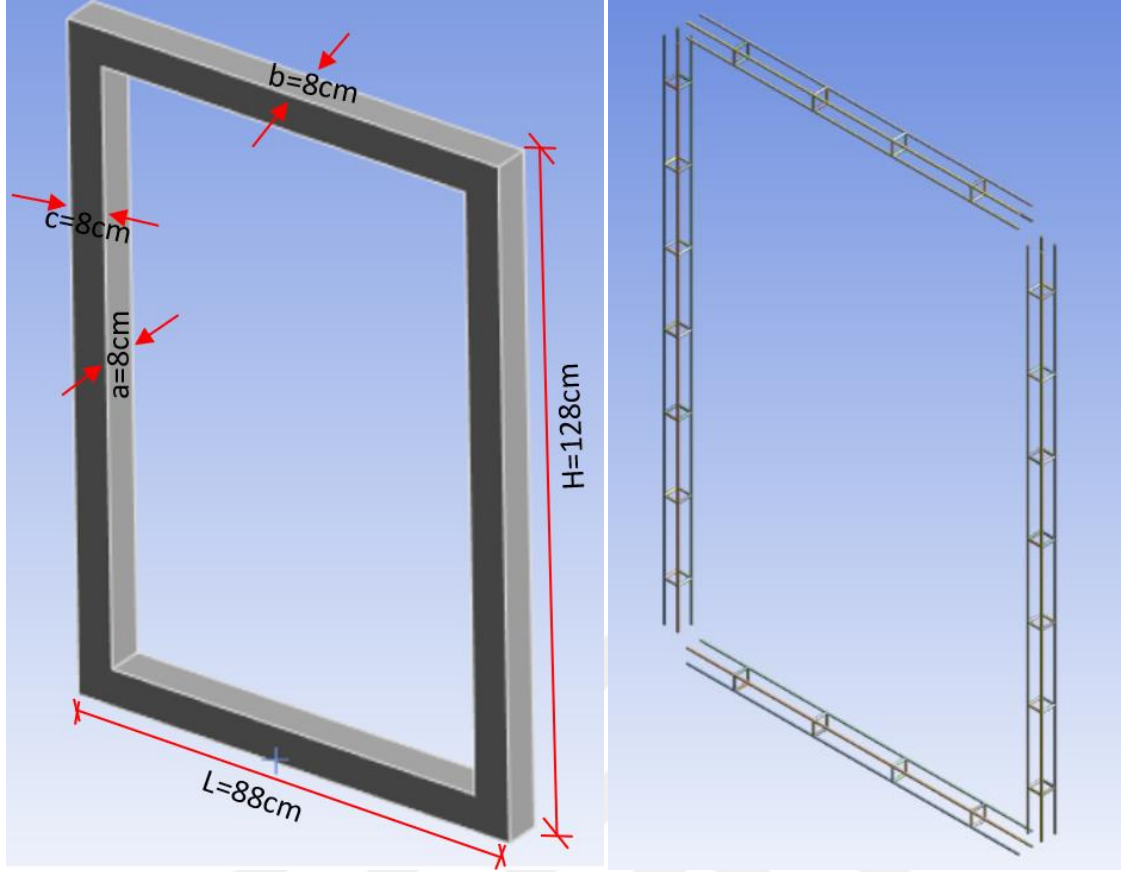
amacıyla üç farklı kesitte karşılaştırma yapılmıştır. Bu üç farklı kesite sahip çerçevelerin açıklık ve yükseklik değerleri birbirinin aynısı olup 3 metre yüksekliğinde ve 6 metre açıklığında olarak modellenmişlerdir. Ayrıca kesitlerdeki donatı oranları birbirine denk olacak şekilde dizayn edilmiştir. Kesit alanlar sırasıyla 20x20 cm, 30x30 cm ve 40x40 cm olarak modellenmiştir.

#### **5- Güçlendirmede Kullanılan GFRP Plaka Eksenel Rijitlik Değişiminin İncelenmesi:**

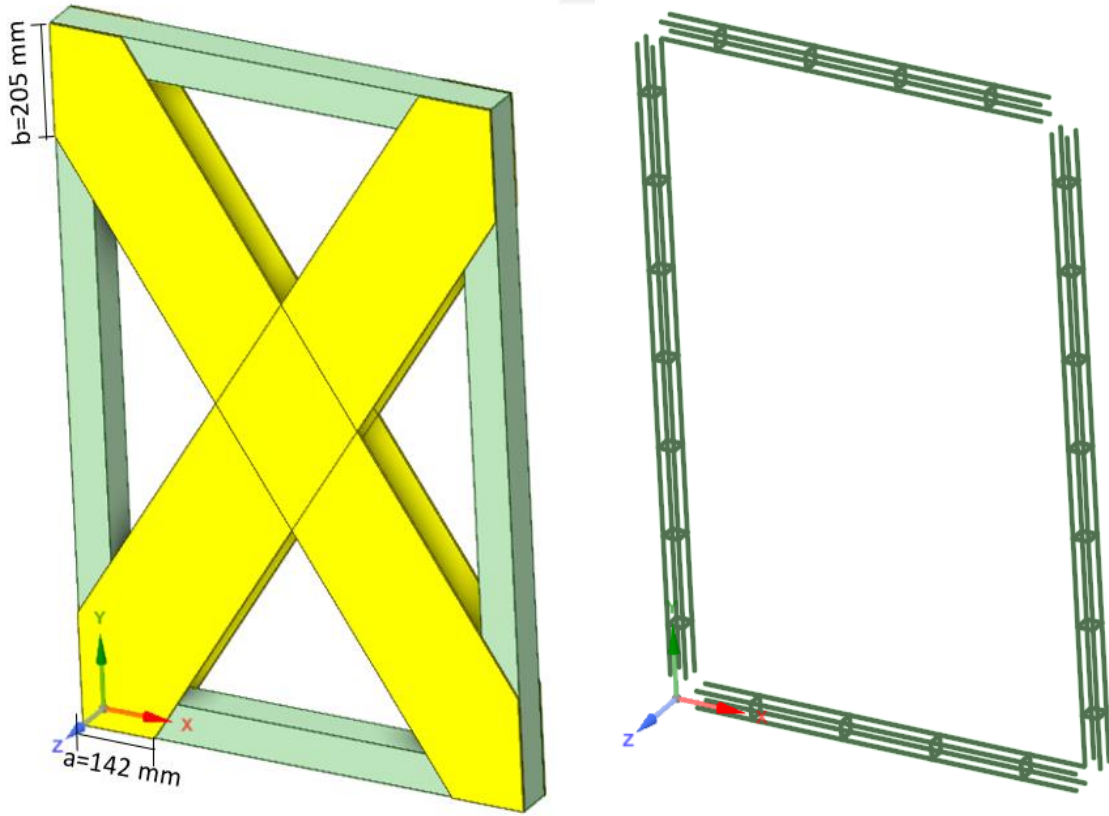
Özellikle narin betonarme çerçevelerde güçlendirmede uygulanan GFRP plakaların genişlik değişiminin etkinliğini görmek için 20x20cm kolon kiriş kesitlerine sahip bir çerçevede üç farklı plaka kalınlığı test edilmiştir. Betonarme çerçevenin ebatları 3m yüksekliğinde ve 6m genişliğindedir. Eksenel rijitlik oranları plaka sırasıyla 1, 3 ve 5 olan GFRP plakaların narin betonarme çerçeveler üzerinde etkisi irdelenmiştir. Uygulanan plaka kalınlıkları sırasıyla 10 cm, 30 cm ve 50 cm'dir.

### **5.1 DENEYSEL İTME TESTLERİ NÜMERİK MODELLERLE DOĞRULAMA**

Bu kısımda deneysel testlerini yaptığımız referans ve güçlendirme çerçevelerin ebatlarında, aynı malzeme mekanik özellikleri ve kesitleri tanımlanarak analizler yapılmıştır. Oluşturulan referans çerçeve model 128 cm yüksekliğine ve 88 cm genişliğine sahip iken kolon-kiriş kesitleri 8x8 cm olan bir çerçeve modellenmiştir. Çerçevede 4 adet  $\Phi 5$  boyuna donatı yerleştirilmiştir, etriyeler ise  $\Phi 5$  olup kolonlarda 7 adet olacak şekilde her 16 cm aralıklarla yerleştirilirken, kirişlerde ise  $\Phi 5$  çapındaki etriyeler 4 adet olacak şekilde her 17.6 cm aralığa bir denk gelecek şekilde dizayn edilmiştir. Güçlendirme için kullanılan GFRP plaka kalınlığı 4 mm olup genişliği ise 25 cm'dir. Plakalar betonarme çerçevelerin yükseklik ve açıklık oranlarıyla doğrusal olarak köşe noktalara tatbiki hesaplanmıştır. Bu betonarme çerçeve sonlu eleman modelinde plakalar yatayda 142 mm düşeyde ise 205 mm olacak şekilde kolon kiriş birleşim noktalarına uygulanmıştır. İmal edilen betonarme çerçevenin birebir aynısını yansıtabilecek şekilde sonlu eleman modellerinde 2 cm paspayı bırakılmıştır. Bu durum deneysel referans betonarme çerçeve (DRÇ) ve güçlendirilmiş (DGÇ) betonarme çerçevenin statik itme test sonuçlarını nümerik referans çerçeve (NRÇ) ve nümerik güçlendirilmiş çerçeve (NGÇ) sonlu eleman betonarme çerçeve modellerle doğrulama durumudur. Şekil 5.1 ve 5.2'de sırasıyla nümerik referans çerçeve ve nümerik güçlendirilmiş çerçeve kesit ve donatı detayları verilmektedir.

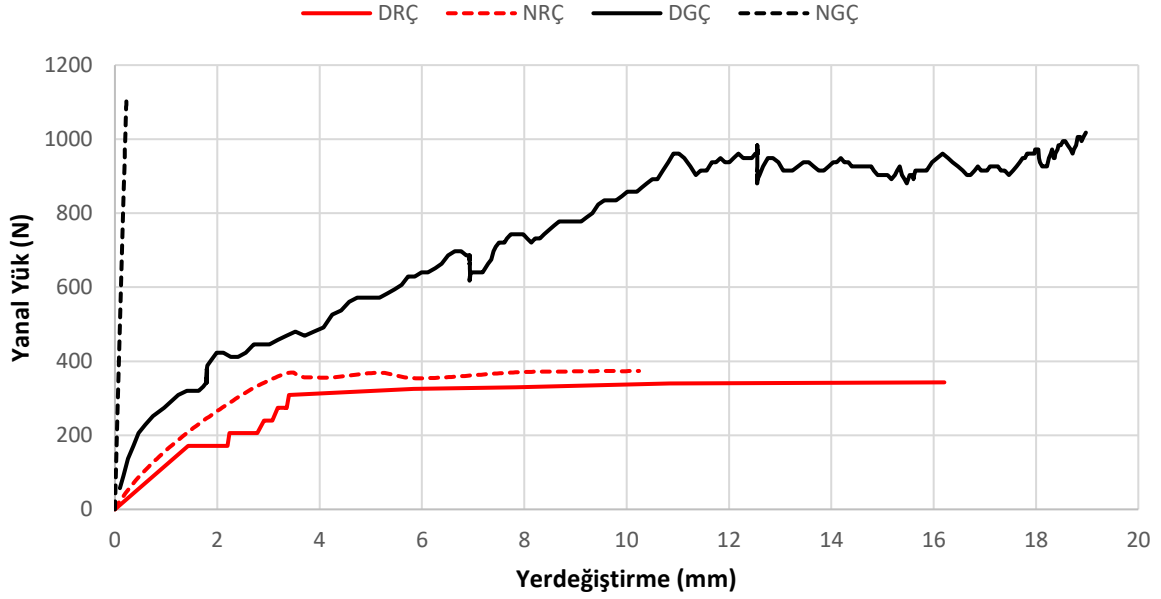


Şekil 5.1 Nümerik Referans Çerçeve (NRC) geometri ve donatı detayı



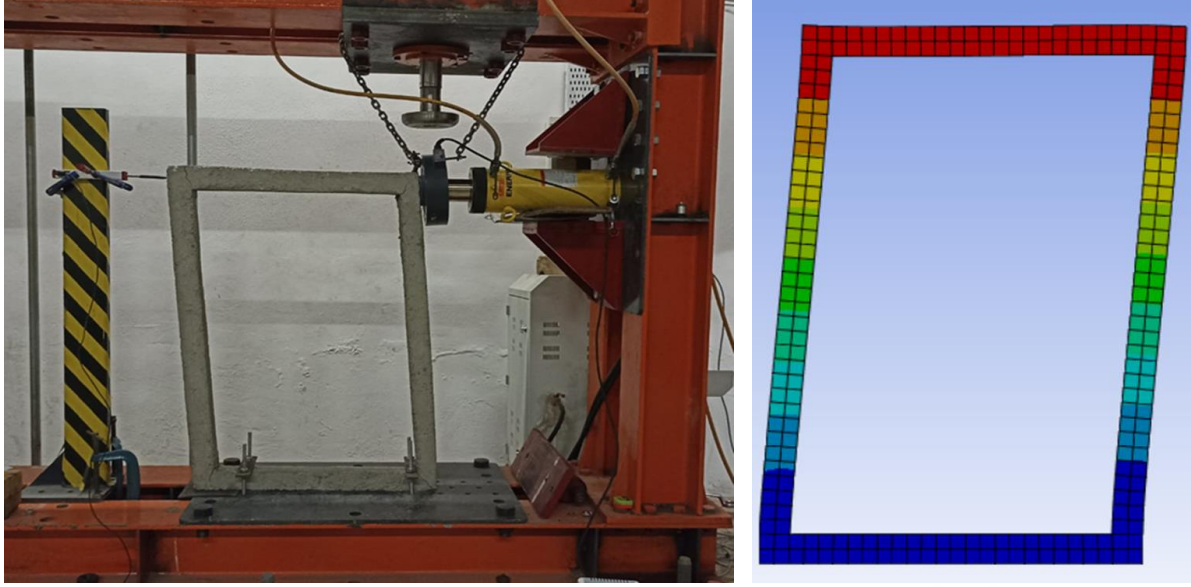
Şekil 5.2 Nümerik Güçlendirilmiş Çerçeve (NGÇ) geometri ve donatı detayı

## Deneyel ve Nümerik Doğrulama

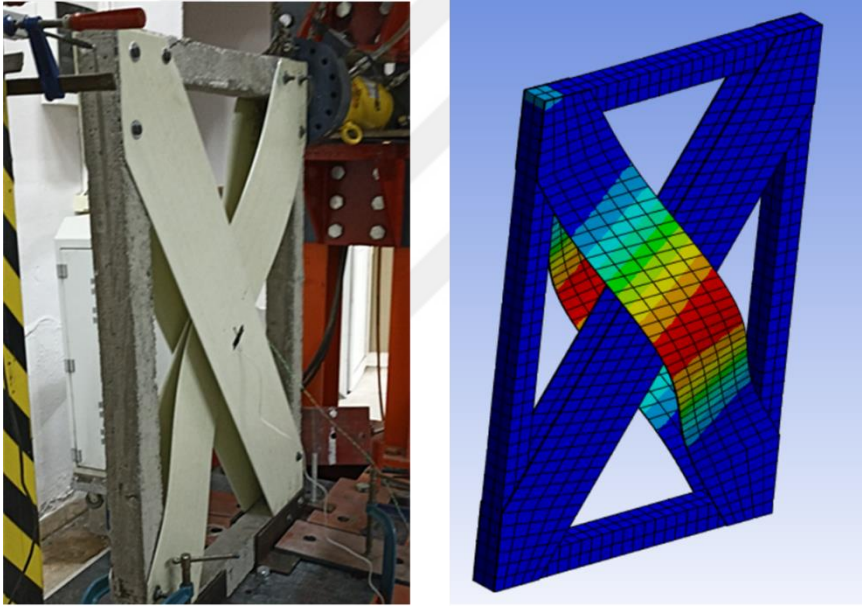


Şekil 5.3 Deneyel ve nümerik betonarme çerçeve modellerin doğrulanması

Şekil 5.3’de ise testleri yapılmış olan deneyel referans çerçeve, deneyel güçlendirilmiş çerçeve, nümerik referans çerçeve ve nümerik güçlendirme çerçevelerin sonuçları sunularak model doğrulaması yapılmaktadır. DRÇ elde edilen en büyük yanal yük değeri laboratuvar ortamında 340 N olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık nümerik olarak ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman NRÇ modelinde ise 373 N olarak elde edilmiştir. %9 oranında maksimum yanal yük taşıma kapasitesinde bir fark olduğu görülmektedir. Güçlendirilmiş deneyel (DGÇ) çerçeveden elde edilen en büyük yanal yük değeri 1040 N olarak kaydedilmiştir. Buna karşılık NGÇ modelinden elde edilen en büyük yanal yük değeri ise 1100 N olarak elde edilmiştir. Maksimum yanal yük taşıma kapasitesindeki fark güçlendirilmiş betonarme çerçeve modellerde yaklaşık olarak % 6 civarında elde edilmiştir.



a) NRÇ



b) NGÇ

**Şekil 5.4** Nümerik Referans ve Güçlendirilmiş Çerçeveslerin (NRÇ, NGÇ) eksenel yerdeğıştirmeleri deneysel ve nümerik olarak

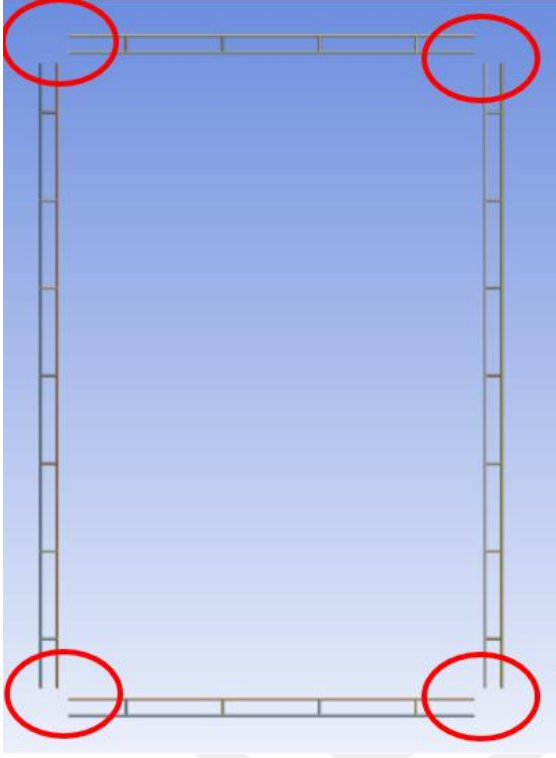
## 5.2 KOLON KİRİŞ DÜĞÜM NOKTALARI KENETLİ-KENETSİZ BETONARME ÇERÇEVELERİ KIYASLAMA

Bu bölümde kenetlenmenin betonarme çerçeveslerin yanal yük taşıma kapasitesi, eksenel yerdeğıştirme düzeyi, sünekliliği, rijitliği ve enerji yutma kapasitesi üzerine incelemelerde bulunulmuştur. Deneyslerde kullanılan betonarme çerçeve modellerin geometrik ve kesit ölçüleri kıyaslama için seçilmiştir. Malzeme bakımından C20 sınıfı bir beton ve S420 çeliği donatı olarak tanımlanmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen analizlerde kullanılan 15 parametre farklı

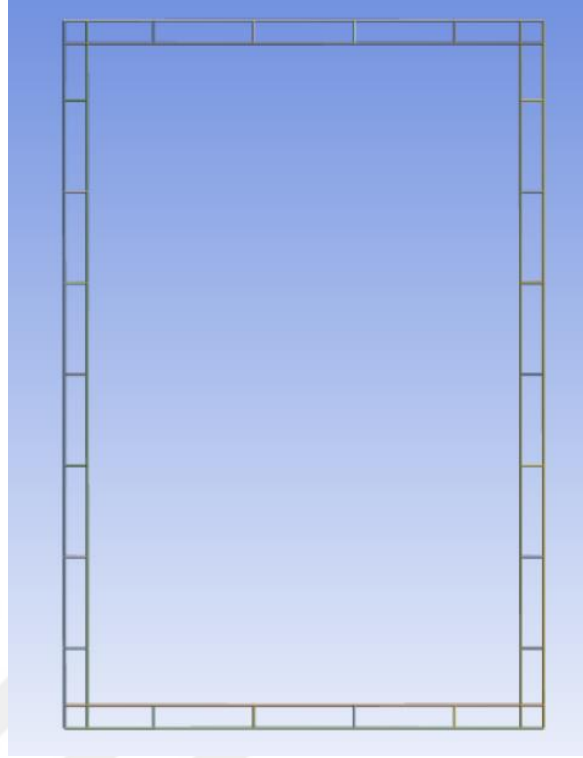
beton nonlinear parametresi ise literatürde önerildiği gibi alınmıştır (Zreid and Kaliske 2018). Beton için Drucker-Prager malzeme modeli, donatı için ise iki eğrili (bilineer) malzeme modeli seçilmiştir. Güçlendirilmiş malzeme modellerinde GFRP plakalara ve plaka beton arasında ki epoksili bölgelere ise Fracture özelliği tanımlanmıştır. Ayrıca GFRP plaka ve beton yüzey arasına epoksi malzemesi için “Cohesive Zone” tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak kohesif bölgeye hasar mekanizmaları da (Damage Initiation, Damage Evolution) tanımlanmıştır.

Üretilen referans ve güçlendirilmiş çerçeve modellerinde kolon kiriş düğüm noktalarında boyuna donatıların kenetlenme boylarının olmadığı veya zayıf olduğu durumları yansıtması için planlanarak sonlu eleman modelleri oluşturulan betonarme çerçeveler ile kolon-kiriş düğüm noktalarında boyuna donatıların kenetlenmenin olduğu durumlar nümerik olarak kıyaslanmıştır. Oluşturulan referans çerçeve model 128 cm yüksekliğine ve 88 cm genişliğine sahip iken kolon-kiriş kesitleri 8x8 cm olan bir çerçeve modellenmiştir. Çerçeve 4 adet  $\Phi 5$  boyuna donatı yerleştirilmiştir, etriyeler ise  $\Phi 5$  olup kolonlarda 7 adet olacak şekilde her 16 cm aralıklarla yerleştirilirken, kirişlerde ise  $\Phi 5$  çapındaki etriyeler 4 adet olacak şekilde her 17.6 cm aralığa bir denk gelecek şekilde dizayn edilmiştir. Güçlendirme için kullanılan GFRP plaka kalınlığı 4 mm olup genişliği ise 25 cm'dir.

Plakalar betonarme çerçevelerin yükseklik ve açıklık oranlarıyla doğrusal olarak köşe noktalara tatbiki hesaplanmıştır. Bu betonarme çerçeve sonlu eleman modelinde plakalar yatayda 142 mm düşeyde ise 205 mm olacak şekilde kolon kiriş birleşim noktalarına uygulanmıştır. İmal edilen betonarme çerçevenin birebir aynısını yansıtabilecek şekilde sonlu eleman modellerinde 2 cm paspayı bırakılmıştır. Aşağıda şekil 5.5'de kenetsiz ve kenetli durumların donatı detayı verilmektedir.

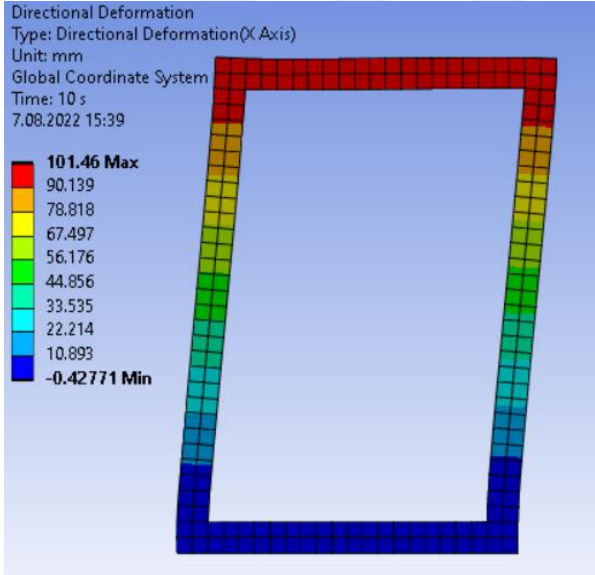


a) Kenetsiz

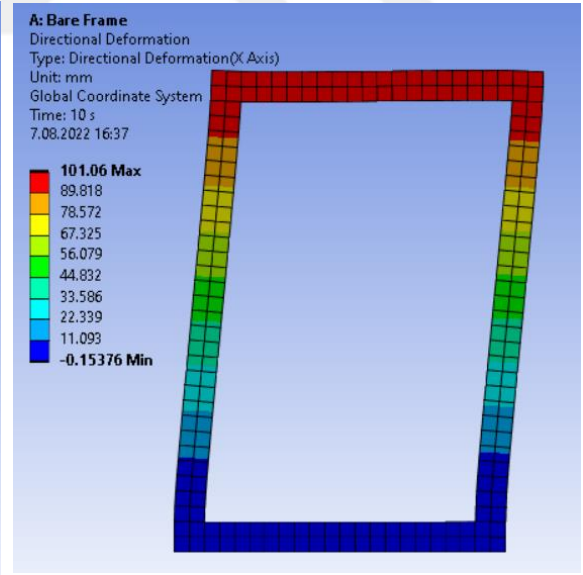


b) Kenetli

Şekil 5.5 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin donatı detayı

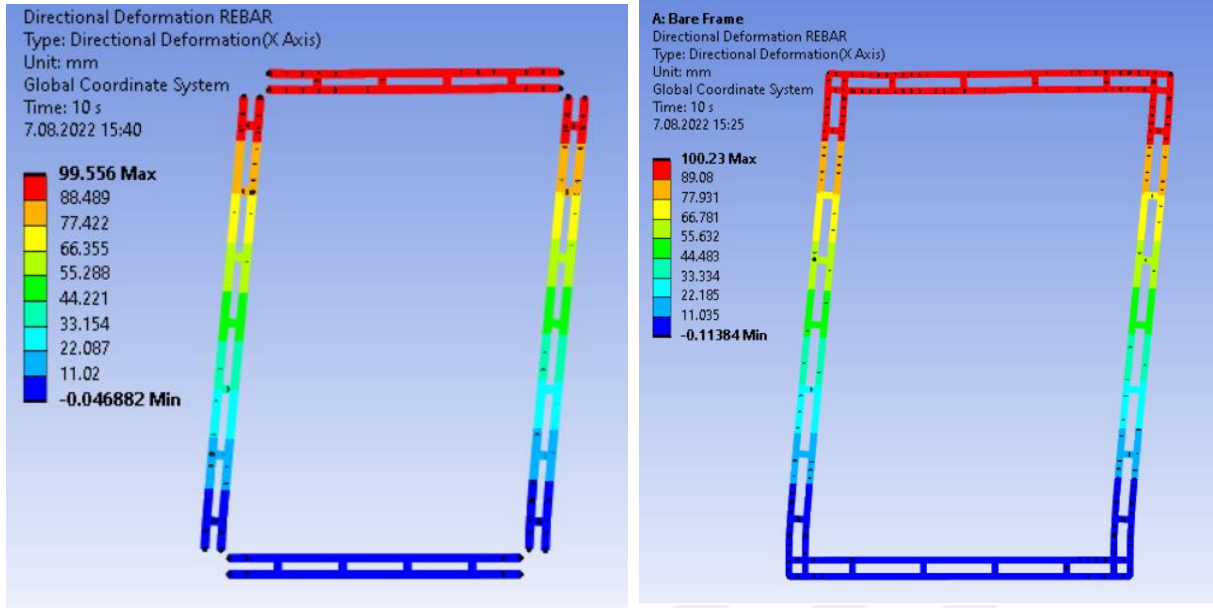


a) Kenetsiz



b) Kenetli

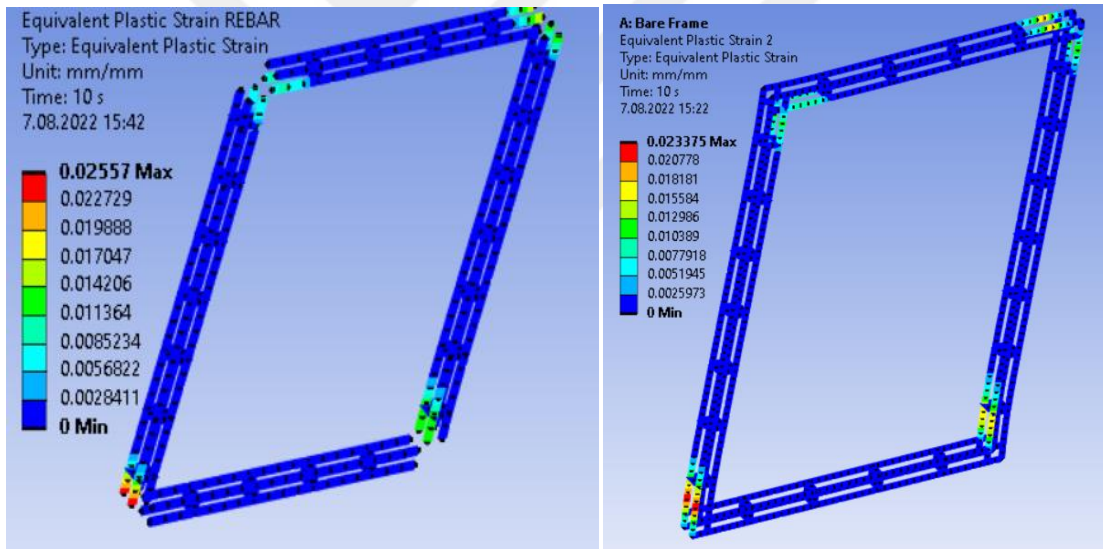
Şekil 5.6 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin X eksenli yerdeğiştirmeleri



a) Kenetsiz

b) Kenetli

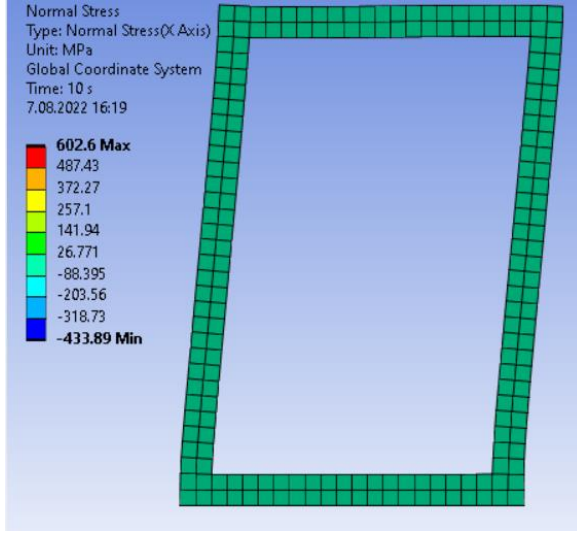
Şekil 5.7 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin X eksenli donatı yerdeğıştirmeleri



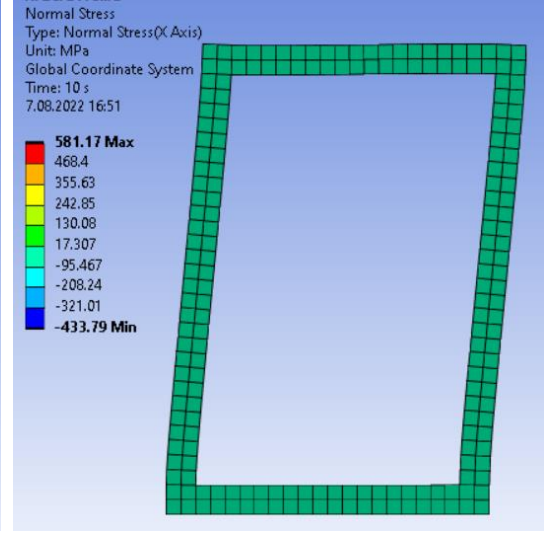
a) Kenetsiz

b) Kenetli

Şekil 5.8 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin donatı plastik deformasyonlar

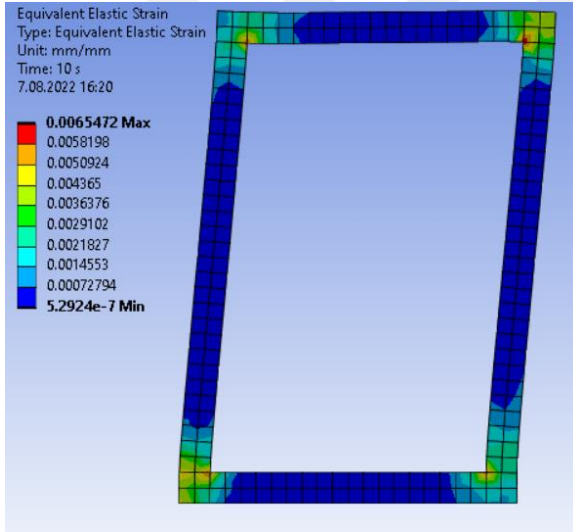


a) Kenetsiz

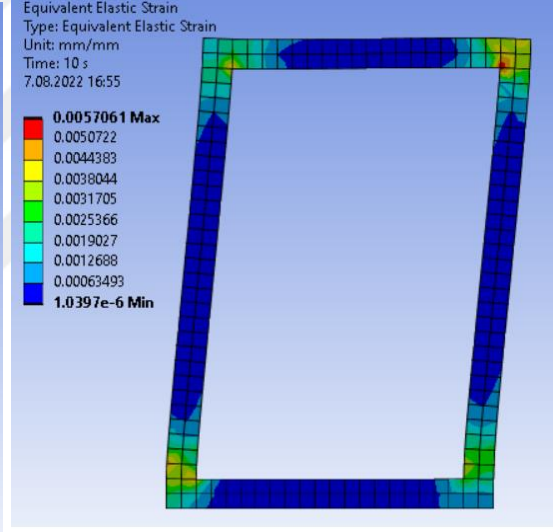


b) Kenetli

Şekil 5.9 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin X eksenli gerilmeleri

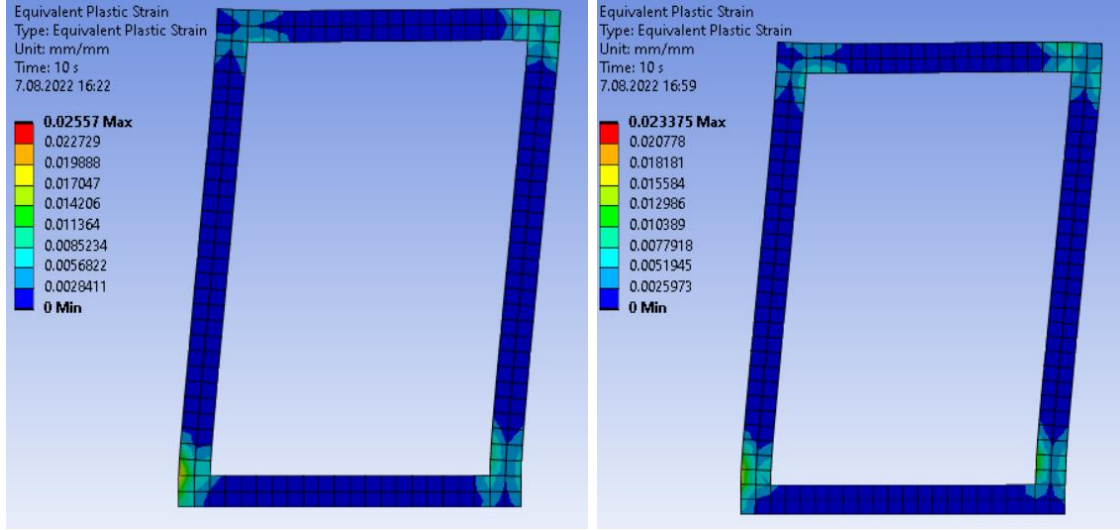


a) Kenetsiz



b) Kenetli

Şekil 5.10 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçeveslerin elastik deformasyonları

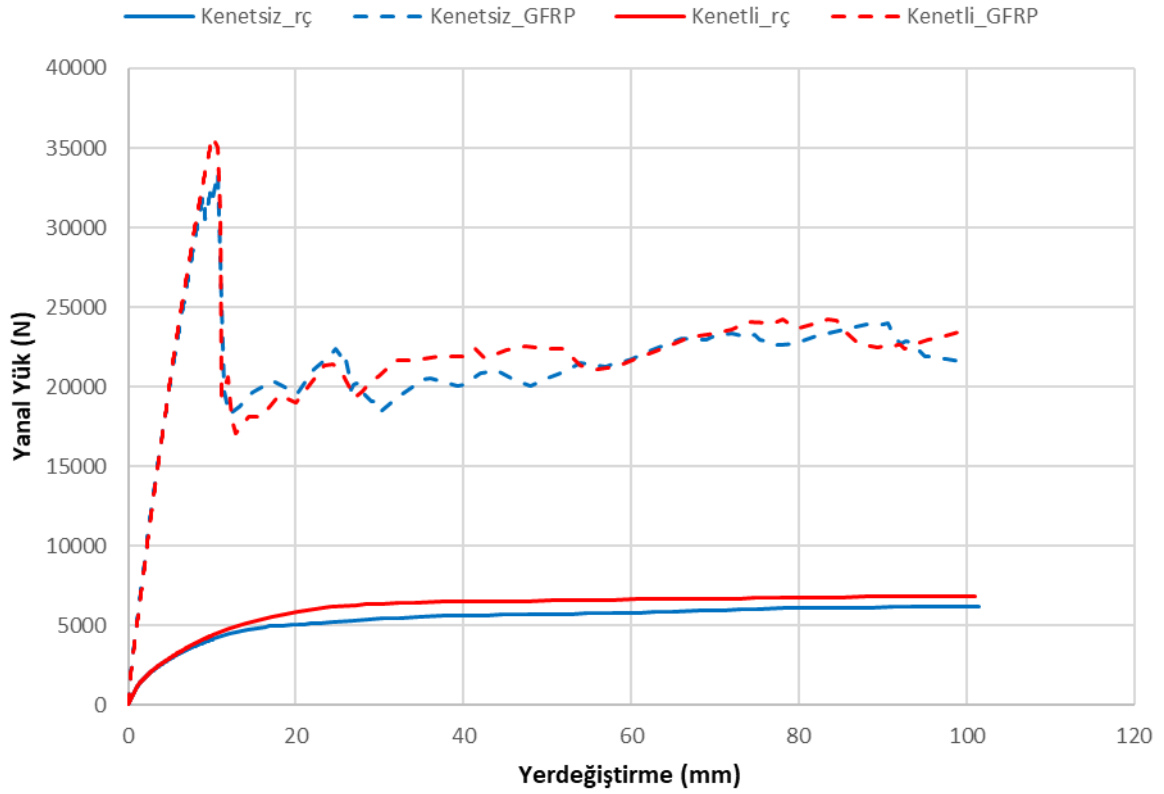


a) Kenetsiz

b) Kenetli

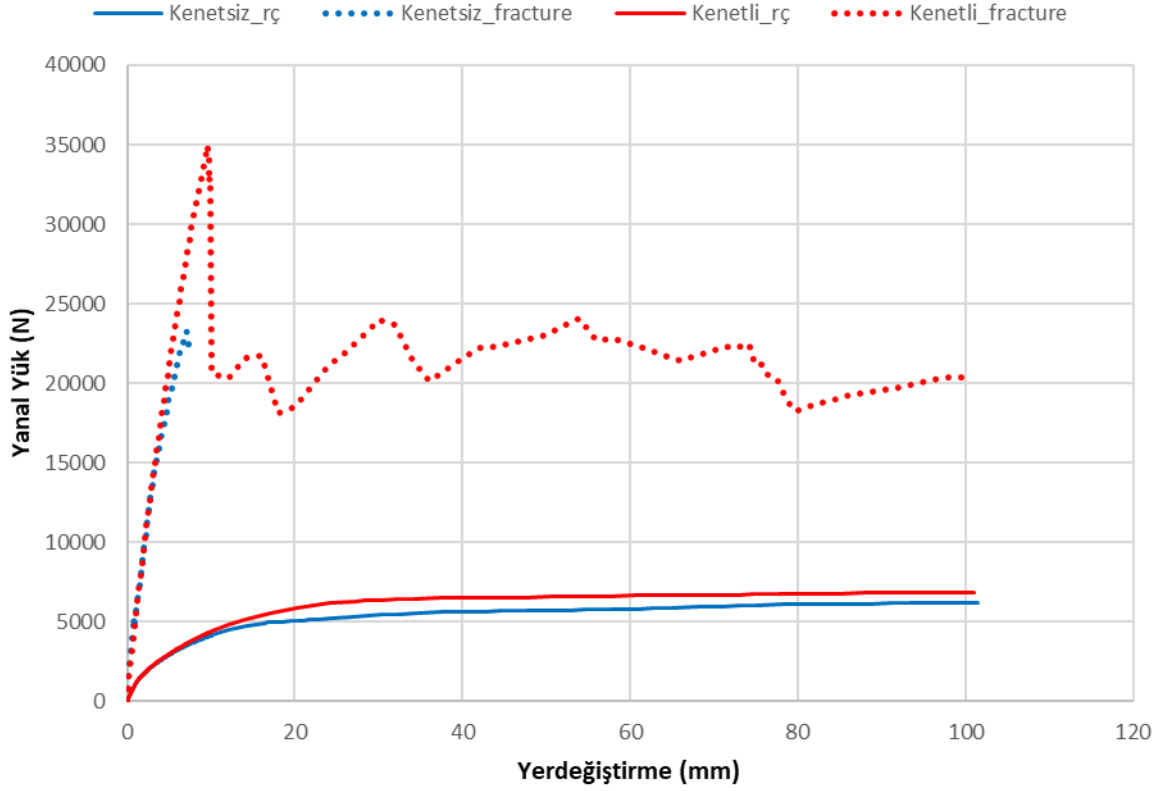
Şekil 5.11 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin plastik deformasyonları

### Kolon Kiriş Düğüm Noktası Kenetlenme Değişimi



Şekil 5.12 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçevelerin yanal yük-yerdeğiştirme grafiği tam bağlı durum için

## Kolon Kiriş Dügüm Noktası Kenetlenme Değişimi



şekil 5.13 Nümerik Referans Kenetsiz ve Kenetli Çerçvelerin yanal yük-yerdeğiştirme grafiği fracture durum için

Kenetsiz referans çerçvenin en büyük yanal yük taşıma kapasitesi 6186 N iken kenetli referans çerçvede 6850 N'a ulaştığı sonlu eleman modellerinden elde edilmiştir. Kenetli referans betonarme çerçvelerde %11 civarında yük taşıma kapasitesinde bir artış meydana geldiği sonucu elde edilmektedir. Bu sonuç mevcut betonarme çerçve geometrisi için geçerlidir. Betonarme çerçve ebatları değiştikçe bu oranın değişmesi özellikle daha gerçek bir yapı çerçvesi ebatlarına ulaşması durumunda artacağı düşünölmektedir.

Güçlendirilmiş kenetsiz ve kenetli betonarme çerçve modellerinde ise iki durum incelenmiştir. Bunlardan ilkinde uygulanan güçlendirme GFRP kompozit plakaların betonarme çerçve ile tam bağlı çalıştığı kabulü yapılmıştır. Bu durumda kenetsiz betonarme çerçvenin yanal yük taşıma kapasitesi 33421 N'a ulaşırken kenetli çerçvenin ulaştığı en büyük yanal yük taşıma kapasitesi 35678 N olarak elde edilmiştir. Bu durumda ise %7 civarında bir farkın meydana geldiği görölmektedir.

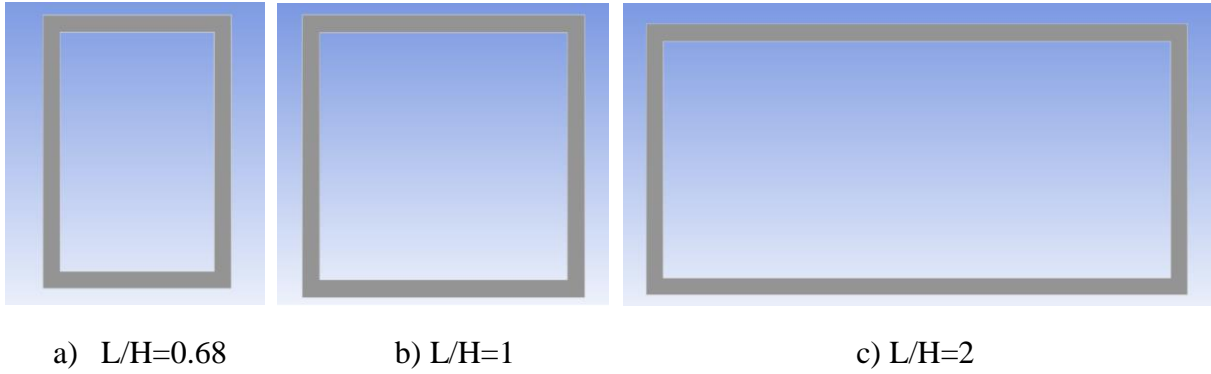
Ancak sonlu eleman modellere cohesive zone ve fracture özelliklerini dahil ettiğimde güçlendirilmiş kenetsiz modelin ulaştığı en büyük yanal yük taşıma kapasitesi 23270 N civarında olmaktadır. Buna karşılık kenetli modelde ise yanal yük taşıma kapasitesi 34926 N değerine ulaşmıştır. Bu modelin daha doğru çalıştığı anlaşılmaktadır. Bu durumda ise kenetsiz ve kenetli modellerin güçlendirilmiş durumları arasında ki yanal yük taşıma kapasitesi farkı 11656 N olup bu değer güçlendirilmiş kenetsiz çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesinin %50 sine tekabül etmektedir. Yani kenetlenmenin olduğu bir çerçevede yapılan güçlendirme sonucunda yük taşıma kapasitesi kenetsiz bir çerçevenin güçlendirilmesine göre %50 daha fazla yanal yük taşıdığı sonucunu ortaya koymaktadır.

Ayrıca bunlara ek olarak referans çerçevelerle güçlendirilmiş çerçeveler kendi içerisinde kenetsiz ve kenetli şeklinde kıyaslandığında kenetsiz bir çerçevede yapılan güçlendirme sonucunda elde edilen yük taşıma kapasitesi %300 civarında artış gösterirken kenetli referans çerçevesinde ise bu durum yaklaşık olarak %400 civarına ulaşmaktadır. Bu durum ise beton dayanımı düşük betonarme çerçevelere uygulanacak olan güçlendirmenin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.

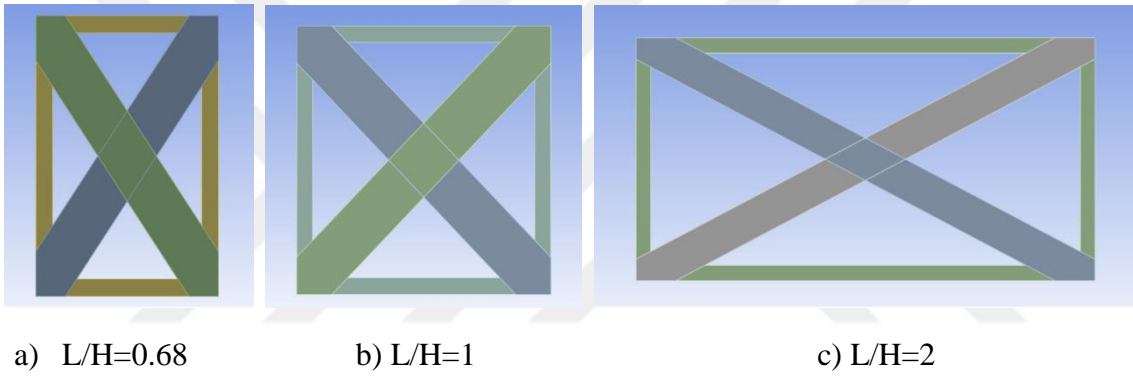
### **5.3 BETONARME ÇERÇEVELERDE AÇIKLIK/YÜKSEKLİK (L/H) ORANI DEĞİŞİMİNİN İRDELENMESİ**

Bu bölümün amacı betonarme çerçevelerin geometrik özelliklerindeki açıklık/yükseklik oranı değişiminin betonarme çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesi, eksenel yerdeğiştirmeler, süneklik, rijitlik ve enerji yutma kapasiteleri üzerine olan etkisini irdelemektir. Bu bağlamda deneysel olarak testleri gerçekleştirilen çerçevelerin açıklık/yükseklik oranı olan  $88/128=0.68$  ilk analiz oranı kabul edilmiştir. Daha sonrasında ise bu oranın 1 ve 2 olduğu durumlarda betonarme çerçevenin yapısal davranışı yukarıda belirtilen sonuçlar bakımından incelenmiştir. Bu durumlarda çerçeve geometrik özellikleri deneysel çerçevelerin geometrik özellikleri bakımından aynı kalırken beton basınç dayanımı 20 MPa olarak seçilmiş ve donatı olarak s420 çeliği tanımlanmıştır sonlu eleman modellerine. Betonarme çerçevelerde açıklık/yükseklik (kiriş uzunluğunun (L) kolon yüksekliğine (H) oranı değişimi) (L/H) üç farklı değerde incelenmiştir. Sırasıyla L/H oranlarının 0.68, 1 ve 2 olması durumları sonuçları irdelenecektir. Üç durumda da kullanılan GFRP kompozit güçlendirme plakası genişliği 25 cm ve kalınlığı 4 mm olarak modellenmiştir. İlk çerçeve  $88/128=0.68$ , ikinci çerçeve  $128/128=1$

ve üçüncü çerçeve  $256/128=2$  geometrik ölçülere sahiptirler. Şekil 5.14 ve 5.15’de üç orandaki çerçevelerin referans ve güçlendirilmiş modelleri verilmiştir.

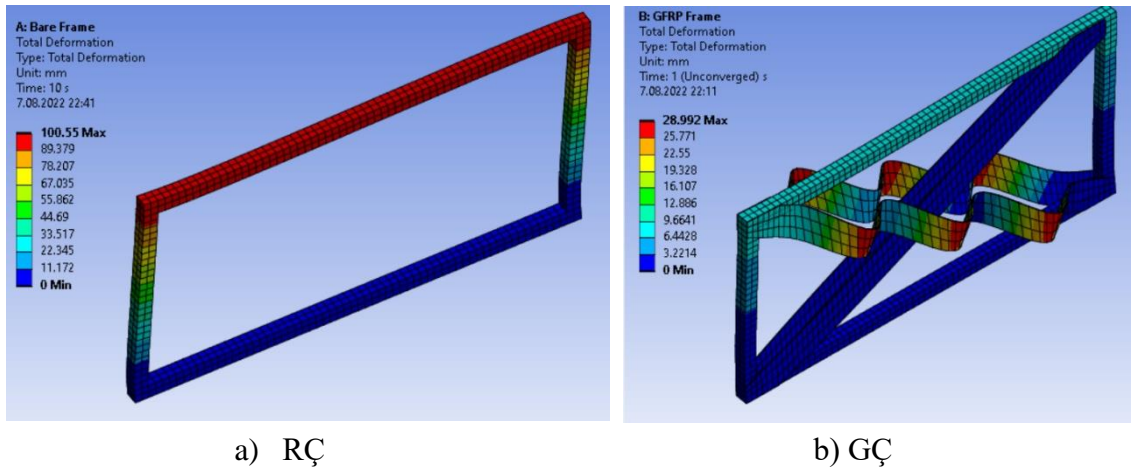


Şekil 5.14 Üç farklı L/H oranlarına sahip referans betonarme çerçeve sonlu eleman model

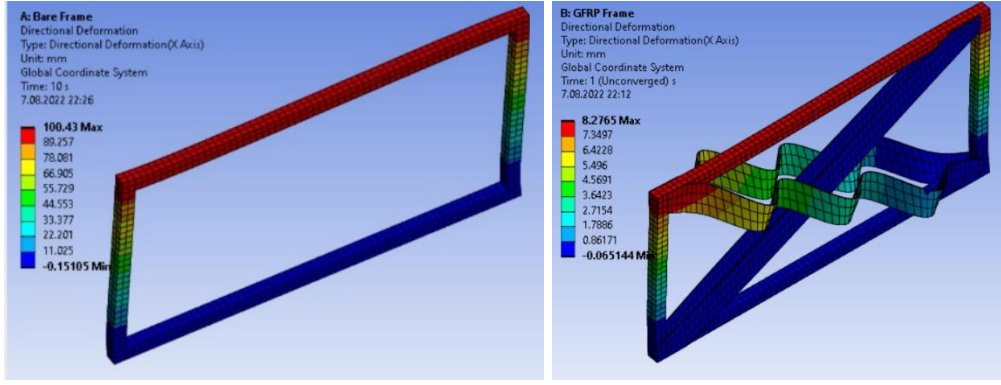


Şekil 5.15 Üç farklı L/H oranlarına sahip güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model

Modellere ait analiz sonuçları aşağıda şekillerde verilmektedir.



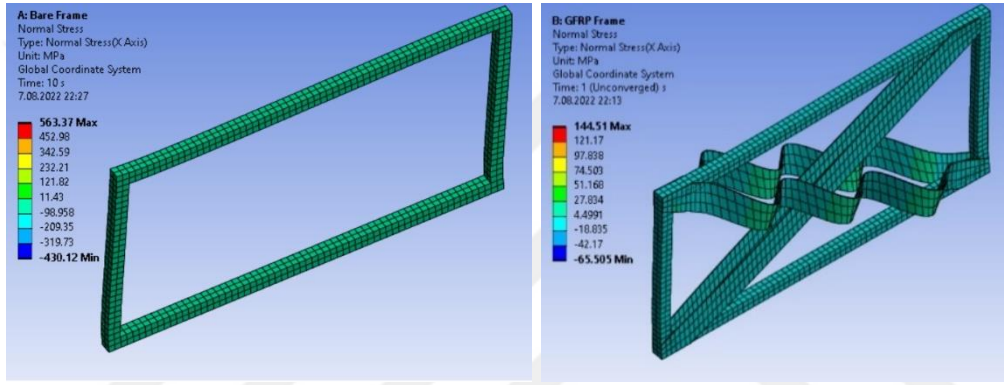
Şekil 5.16 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

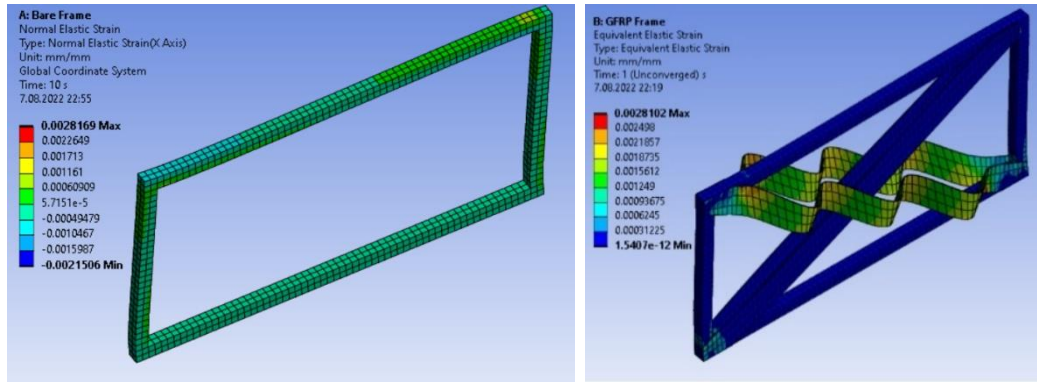
Şekil 5.17 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli yerdeğiştirme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

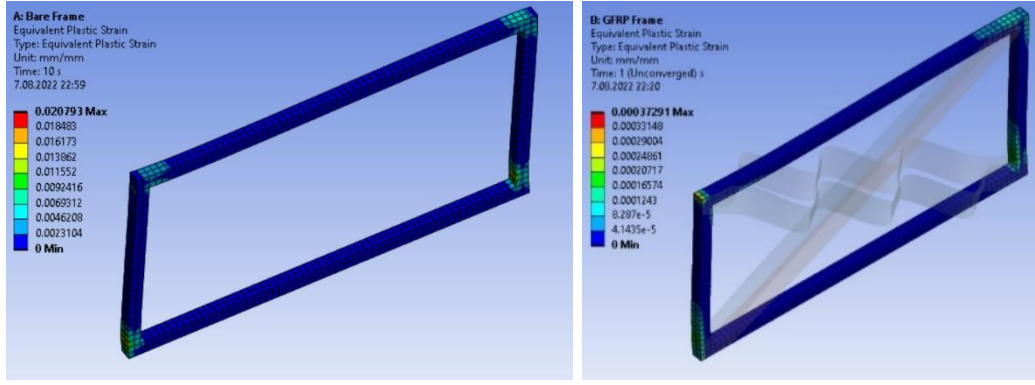
Şekil 5.18 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

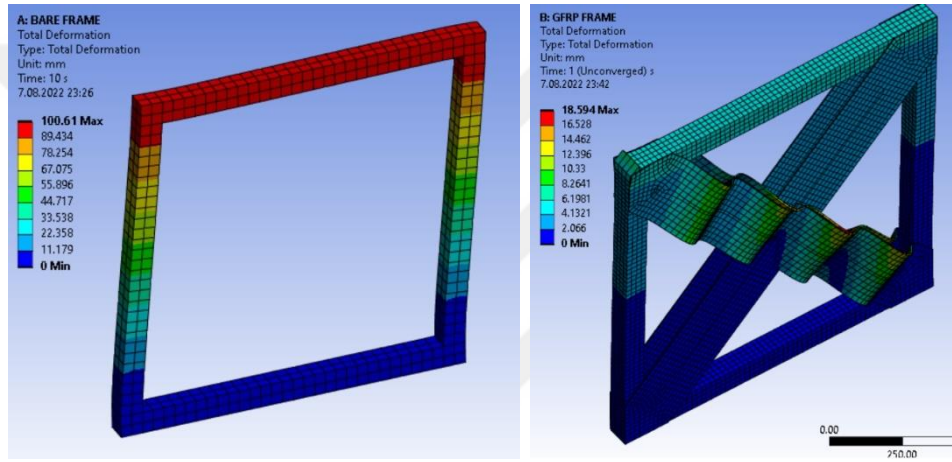
Şekil 5.19 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

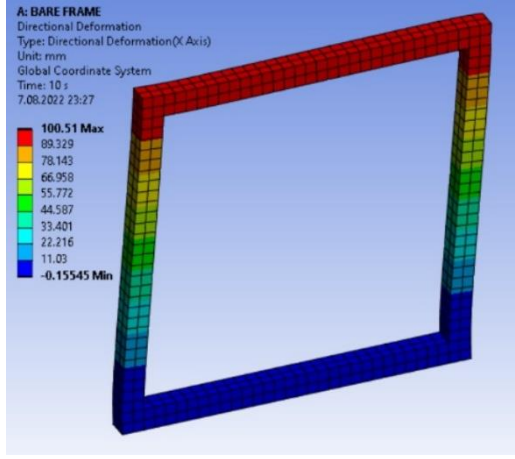
Şekil 5.20 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları



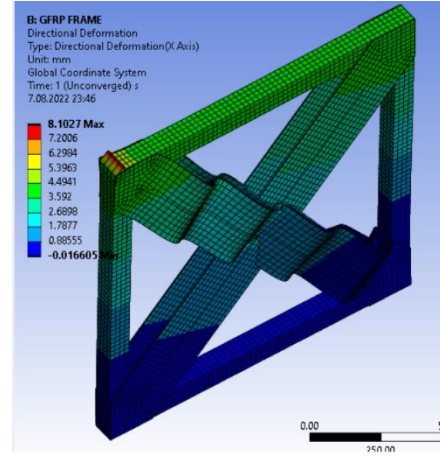
a) RÇ

b) GÇ

Şekil 5.21 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları

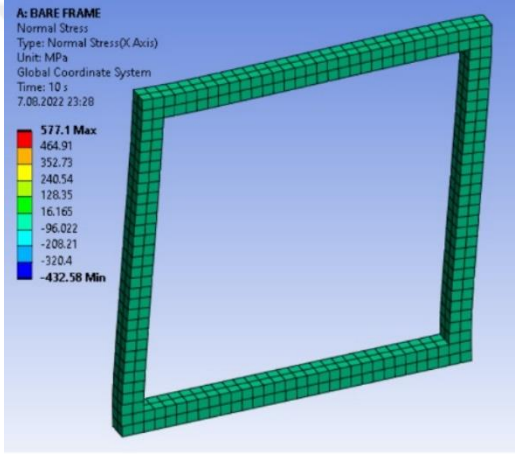


a) RÇ

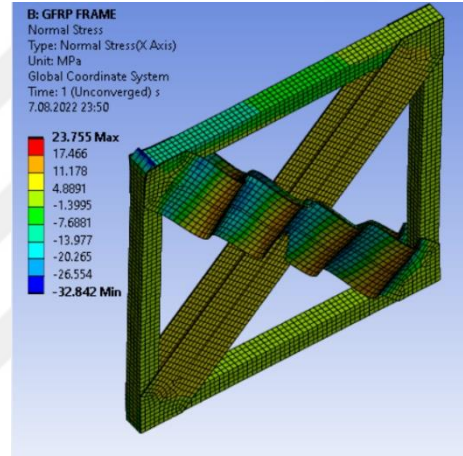


b) GÇ

Şekil 5.22 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli yerdeğiştirme sonuçları

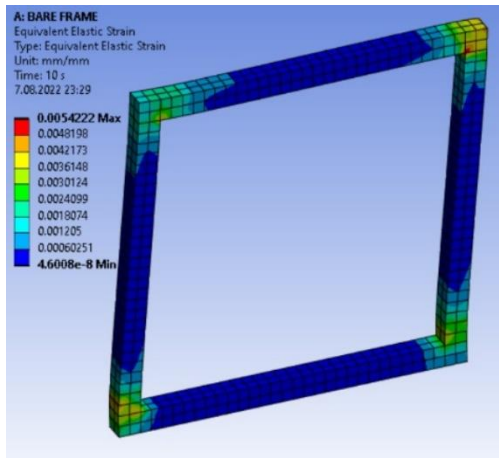


a) RÇ

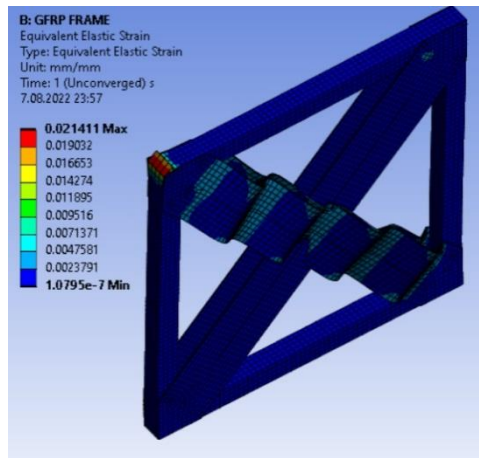


b) GÇ

Şekil 5.23 L/H=2 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları

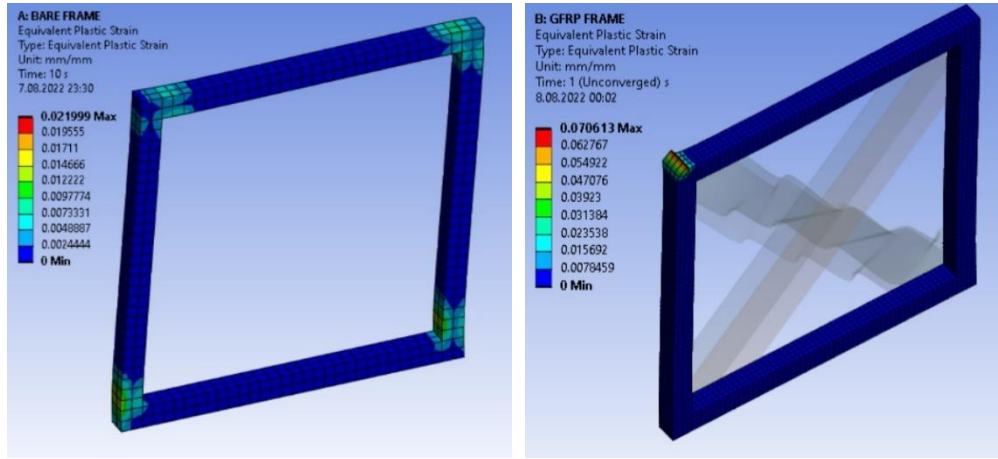


a) RÇ



b) GÇ

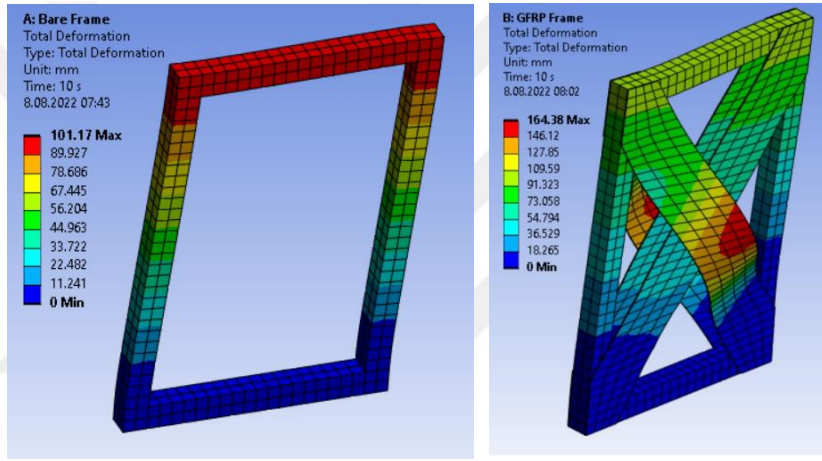
Şekil 5.24 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

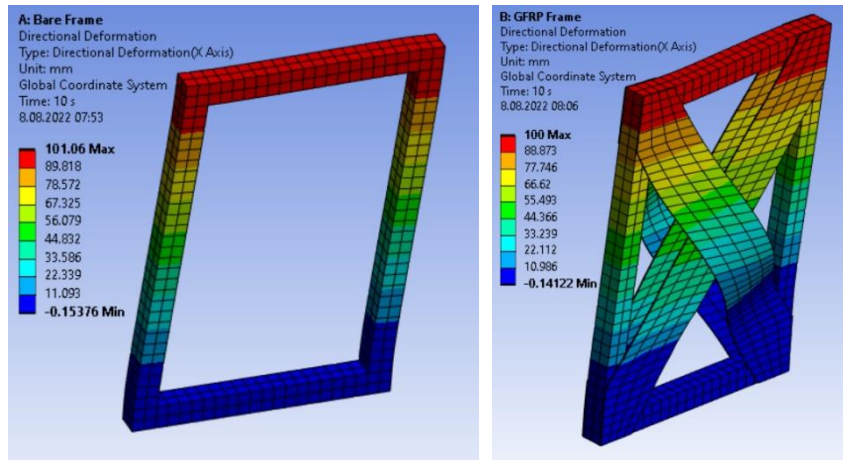
Şekil 5.25 L/H=1 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

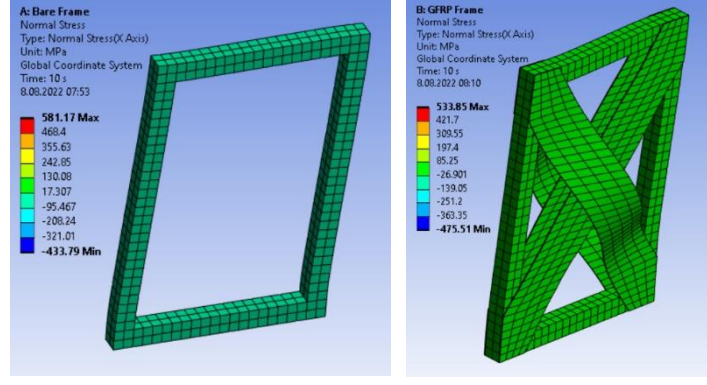
Şekil 5.26 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model toplam yerdeğiştirme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

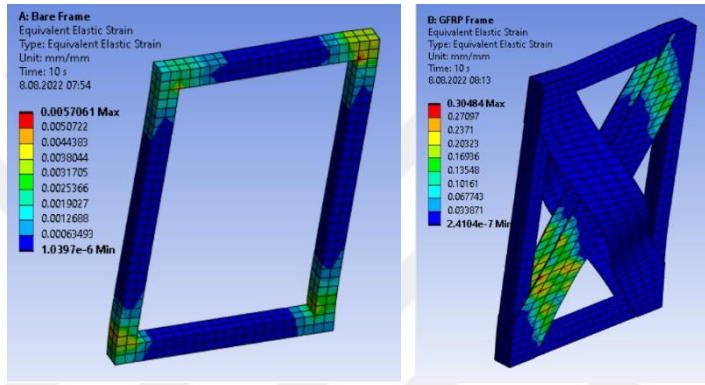
Şekil 5.27 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli yerdeğiştirme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

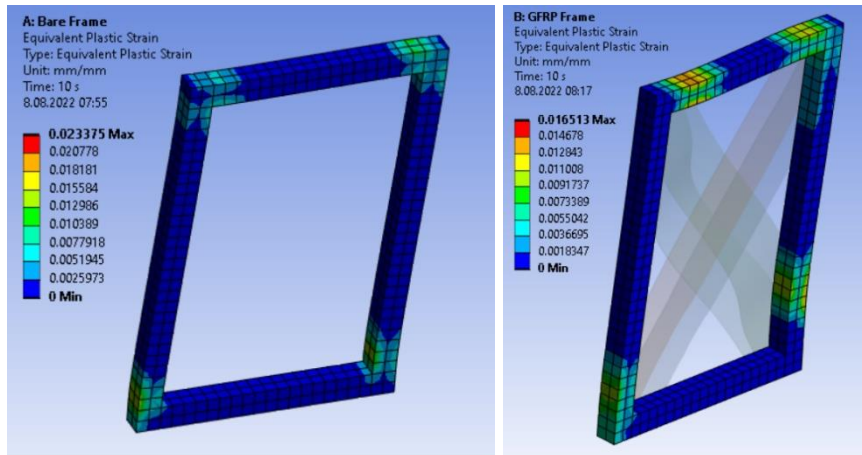
Şekil 5.28 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

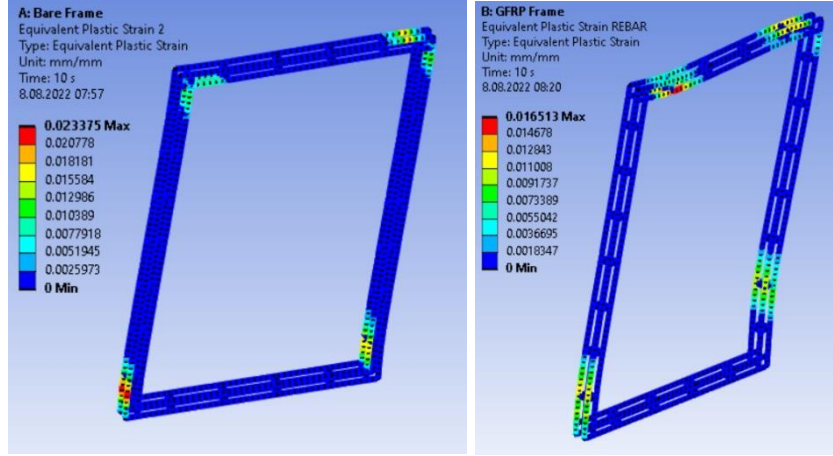
Şekil 5.29 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model elastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

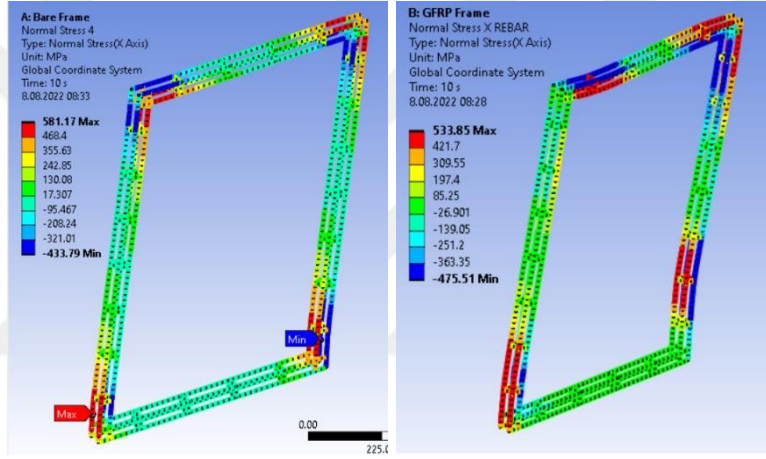
Şekil 5.30 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

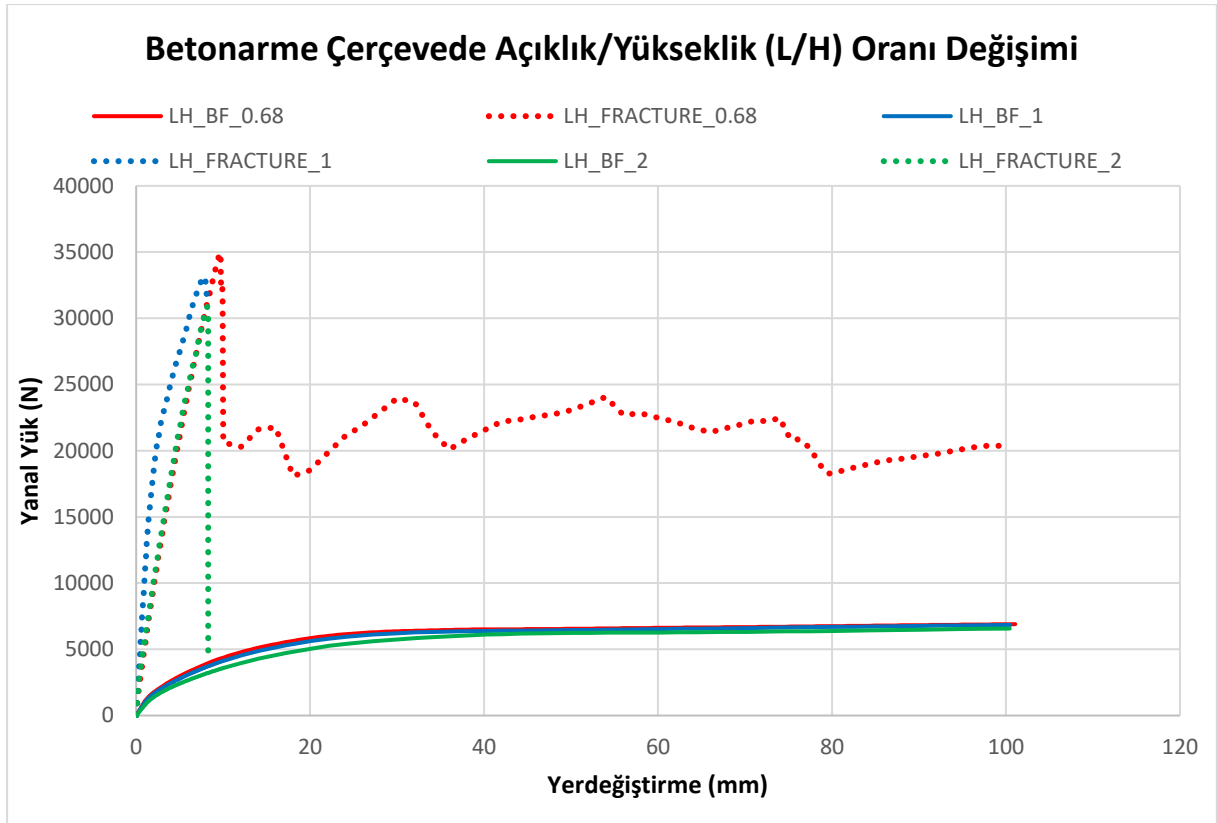
Şekil 5.31 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve donatı sonlu eleman model plastik deformasyon sonuçları



a) RÇ

b) GÇ

Şekil 5.32 L/H=0.68 oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve donatı sonlu eleman model x eksenli gerilme sonuçları



**Şekil 5.33** L/H oranlarına sahip referans ve güçlendirilmiş betonarme çerçeve yanal yük taşıma kapasiteleri

Yapılan L/H oran değişimi analizlerinden referans çerçeveler için elde edilen sonuçlar L/H=0.68 için 6899 N, L/H=1 için 6844 N ve L/H=2 için 6567 N olarak elde edilmiştir. Açıklık miktarı arttıkça yanal yük taşıma kapasitesinin az bir miktarda da olsa azaldığı görülmektedir.

Güçlendirilmiş modellerde ise 0.68 orana sahip modelden elde edilen en büyük yanal yük taşıma kapasitesi 34926 N'dur. Bu değer yalın halde bulunan betonarme çerçeve modelin yaklaşık olarak 5 katı bir yanal yük değerine çıktığını göstermektedir. Güçlendirilmiş modellerden 1 oranına sahip çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesi 33168 N'a ulaştığı elde edilmiştir. Bu değer 1 oranına sahip yalın halde bulunan çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesinin yaklaşık 5 katıdır. Üçüncü ve son model olan 2 oranına sahip güçlendirilmiş çerçevede yanal yük taşıma kapasitesi 30870 N değerine ulaşmıştır. Bu değerde yalın halde bulunan ve 2 oranına sahip olan betonarme çerçeve için yaklaşık olarak 5 katı bir yanal yük taşıma kapasitesine denk gelmektedir. Yapılan irdelemeler sonucunda yalın halde bulunan betonarme çerçeveler üzerinde açıklık/yükseklik oranının etkinliği nispeten daha azdır ve açıklık oranı arttıkça yanal yük taşıma kapasitesinde azalma meydana geldiği görülmektedir. Ancak güçlendirilmiş modellerde açıklık/yükseklik oranının etkisi daha bariz bir şekilde ortaya

çıkılmaktadır. 0.68 oranına sahip betonarme çerçeve modeli ile 2 oranına sahip betonarme çerçeve model arasında %13 civarında bir yanal yük taşıma kapasitesinde azalma meydana gelmiştir.

1 oranına sahip güçlendirilmiş çerçevenin başlangıç rijitliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Yanal yük taşıma kapasitesi orta seviyede kalsa da daha rijit bir yapıya döndüğü görülmektedir.

#### **5.4 BETONARME ÇERÇEVE KESİT RİJİTLİK DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

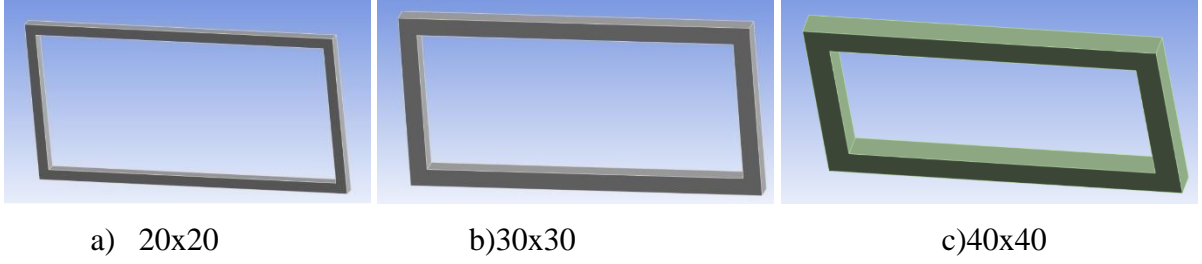
Bu bölümde kesit rijitlik değişiminin betonarme yapıların yanal yük kapasitesi üzerine etkinliğini ve özellikle yapılacak güçlendirmenin ne düzeyde etkin rol oynadığı görülmek istenmektedir. Mevcut yapı stoku içerisinde çok narin kesitli kolon kirişe sahip betonarme çerçevelerin olduğu dikkate alındığında kesit değişiminin incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmüştür. Betonarme çerçevelerde güçlendirmenin kesit rijitlik değişimi üzerindeki etkinliğini incelemek amacıyla üç farklı kesitte karşılaştırma yapılmıştır. Bu üç farklı rijitlikteki kesite sahip çerçevelerin açıklık ve yükseklik değerleri birbirinin aynısı olup 3metre yüksekliğinde ve 6 metre açıklığında olarak modellenmişlerdir. Ayrıca kesitlerdeki donatı oranları minimum olacak şekilde dizayn edilmiştir. Kesit rijitlik oranlarının değişimini incelemek için en narin kesitli çerçeve rijitlik değerine bölünerek diğer çerçevelerin rijitlik oranları belirlenmiştir. Bu değerler aşağıda sırası ile verilmektedir.

$$K1=EA1 ; EA1/EA1=1$$

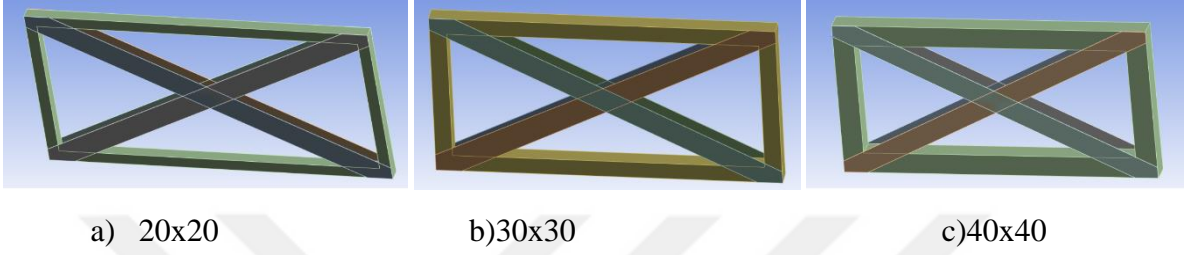
$$K2=EA2 ; EA2/EA1= 2.25$$

$$K3=EA3; EA3/EA1= 4$$

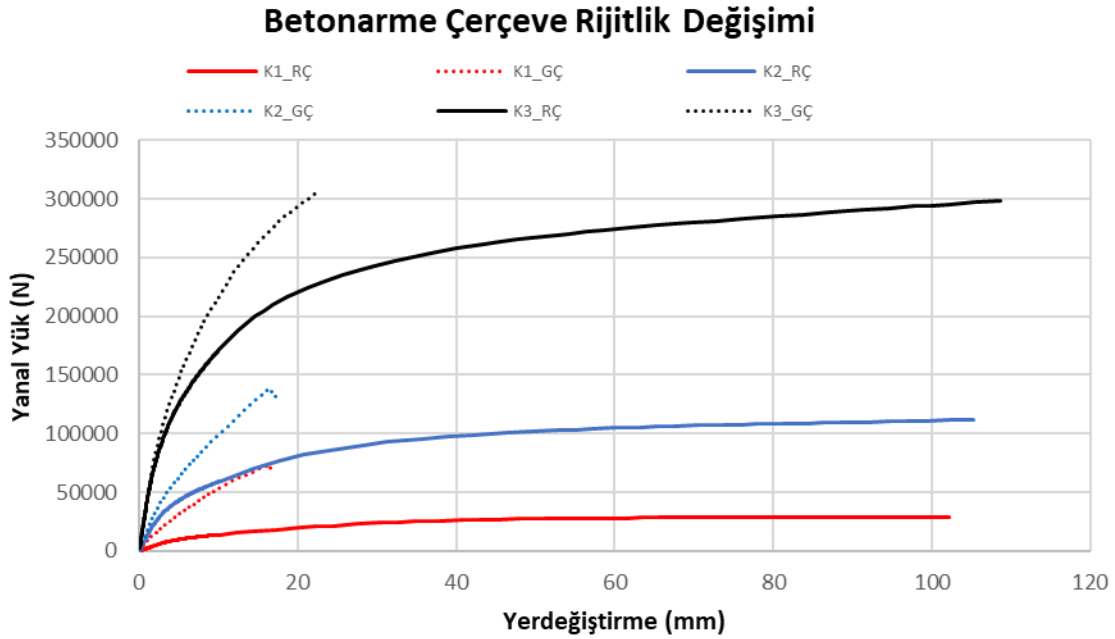
Kesit alanlar sırasıyla 20x20 cm, 30x30 cm ve 40x40 cm olarak modellenmiştir. Güçlendirmede ise 50 cm genişliğinde ve 4 mm kalınlığında GFRP kompozit plakalar bütün analizlerde kullanılmıştır. Aşağıda şekil 5.34'de üç farklı kesite sahip çerçeve modellerin yalın halleri verilmektedir.



Şekil 5.34 Farklı rijitliklere sahip modellenmiş betonarme çerçeve yalın modelleri



Şekil 5.35 Farklı rijitliklere sahip güçlendirilmiş betonarme çerçeve sonlu eleman modelleri



Şekil 5.36 Betonarme çerçevelerde kesit rijitlik değişimlerinin yanal yük kapasitesi yerdeğiştirme sonuçları yalın ve güçlendirilmiş modeller için

Yalın halde bulunan betonarme çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesi kesit rijitliklerine göre nasıl değiştiği sonlu eleman sonuçlarında görülmektedir. Kesit rijitlik oranının 1 olduğu durumla kesit rijitlik oranının 4 olduğu durumlar kıyaslandığında yük taşıma kapasitelerinin 10 kat farklı olduğu sonucu elde edilmiştir. Yalın halde bulunan 20x20 cm'lik kesitlere sahip betonarme çerçeve yanal yük kapasitesi olarak 29.2 KN değerine ulaşmıştır. 30x30cm'lik kesite

sahip yalın çerçeve ise 111.7 KN değerine ulaşmıştır. Üçüncü ve en büyük kesite sahip olan 40x40 cm'lik çerçevenin yalın hali ise 298 KN kapasitesine ulaşmıştır. Kesit alan değişiminin yanal yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi yalın çerçevelerde de açıkça görülmektedir. En narin kesite sahip çerçeveye oranla 40x40cm'lik çerçevenin yanal yük kapasitesi yaklaşık 10 kattan daha fazla artış göstermiştir.

Güçlendirilmiş modelleri irdelenecek olursak 20x20 cm'lik en narin kesitli çerçeve güçlendirme sonrasında 73.7 KN yanal yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu değer yalın halde ki yanal yük değerinin 2.5 katına tekabül etmektedir. 30x30 cm'lik kesitte ise 137.6 KN değerine ulaşmıştır yanal yük değeri. Bu değerde yalın haldeki 30x30cm'lik kesitin yanal yük değerinden %25 civarında bir artış olduğu açıktır. Üçüncü ve en büyük kesitli 40x40cm'lik çerçevede ise maksimum 308 KN değerine ulaşmıştır ki bu değerde yalın halde bulunan çerçevenin yanal yük taşıma değerinden %3 civarında daha fazladır.

Betonarme çerçevelerin kesit değişimlerinin yanal yük kapasitesi üzerine yapılan çalışma sonucunda güçlendirmenin narin kesitli çerçevelerde çok daha etkin rol oynadığı görülmüştür. Kesit alanlar arttıkça güçlendirme sonucunda ulaşılan en büyük yanal yük değerleri yalın haldekine yaklaştığı görülmüştür. Narin kesitli çerçeveler için bu güçlendirmenin yapılması önerilmektedir. Ayrıca yapılan güçlendirmenin bütün kesit oranlarında başlangıç rijitliğini artırdığı da açıkça yer almaktadır.

## **5.5 GÜÇLENDİRMEDE KULLANILAN GFRP PLAKA EKSENEL RİJİTLİK DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

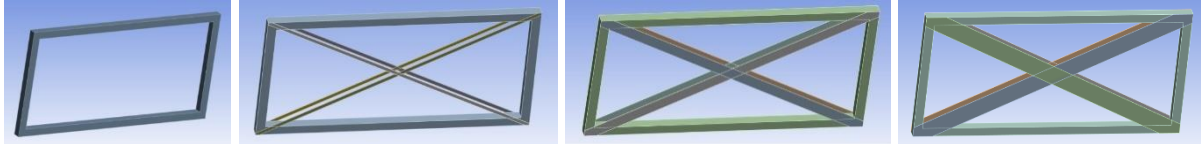
Bu kısımda betonarme çerçevelerin güçlendirilmesinde kullanılacak plaka eksenel rijitlikleri değişiminin çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi irdelenmiştir. Bu bağlamda kesit ve geometrisi sabit tutulan betonarme çerçeve sonlu eleman modellerine tatbik edilen GFRP kompozit plakaların kesit alanları değiştirilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Özellikle narin betonarme çerçevelerde güçlendirmede uygulanan GFRP plakaların genişlik değişiminin etkinliğini görmek için 20x20cm kolon giriş kesitlerine sahip bir çerçevede üç farklı rijitlikteki plakalar ile test edilmiştir. Betonarme çerçevenin ebatları 3m yüksekliğinde ve 6m genişliğindedir. Uygulanan plakalar P1, P2 ve P3 olarak isimlendirilmiştir. Eksenel rijitlik oranları ise:

$$P1=EA_1 ; EA_1/EA_1=1$$

$$P2=EA_2 ; EA_2/EA_1=3$$

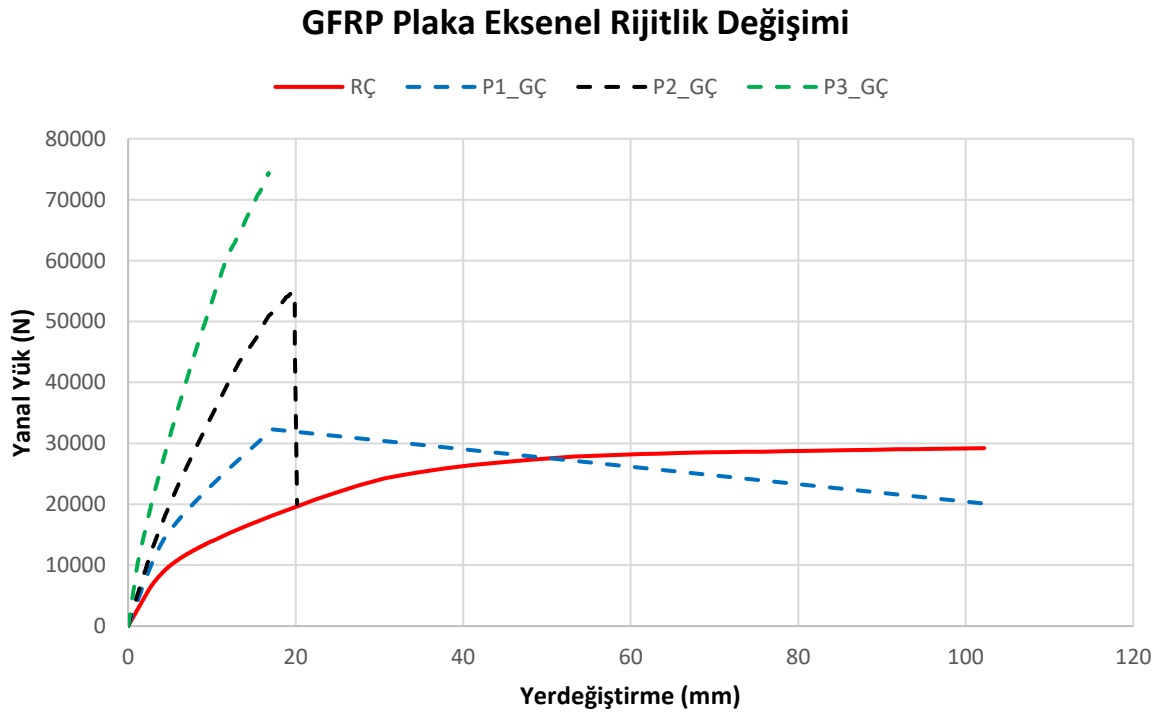
$$P3=EA_3 ; EA_3/EA_1=5$$

P1'in rijitlik oranı referans olarak seçilmiş ve 1 olarak kabul edilmiştir. P1 kesitinin sahip olduğu rijitlik değeri P2 ve P3 değerleri ile oransal olarak kıyaslanmıştır.



**Şekil 5.37** Yalın ve farklı GFRP plaka genişliğine sahip kompozit elemanlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeve modelleri

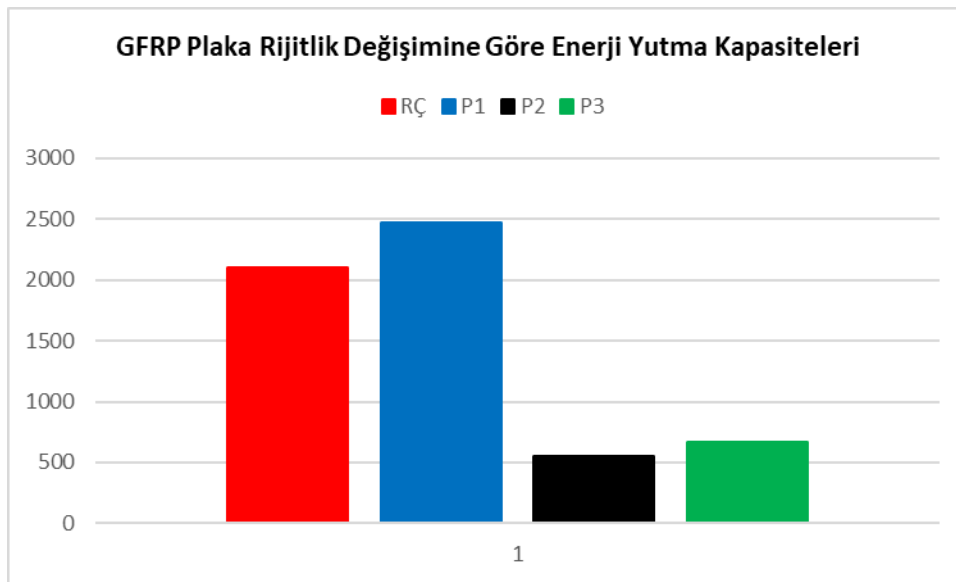
Uygulanan plaka kalınlıkları sırasıyla 10 cm, 30 cm ve 50 cm'dir. Betonarme çerçeve sonlu eleman modelleri aşağıda şekillerde verilmektedir.



**Şekil 5.38** Yalın ve farklı eksenel rijitliğe sahip GFRP plaka kompozit elemanlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeve modellerinin yanıl yük-yerdeğiştirme değerleri

Yalın halde 20x20cm'lik kesitlere sahip betonarme çerçeve yanal yük taşıma kapasitesi 29.2 KN'a ulaşmıştır. Bu yalın çerçeve 10 cm genişliğindeki çapraz plakalarla güçlendirildiğinde ise 32.3 KN'a çıkarmıştır yanal yük taşıma kapasitesini. 30 cm genişliğindeki çapraz plakalarla güçlendirildiğinde ise yanal yük taşıma kapasitesi 54.8 KN değerine ulaşmıştır. 50 cm genişliğindeki GFRP plaka tatbiki sonucunda ise yanal yük taşıma kapasitesi 74.4 KN'a ulaşmıştır. Bu değerler güçlendirmede uygulanan plaka genişliğinin artmasının yanal yük taşıma kapasitesini narin kesitli çerçevelerde artırdığı çok açıktır. Ayrıca güçlendirmede uygulanan plaka genişliğinin artışı başlangıç rijitliğini de artırdığı ortadadır. Narin kesitli betonarme çerçevelerde uygulanacak plaka genişliği enerji yutma kapasitesi üzerinde de aktif rol oynadığı görülmektedir.

Enerji yutma kapasitesi açısından kıyaslandığında ise yalın halde bulunan betonarme çerçeve hayli yüksek bir enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise yalın halde bulunan çerçevenin başlangıç rijitliği daha düşük ve daha sünek bir yapısal davranışa sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Diğer yandan rijitlik oranı en düşük GFRP plaka olan P1 plakasının uygulandığı durumda ise en fazla enerji tüketme kapasitesine sahip betonarme çerçeve elde edilmiştir. Ancak GFRP plaka rijitliğinin artması betonarme çerçeveyi daha rijit kılmasından ve yapısal olarak daha gevrek hale getirmesinden dolayı daha rijit modellerde daha az enerji yutma kapasitesine sahip olunmuştur.



**Şekil 5.39** Yalın ve farklı rijitlik oranlarındaki GFRP kompozit plaka ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve modellerin enerji yutma kapasiteleri birim alan değerleri

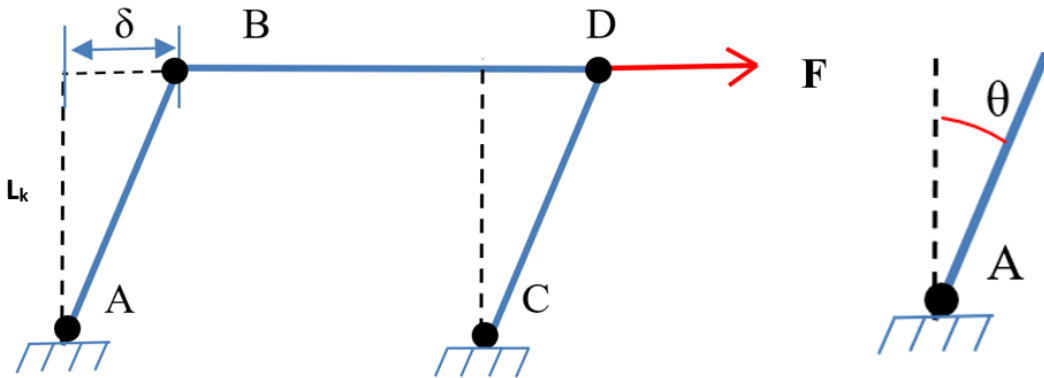


## BÖLÜM 6

### ANALİTİK ÇALIŞMALAR

#### 6.1 REFERANS (YALIN) BETONARME ÇERÇEVE İÇİN

Betonarme çerçevelerin taşıyabileceği yanal yük kapasitesi açısından teorik olarak irdelediğimiz bu bölümde ilgili formülasyonlar verilmektedir. Betonarme yapılarda kolonlar, aksenal basınç yoluyla alttaki temellere uzanan ve yapının yükünü aktarmayı amaçlayan birincil yapısal elemanlardır (Isleem ve diğ 2021). Kolonlar verdikleri sismik reaksiyonlardan dolayı genellikle en önemli yapı elemanları olarak kabul edilirler (Ahmad ve Hasnain 2021; Buka ve diğ 2018). Betonarme yapılarda meydana gelen önemli bir husus plastik mafsallaşmadır. Plastik mafsal ( $M_p$ ) herhangi bir kolon-kiriş kesitinin belirli bir moment değerinde serbestçe dönmesi olarak tanımlanabilir. Klasik mafsaldan plastik mafsalı farklı kılan şey, mafsalda ki moment değerinin sıfır değil, akma momenti  $M_y$  olmasıdır. Betonarme hesaplarında hesapları basitleştirebilmek için kesitin taşıma gücünün plastik mafsalda ki momente denk olduğu kabul edilir  $M_p=M_y=M_r$  (Ersoy ve Özcebe 2007). Yapısal hesaplamalarda, donatının akması ile oluşacak plastik mafsal aşağıda şekil 192’de verildiği gibi noktasal olacağı kabul edilir. Yerdeğiştirme miktarları hesap edilirken plastik mafsalın meydana geldiği uzunluk da hesaba katılmalıdır. Köşe noktalarda ki siyah noktalar plastik mafsalları temsil etmektedir.



Şekil 6.1 Betonarme çerçevede plastik mafsal oluşması

İkinci merteye etkileri ihmal edilirse aşağıda denge denklemleri yazılabilir (Ersoy ve Özcebe 2007)

$$V_1 \times L_k = M_1 \quad (6.1)$$

$$V_2 \times L_k = M_2 \quad (6.2)$$

$$V_1 + V_2 = F \quad (6.3)$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta \quad (6.4)$$

Yapısal elemanlar elastik sınırlarda kaldığı sürece moment ve eğrilik arasındaki ilişki doğrudur. Elastik durumlar için çerçevenin yanal ötelenmesi aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\frac{\delta_1}{2} = \frac{M_1 \times l_1}{K_1} \times \frac{2}{3} \times l_1 \quad (6.5)$$

$$\frac{\delta_2}{2} = \frac{M_2 \times l_1}{K_2} \times \frac{2}{3} \times l_2 \quad (6.6)$$

$M_1/M_2$  oranlarından  $V_1/V_2$  taban kesme kuvvet değerlerinin oranları hesaplanır. Belirlenen bu değerlerle farklı durumlar için taban kesme kuvvet değerleri ve yanal yerdeğiştirmeler bulunur.

Kolonlar için nihai yük taşıma kapasitesi veya yanal yük taşıma kapasitesi ( $V_u$ ) denklem (6.7) kullanılarak elde edilebilir (Raheel vd. 2022).

$$V_u = \min\left(\frac{M_F}{L}, V_s\right) \quad (6.7)$$

$M_F$ : Betonarme çerçevelerde dikdörtgen kolonların eğilme kapasitesi

$V_s$  : Kesme kapasitesi

$L$  : Kolon boyu

Kesme emniyeti için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır (TS500 2000):

$$V_r \geq V_d \quad (6.8)$$

$$V_r = V_c + V_w \quad (6.9)$$

$$V_c = 0.8V_{cr} \quad (6.10)$$

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} f_{yw} d \quad (6.11)$$

Betonarme yapılarda herhangi bir kesitin kesme çatlama dayanımı, yaklaşık olarak aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (TS500 2000).

$$V_{cr} = 0.65 f_{ctd} b_w d \left( 1 + \gamma \frac{N_d}{A_c} \right) \quad (6.12)$$

Bu tez çalışması kapsamında, sonlu eleman modellerde kullanılan kenetli (normal) durumda ki betonarme çerçeveler için yapılan analitik hesaplamalar sonucunda  $V_{cr}$  değeri 3973 N=3.97 kN olarak hesaplanmıştır. Sonlu eleman model doğrusal olmayan analiz sonucunda ise 4020 N=4.02 kN değeri elde edilmiştir. Hesap edilen analitik değer ve nümerik sonuç arasında % 1.3'lük bir hata tespit edilmiştir. Bu sonuçlarda yapılan sonlu eleman analizlerinin tutarlılığını ortaya koymaktadır.

## 6.2 GFRP KOMPOZİT PLAKA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME ÇERÇEVE İÇİN

Bu kısımda, sonlu eleman modellerde kullanılan kenetli (normal) durumda ki GFRP plakalar ile güçlendirilmiş betonarme çerçeveler için yapılan analitik ve nümerik hesaplamalar sonuçları verilmektedir. GFRP kompozit plakalar ile güçlendirilmiş betonarme çerçeve yapı modelinde köşegen basınç ve çekme çubukları çifti ile temsil edilecektir (TBDY 2018).

Basınç Çubukları İçin:

Rijitlik:

Basınç çubuğunun genişliği  $a_d$  hesaplanacaktır.

$$a_d = 0.175 (\lambda d h k)^{-0.4} r_d \quad (6.13)$$

Burada  $a_d$  çubuk genişliği (mm) ,  $h k$  kolon boyu (mm),  $r_d$  dolgu duvarı köşegen uzunluğudur (mm).

$$k_d = \frac{a_d t_d E_d}{r_d} \quad (6.14)$$

Kesme Dayanımı:

$$V_d = A_d (\tau_d + f_y d_p s_h) \leq 0.22 A_d f_d \quad (6.15)$$

Yatay kesit alanı  $A_d$ , basınç dayanımı  $f_d$  ve kayma dayanımı  $\tau_d$  olan güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçevenin kesme kuvveti dayanımı  $V_d$  , hesaplanacaktır.

Çekme Çubukları İçin:

$$T_f = 0.003 E_f w_f t_f \quad (6.16)$$

Bu denklemlerde  $E_f$  ,  $w_f$  ve  $t_f$  sırasıyla lifli polimerin elastisite modülü, genişliği ve kalınlığı,  $r_d$  dolgu duvarlı betonarme çerçeve köşegen uzunluğudur. Lifli polimerler ile yapılacak güçlendirmede maksimum kesme kuvveti değeri aşağıda ki gibi hesaplanabilir (Polat 2014):

$$V_r = V_c + V_w + V_f \leq V_{max} \quad (6.17)$$

$V_f$ , betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısını ifade etmektedir.

$$V_f = \frac{2 n_f w_f E_f \epsilon_f d}{s_f} \quad (6.18)$$

Bu denklemde  $n_f$  kesitin tek yüzünde bulunan fiber sayısını,  $w_f$  fiber kalınlığını,  $s_f$  fiber şeritler arası eksenden eksene olan mesafeyi göstermektedir (TDY2007). Güçlendirme elemanlarında (ACI 318-19):

$$V_u \leq \phi 5 \tan \phi \lambda_s \sqrt{f_c} b_w * d \quad (6.19)$$

Yapılan analitik hesaplamalar sonucunda güçlendirilmiş betonarme çerçevede ki kesme değeri analitik olarak  $V_r$  6.27 KN olarak elde edilmiştir. Güçlendirilmiş çerçeve sonlu eleman modelinden ise 6.59 KN elde edilmiştir. Yaklaşık %5'lik bir hata payı olduğu yapılan hesaplamalardan elde edilmiştir. Buda sonlu eleman modellerinin tutarlılığını göstermektedir.





## BÖLÜM 7

### SONUÇLAR

Türkiye’de mevcut ve problemlili betonarme yapıların durumunu değerlendirmek ve güçlendirmenin bu gibi yapılar üzerinde etkisini araştırmak için bu tez çalışması yapılmıştır. Özellikle kolon kiriş birleşim bölgelerinde düğüm noktalarındaki kenetlenme kusurlarının dahil edilmesi ve bu düğüm noktalarının güçlendirme sonrasında nasıl davranacağı ve düğüm noktalarında plastik mafsal oluşumu da yapılan çalışmalarda irdelenmiştir. Ülkemizde 2000 yılı öncesi inşa edilen ve mevcut yapı stokunun, özellikle İstanbul gibi hayli yüksek sismik tehlike altında olan bölgelerde bulunan betonarme yapıların büyük bir kısmının düşük beton basınç dayanımına sahip olması bu çalışmada dikkate alınan bir diğer önemli husustur. Basınç dayanımı düşük ve narin kesitli betonarme çerçeve taşıyıcı sisteme sahip yapıların güçlendirme ile ne derece yanal yük taşıma kapasitesi artırılabilir bu konuda ele alınmıştır. Mevcut yapıların diğer bir problemi kolon kiriş kesitlerinin mevcut yönetmeliklere göre çok narin kaldığı ve içerisindeki boyuna donatıların yetersizliği, etriyelerin olmaması veya sıklaştırma bölgelerinin olmaması da bu çalışma kapsamında dikkate alınarak bu problemlerin mevcut olduğu betonarme çerçeve modeller laboratuvar ortamında imal edilmiştir. Ayrıca bu modellerin nümerik olarak sonlu eleman modelleri birebir aynı olacak şekilde oluşturulmuştur. Sonrasında yapılan deprem testlerinden ve statik itme testlerinden alınan sonuçlar irdelenmiş ve nümerik analizlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca betonarme çerçevelerin yanal yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi için elde edilen kolon kesme kuvveti değerleri yönetmelik (TS500-2000), bilimsel yayın (Raheel vd. 2022) ve betonarme kitabından (Ersoy ve Özcebe 2007) alınan formülasyonlarla analitik çözüm yapılmıştır ve bulunan kolon kesit kesme kuvveti değerleri analitik ve nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel, sayısal ve analitik hesaplamalar sonucunda:

- Betonarme çerçevelerin GFRP kompozit eleman güçlendirmeleri ile yanal yük taşıma kapasitesi referans çerçeveye oranla 3 kat civarında yanal yük taşıma kapasitesinde artış olduğu deneysel ve nümerik olarak yapılan analizler sonrasında görülmüştür.

- Mevcut yapılarında servis ömürleri süresince birçok depreme maruz kaldığı düşünülerek yapılan 124 adet sismik testlerden sonra yapılan statik itme analizlerinde güçlendirilmiş betonarme çerçevelerin referans çerçeveye oranla 3 kat civarında fazla yük taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüştür. Servis ömrünü tamamlamaya yakın olan ve beton basınç dayanımının düşük olduğu yapılarda da yanal yük taşıma kapasitesinin artacağı elde edilen sonuçlara dayanarak ifade edilebilir.
- Statik itme analizi öncesinde yapılan 124 adet sismik sarsma testinin deneysel çerçevelerde kılcal çatlaklara yol açtığı ve nümerik analizlerin daha altında yük taşıma kapasitelerine sahip olmalarına etki etmiştir.
- Güçlendirmede yaygın bir şekilde kullanılan çelik profiller yerine GFRP kompozit elemanlarında kullanılabileceği bu tez kapsamında yayınlanan makalede ifade edilmiştir. Aynı rijitlik değerine sahip çelik profile kıyasla GFRP kutu kesit kompozit elemanlı güçlendirilmiş çerçevenin daha fazla yanal yük taşıdığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Yapılan deneysel statik itme analizleri sonucunda, çaprazlarla güçlendirilmiş çerçevenin yatay yer değiştirmelerinin sınırlanmasıyla birlikte ikincil moment etkilerinin azaldığı ve depremin yıkıcı etkisinin önüne geçilebileceği görülmüştür.
- Kirişin kolona bağlandığı yüzeylerde çaprazların kirişlerde oluşturduğu kesme etkisi neticesinde açılı kırılma hatları oluşmuştur.
- Kullanılan çapraz GFRP plakaların eksenel rijitlikleri çerçevenin kolon kirişleri ile kıyaslandığında nispeten daha rijit olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle plakalarda yırtılma meydana gelmemiş, fakat betonarme çerçevelerin kolon-kiriş birleşimlerinde oluşan plastik mafsallar oluşmamış ve kesme kuvveti altında kirişlerde çapraz kırılmalar meydana geldiği gözlemlenmiştir.
- GFRP kompozit plakalarla güçlendirilmiş betonarme çerçevelerde, kolon kiriş birleşim düğüm noktaları donatı kenetlenmesi olmaması veya zayıf olan eski ve mevcut betonarme yapılarda düğüm noktalarında plastik mafsallaşmayı önleyebilecek veya geciktirebilecek bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır.
- Çerçevelerin başlangıçtaki doğrusal yatay rijitlikleri kıyaslandığında referans çerçeveye göre güçlendirilmiş çerçeve 2.5 kat artış elde edilmiştir.
- Sarsma tablasında gerçekleştirilen deprem deneylerinde, betonarme çerçevelerin göçmemesi planlanarak deprem ivme kaydı değerleri ölçeklenmiş ve gerçekleştirilen testler sonucunda küçük ölçekli depremlerde GFRP plaka güçlendirmelerinin yerdeğiştirme hareketi üzerinde çok fazla bir sınırlayıcı etkisi olmadığı görülmüştür.

- Kullanılan çapraz GFRP plakaların aksenal rijitlikleri çerçevenin kolon kirişleri ile kıyaslandığında nispeten daha rijit olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle plakalarda yırtılma meydana gelmemiş ancak basınç altında olan plakalarda burkulma şekil değişimleri meydana gelmiştir.
- Farklı tiplerde yapılacak güçlendirme modellerinin sonuçları incelendiğinde en etkili güçlendirme tiplerinin sırasıyla çapraz kutu profiller, kompozit panel durumu ve kompozit çapraz plakalarla güçlendirmeler olduğu yapılan sonlu eleman modellerin sayısal analizlerinden elde edilmiştir.
- Yapılan nümerik analiz sonuçlarında betonarme çerçevelerin GFRP plakalarla güçlendirilmesi sonucunda daha narin güçlendirme plakalarına sahip çerçevelerde enerji yutma kapasitesinin referans çerçeveye göre arttığı görülmektedir. Ancak güçlendirmede kullanılan GFRP plakasının aksenal rijitliği arttıkça enerji yutma kapasitesinin düştüğü elde edilmiştir. Bu durumda yapının sünek davranıştan daha gevrek davranışa geçmesi yapısal davranış olarak izah edilmektedir. Daha rijit hale gelen çerçeveler daha az enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.
- Uygulanan güçlendirme plakalarının daha narin kesitli çerçevelerde çok daha etkin olduğu yapılan sonlu eleman modellerinde görülmüştür. Betonarme çerçevelerin kesit narinliği azaldıkça güçlendirmenin etkinliğinin azaldığı görülmektedir.
- Yalın halde bulunan betonarme çerçevelerde kesit rijitlik oranlarının artmasıyla güçlendirmenin etkisinin azaldığı görülmektedir ancak yanal yük taşıma kapasitesi açısından 4 kat daha rijit olan bir çerçevenin 10 kattan daha fazla yük taşıma kapasitesi olduğu yapılan sonlu eleman modelleri sonucunda elde edilmiştir. Bu durumda kesit kapasitesi yönetmeliklere göre yetersiz olan betonarme çerçeve sistemlerin özellikle dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.
- Güçlendirmede kullanılan GFRP plakaların aksenal rijitlik değişimi irdelendiğinde yanal yük taşıma kapasitesi açısından P1'e göre 5 kat daha rijit olan P3 plakası ile güçlendirilmiş çerçevelerin 2.5 kat daha fazla yanal yük taşıma kapasitesine eriştiği görülmektedir.
- İlerleyen bilimsel çalışmalarda daha büyük ölçekli deprem kayıtları altında sarsma testlerinin yapılması ve yerdeğiştirme hareketi üzerine GFRP kompozit plakaların sınırlayıcı etkisinin araştırılması önerilmektedir.
- GFRP kompozit malzeme ve betonarme çerçeve model bağlantı detaylarının yatay yük taşıma kapasitesi üzerine etki edebileceği düşünülmektedir bu durumda araştırılması önerilen bir diğer konudur.

- Deneşlerde kullanılan betonarme çerçevelerin boyutları daha büyük seçilerek deprem testlerinin ve yanal itme testlerinin yapılması ve özellikle açıklık/yükseklik değışiminin yanal yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi de gelecek araştırmalarda, çalışılması gereken bir diğeri önemli husustur.



## KAYNAKLAR

- Kaplan S A** (2008) Dolgu Duvarların Betonarme Taşıyıcı Sistem Performansına Etkisi. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 452 (6):49-62.
- Özmen B Can H** (2010) Türkiye'nin Deprem Gerçeği Paneli. Ankara: Gazi Üniversitesi. [http://webftp.gazi.edu.tr/deprem/turkiyenin\\_deprem\\_gercegi\\_paneli\\_kitabi.pdf](http://webftp.gazi.edu.tr/deprem/turkiyenin_deprem_gercegi_paneli_kitabi.pdf)
- Aral M Tunç G** (2021) Türkiye’de Deprem Performansına Dayalı Bina Kimlik Bilgilerinin Oluşturulmasına Yönelik Çalışma ve Öneriler. *Journal of Disaster and Risk*, 4 (1): 20-41.
- Demirel İ O Yakut A Binici B ve Canbay E** (2015) Betonarme Çerçevelerde Dolgu Duvar Etkisinin İncelenmesi Üzerine Deneysel Çalışma. 3. *Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 14-16 Ekim 2015 – DEÜ – İZMİR.
- Özdemir H EREN İ** (2009) Bölme Duvarının ve Bölme Duvar Güçlendirilmesinin Çerçeve Davranışına Etkisi. *itüdergisi/d, mühendislik*, 8 (6): 133-145.
- İrtem E Türker K ve Hasgül U** (2005) Dolgu Duvarlarının Betonarme Bina Davranışına Etkisi. *itüdergisi/d mühendislik*, 4 (4): 3-13.
- Baran M** (2012) Dolgu Duvarların Betonarme Çerçevesi Yapıların Davranışı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(2): 275-284.
- Vemuri J Ehteshamuddin S Ravula M and Kolluru S** (2019) Pushover Analysis Of Soft Brick Unreinforced Masonry Walls Using Analytical And Numerical Approaches. *Materials Today: Proceedings*, 28(2020): 420-425.
- Tezcan S Yazıcı A Özdemir Z ve Erkal A** (2007) Zayıf Kat – Yumuşak Kat Düzensizliği. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, 16-20 Ekim 2007, İstanbul
- Sevil T Baran M ve Canbay E** (2010) Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçevesi Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel Ve Kuramsal Çalışmalar. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2 (2): 35-42.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı** (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Esaslar Ankara.
- Farghaly A A and Rahim H H A** (2013) Contribution Of Non-Structural Brick Walls Distributions On Structures Seismic Responses. *Earthquakes and Structures*, 5(5) 553-
- Crisafulli F** (1997) Seismic Behaviour of Reinforced Structures With Reinforced Masonry Infill. *Ph.D. thesis*, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zeland, 416.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sayın B ve Kaplan SA** (2005) Deprem Etkisi Altındaki Betonarme Yapılarda Dolgu Duvarların Modellenme Teknikleri. *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, 2005.
- Sağlıyan S** (2018) Dolgu Duvarların Modellenme Yaklaşımlarının Betonarme Çerçeve Davranışına Etkisi. *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi Science and Eng. J of Fırat Univ.* 30 (2): 165-174
- Hendry A W** (1981). Structural Brickwork, 1st edition, ISBN:978-1-349-81441-1, Macmillan Press , London. 218 p.
- Korkmaz K A Çarhoğlu A I Orhon A V ve Nuhoglu A** (2014) Farklı Yapısal Malzeme Özelliklerinin Yığma Yapı Davranışına Etkisi. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3(1): 69-78.
- D'Ambra C Lignola G P Prota A Fabbrocino F and Sacco E** (2019) FRCM Strengthening of Clay Brick Walls For Out Of Plane Loads. *Composites Part B*, 174(107050): 1-11
- Yadollahi M M Benli A and Varolgüneş S** (2016) Masonry Infill Walls Effect in Short Column Formation in RC Buildings: A Case Study. *KSU. Journal of Engineering Sciences*, 19(2):78-83.
- Sakcalı G B Tekeli H ve Demir F** (2015) Betonarme Binalardaki Perde Duvar Miktarının Bina Performansına Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü Dergisi*, 21(2): 157-168.
- Uçar T ve Merter O** (2009) Planda Perde Yerleşiminin Betonarme Perde-Çerçevesel Binaların Deprem Davranışına Etkisi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(2):11-18.
- Özcan A İ ve Erkuş B** (2016), Yüksek Yapılarda Betonarme Perde Duvarların Kesme Davranışının Parametrik İncelenmesi. *Prof. Dr. M. Hasan BODUROĞLU Sempozyumu*, 12-13 Mayıs, 2016, İstanbul.
- Dönmez D** (2019) Betonarme Yurt Binasının Perde Duvar İle Güçlendirilmesinde Mevcut Duvarların Etkisinin İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi (DEU FMD)*, 21(62): 379-393.
- Olabi M N Çağlar N Kısa M H ve Yüksel B** (2018) Kompozit Perde Duvarların Yatay Yük Etkisi Altındaki Davranışlarının İrdelenmesi. *Engineering and Science*, 09-11 November 2018 (ISITES2018 Alanya – Antalya - Turkey)
- Pazmiño C Moscoso M Arévalo D Guaminga E Gómez C Herrera M and Vintimilla J** (2019) Experimental Study of Steel Tube Panel Under in-Plan Lateral Cyclic Load. *Case Studies in Construction Materials*, 11(2019): 1-19.
- Assaad J Chakar E and Zéhil G P** (2018) Testing And Modeling The Behavior Of Sandwich Lightweight Panels Against Wind And Seismic Loads. *Engineering Structures*, 175 (2018): 457–466.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Nyea T K Pantelidesa C P and Burningham C A** (2018) Unidirectional GFRP Composite Connections Between Precast Concrete Wall Panels Under Simulated Seismic Loads. *Composite Structures*, 203 (2018): 624–635.
- Prabha P Palani G S Lakshmanan N and Senthil R** (2017) Behaviour Of Steel-Foam Concrete Composite Panel Under İn-Plane Lateral Load. *Journal of Constructional Steel Research*, 139 (2017) 437–448.
- TBDY** (2018) Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. *Resmi Gazete*, 18 Mart 2018, Sayı : 30364
- Aksoylu C and N Kara** (2020) Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels. *Journal of Building Engineering*, 31(101338):1-14.
- Asteris P G** (2011) Failure Modes of In-Filled Frames. *Electronic Journal of Structural Engineering*,. 11(1):1-20.
- Öztürkoğlu O Uçar T Yeşilce Y** (2015) Kısmi Boşluklu Dolgu Duvarların Betonarme Binaların Deprem Davranışına Etkisinin İncelenmesi. *International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015)*, Burdur.
- F Marjani** (2002) Behavior of Brick Infilled Reinforced Concrete Frames Under Reversed Cyclic Loading. *ECAS2002 International Symposium on Structural and Earthquake Engineering*.
- Baran M** (2011) Seismic strengthening of reinforced concrete frames by precast concrete panels. *Magazine of Concrete Research*, 63(5): 321-332.
- Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik** (2007) *Resmi Gazete*, 6 Mart 2007, Sayı : 26454.
- Jiang LQ H Zheng and Y Hu** (2017) Experimental Seismic Performance of Steel- And Composite Steel-Panel Wall Strengthened Steel Frames. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3): 520-534.
- Petkune N** (2018) Comparison of The Behaviour of Steel, Pure FRP And Hybrid Shear Walls Under Cyclic Seismic Loading İn Aspect of Stiffness Degradation And Energy Absorption. *Construction and Building Materials*. 165(2018): 621-630.
- Topcu A** (2017) Betonarme Taşıyıcı Sistem. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi- İMO Bursa*, 2017.
- T.C. Bayındırlık Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü** (1996) <https://www.afad.gov.tr/>
- AFAD** (2018) Türkiye Deprem Tehlike Haritası. <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>
- Akkaya A** (2014) Betonarme Kolon Davranışının Moment Eğrilik İlişkisi İle Parametrik Olarak İncelenmesi, *Yüksek Lisans*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, Sakarya, s. 97

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Doğangün A** (2007) Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı. 3. dü. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Ersoy U ve Özcebe G** (2012) Betonarme. 3. dü. İstanbul: Evrim Yayınevi.
- Ersoy U Özcebe G** (1998) Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme. İMO Teknik Dergi, pp. 1799-1827.
- Mander J B Priestley M J N Park R** (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 144(8):1804-1826.
- DBYBHY** (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. s.l.: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı.
- Ince G Tekeli H Ince H H Ocal C Mercan K and Ulutaş H** (2015) Reinforcement of RC Frames With Eccentrically Braced Vertical Links. *International Burdur Earthquake & Environment Symposium (IBEES2015)*, 7-9 May 2015, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur-Turkey
- Ulger T Karabulut M and Mert N** (2022) Lateral load performance of a reinforced concrete frame with pultruded GFRP box braces. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 5(1):40-49.
- Chalioris CE Favvata MJ and Karayannis CG** (2008) Reinforced concrete beam-column joints with crossed inclined bars under cyclic deformations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37(2008):881-897.
- Hu HT Lin FM and Jan YY** (2004) Nonlinear Finite Element Analysis Of Reinforced Concrete Beams Strengthened By Fiber-Reinforced Plastics. *Composite Structures*, 63(2004):271-281.
- Cruz MVRG Esteban AM and Neyra PD** (2021) Optimal Ductility Enhancement Of RC Framed Buildings Considering Different Non-Invasive Retrofitting Techniques. *Engineering Structures*, 242 (112572): 1-11.
- Castaldo P Tubaldi E Selvi F and Gioiella L** (2021) Seismic Performance of An Existing RC Structure Retrofitted With Buckling Restrained Braces. *Journal of Building Engineering*, 33(101688):1-18.
- Mahdavi-pour MA Eslami A and Jehel P** (2020) Seismic Evaluation of Ordinary RC Buildings Retrofitted With Externally Bonded Frps Using A Reliability-Based Approach. *Composite Structures*, 232(11567): 1-29.
- Ferracuti B Savoia M and Zucconi M** (2020) RC Frame Structures Retrofitted By FRP-Wrapping: A Model For Columns Under Axial Loading And Cyclic Bending. *Engineering Structures*, 207(110243):1-14.
- Shin DH and Kim HJ** (2020) Cyclic Response of Rectangular RC Columns Retrofitted By Hybrid FRP Sheets. *Structures*, 28(2020):697-712.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kareem A** (2014) Shear Strengthening Of Reinforced Concrete Beams With Rectangular Web Openings By FRP Composites. *Advances in Concrete Construction*, 2(4):281-300.
- Erdem I Akyuz U Ersoy U and Ozcebe G** (2006) An Experimental Study On Two Different Strengthening Techniques For RC Frames. *Engineering Structures*, 28(2006):1843-1851.
- Ozcelik R Binici B and Kurç O** (2012) Pseudo Dynamic Testing of An RC Frame Retrofitted With Chevron Braces. *Journal of Earthquake Engineering*, 16 (2012): 515-539.
- Karalis AA and Stylianidisa KC** (2013) Experimental Investigation Of Existing R/C Frames Strengthened By High Dissipation Steel Link Elements. *Earthquakes and Structures*, 5(2):143-160.
- ASTM D 3039 M-08** (2007) Standard Test Method For Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM (American Society for Testing and Materials).
- TS EN ISO 527-4.** (2007) Plâstikler–Çekme Özelliklerinin Tayini–Bölüm 4: İzotropik ve Ortotropik Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Standartları. Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN ISO 527-5.** (2010) Plâstikler–Çekme Özelliklerinin Tayini–Bölüm 5: Tek Yönlü Elyaf Takviyeli Plâstik Kompozitler İçin Deney Standartları. Türk Standartları Enstitüsü.
- Aydın F Sarıbiyık M** (2013) Investigation Of Flexural Behaviors Of Hybrid Beams Formed With GFRP Box Section And Concrete. *Construction and Building Materials*, 41 (2013):563-569.
- Yılmaz E E Uzun M and Cogurcu M T** (2018) Strengthening the reinforced concrete frames and enhancing the earthquake performance. *Journal of Selcuk-Technic*, 17(3)-2018.
- Steel Structures Tables** (2019) Karadeniz Technical University. Civil Engineering Department. Page 2. Section. Static Values.
- TS500** (2000) Betonarme Yapıların Tasarım Ve Yapım Kuralları. Türk Standardı. ICS 91.080.40. Türk Standartları Enstitüsü- Şubat.
- Zhang X Liu L and Tang K** (2013) Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beam by ANSYS. *Applied Mechanics and Materials*, 438-439 (2013):663-666.
- PEER** (2022) Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database, <https://ngawest2.berkeley.edu/>
- DASK** (2019) Depreme Dayanıklı Bina Tasarımı Yarışması, <https://binatasarimi.dask.gov.tr/>

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Isleem H F Abid M Alaloul W S Shah M K Zeb S Musarat M A Javed M F Aslam F and Alabduljabbar H** (2021) Axial Compressive Strength Models of Eccentrically-Loaded Rectangular Reinforced Concrete Columns Confined with FRP. *Materials*, 14(2021):3498.
- Ahmad S and Hasnain G** (2021) FEA of Reinforced Concrete Beam-Column Joint With Steel Fibers For Cyclic Loading. *Int. J. Struct. Integr.*, 12 (2021): 670–687.
- Buka-Vaivade K Sliseris J Serdjuks D Pakrastins L and Vatin N.I.** (2018) Rational Use Of HPSFRC In Multi-Storey Building. *Mag. Civ.Eng.* 84(2018):3-14.
- Ersoy U ve Özcebe G** (2007) Betonarme (Temel İlkeler TS500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap-II. BASKI
- Raheel A Muhammad F J Raid A Alamgir K Abdeliazim M M Abdullah M and Nikolai I V** (2022) Predicting the Lateral Load Carrying Capacity of Reinforced Concrete Rectangular Columns: Gene Expression Programming. *Materials*, 15(2022): 2673.
- Zreid I and Kaliske M** (2018) A Gradient Enhanced Plasticity-Damage Microplane Model For Concrete. *Computational Mechanics*, 62(2018):1239-1257,
- Kasım P** (2014) Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Yapı Elemanlarının Kapasite Hesabı İçin Analitik Yöntemler. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- ACI 318-19** (2019) Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute.

## ÖZGEÇMİŞ

Muhamme KARABULUT, İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimini Iğdır'da tamamladı. Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında mezun oldu. 2011 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Deprem Mühendisliği alanında yüksek lisansa başladı. 2013 yılında Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde yapı anabilim dalında "Araştırma Görevlisi" olarak göreve başladı ve halen devam etmektedir. 2016 yılında ZBEÜ Yapı Mühendisliği alanında yüksek lisans derecesi aldı. 2016 yılında ZBEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalı'nda doktora başladı. Uluslararası dergilerde yayınlanmış 13 makale ve konferans, sempozyum gibi bilimsel toplantılarda sunulmuş 22 adet bildirisi bulunmaktadır. Yüksek lisans tezi 2018 yılında Uluslararası Baraj Büvenliği Sempozyumunda düzenlenen en iyi akademik tez yarışmasında 3.lük derecesini aldı. Uluslararası ve ulusal olarak düzenlenen mesleki alandaki yarışmalarda dereceler almıştır.